

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA

MECCANICA

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



**Politecnico
di Torino**

**Studio sperimentale di un circuito irroratore di
pesticidi in vigneto**

Relatore

Prof. Terenziano Raparelli

Correlatori

Prof. ssa Gabriella Eula

Dr. Alexandre Ivanov

Candidato

Frate Antonio

Luglio 2022

Sommario

1	ABSTRACT	7
2	INTRODUZIONE	8
3	CIRCUITO A UGELLO SINGOLO	11
3.1	UGELLI	18
3.2	TEMPO DI SVUOTAMENTO DEL SERBATOIO	21
3.3	ATTREZZAGGIO	23
4	PROVE A SINGOLO UGELLO	26
4.1	INTRODUZIONE ALLE IMMAGINI DIGITALI PER L'UTILIZZO DEL SOFTWARE DI IMAGE PROCESSING IMAGEJ	32
4.1.1	ISTOGRAMMI	34
4.2	DESCRIZIONE ALGORITMO ESEGUITO SU IMAGEJ	35
4.3	GENERAZIONE DELLA MACRO CHE AUTOMATIZZA L'ALGORITMO ESEGUITO SU IMAGEJ	39
4.4	DEFINIZIONE GRANDEZZE DA CALCOLARE	44
4.5	ELABORAZIONE DEI DATI PER L'ANALISI DEI RITAGLI IN POSIZIONE RANDOM 53	
4.5.1	ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO AFC11001	56
4.5.2	ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO LDC 110 01	59
4.5.3	ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO WRC110015	62
4.5.4	CONFRONTO TRA RISULTATI OTTENUTI E LETTERATURA	64
4.6	ANALISI ORDINATA	66
4.6.1	RISULTATI UGELLO AFC11001	69
4.6.2	RISULTATI UGELLO LDC11001	72
4.6.3	RISULTATI UGELLO WRC110015	76
4.6.4	CONFRONTO DEI VARI UGELLI PER UN SET DI ALTEZZA E PRESSIONE	81
5	IRRORAZIONE MEDIANTE CIRCUITO A TRE UGELLI	82
5.1	SCELTA DELL'UGELLO LATERALE	82
5.2	DESCRIZIONE PROVE SPERIMENTALI	85
5.3	RISULTATI DELL'ATTIVITA' SPERIMENTALE	87
6	CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE	90
7	GUIDA ALLA LETTURA DEI GRAFICI	97
8	CONCLUSIONI	99
9	Bibliografia	101

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 2-1 VIGNETI DI VALDOBBIADENE: FOTO DI HTTPS://WWW.COLVETORAZ.IT/IT/TERRITORIO	8
FIGURA 2-2 AGRICOLTURA DI PRECISIONE: MONITORAGGIO COLTURE [3]	9
FIGURA 2-3 DIMENSIONI VITE [2]	9
FIGURA 2-4 DRONE DI RIFERIMENTO DJI AGRAS MG-1: QUOTE DI INTERESSE [2]	10
FIGURA 2-5 METODOLOGIE DI IRRORAZIONE: SINISTRA) DRONE INTERFILARE; CENTRO) DRONE SOPRA AL FILARE; DESTRA) DRONE ACCOSTATO AL FILARE. [2]	10
FIGURA 3-1 BANCO PROVA UTILIZZATO PER L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE	11
FIGURA 3-2 ALIMENTAZIONE ELETTRICA DEL CIRCUITO	12
FIGURA 3-3 POMPA DEL CIRCUITO CON IL PROPRIO INTERRUTTORE	13
FIGURA 3-4 SCHEDA TECNICA DELLA POMPA DEL CIRCUITO	13
FIGURA 3-5 CIRCUITO IDRAULICO A MONTE DELL'UGELLO E DETTAGLI DELLO STESSO	15
FIGURA 3-6 BANCO PROVA, VISTA SUL TRALICCIO	16
FIGURA 3-7 SISTEMA AD ARCHITRAVE PER SOSPENDERE L'UGELLO	16
FIGURA 3-8 DETTAGLI DEL BANCO PROVA: MANOMETRO E UGELLO	17
FIGURA 3-9 CARATTERISTICA UGELLO AFC11001 [4]	18
FIGURA 3-10 CARATTERISTICA UGELLO WRC110015 [4]	18
FIGURA 3-11 CARATTERISTICA UGELLO LDC11001 [4]	19
FIGURA 3-12 CARTINE IDROSENSIBILI WSP UTILIZZATE A 3 BAR RISPETTIVAMENTE CON UGELLI AFC11001, WRC110015 E LDC11001 [4]	19
FIGURA 3-13 TESTINA E GUARNIZIONE OMOLOGATE AGLI UGELLI UTILIZZATI [4]	19
FIGURA 3-14 MONTAGGIO UGELLO [4]	20
FIGURA 3-15 FILTRO ANTIGOCCIA (4)	20
FIGURA 3-16 ETICHETTA COLORANTE UTILIZZATO	23
FIGURA 3-17 PROVE COLORANTE SU DIVERSI TIPI DI CARTA	24
FIGURA 3-18 ETICHETTA CARTA FOTOGRAFICA UTILIZZATA	24
FIGURA 4-1 BANCO PROVA REGOLATO A TRE ALTEZZE DIVERSE: 0,5 M, 1 M E 1,5 M	26
FIGURA 4-2 UGELLI UTILIZZATI DURANTE L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE, IN ORDINE DA SINISTRA VERSO DESTRA CI SI CONCENTRA SUL SECONDO (AFC11001), SUL QUARTO (LDC11001) E SUL QUINTO (WRC110015)	26
FIGURA 4-3 ROTOLO DI CARTA PRIMA DI ESSERE TAGLIATO	26
FIGURA 4-4 FASE DI REGOLAZIONE DELLA PRESSIONE	27
FIGURA 4-5 FOGLIO DI PROVA POSIZIONATO SU UN PALLET PER POTER ESSERE TRASPORTATO	27
FIGURA 4-6 AREA DEL LABORATORIO ADIBITA ALL'ASCIUGATURA DEI FOGLI	28
FIGURA 4-7 PARTE DI UN FOGLIO EXCEL® IN CUI SONO CATALOGATE LE PROVE	28
FIGURA 4-8 NORMA ASABE S-572.1	29
FIGURA 4-9 ACQUISIZIONE DELLE PROVE IN FORMATO DIGITALE	29
FIGURA 4-10 ACQUISIZIONE DIGITALE DELLA PROVA NUMERO 6	30
FIGURA 4-11 COLLAGE DEI RITAGLI OTTENUTI DALLA PROVA 6 E DA ELABORARE NELLA FASE DI PROCESSAMENTO	30
FIGURA 4-12 PROVA 82: RITAGLI SELEZIONATI IN MODO ORDINATO	31
FIGURA 4-13 UNA MATRICE DI PIXEL N x M HA COME ULTIMA RIGA LA (N-1)-ESIMA E COME ULTIMA COLONNA LA (M-1)-ESIMA [5]	32
FIGURA 4-14 SCALA DEI GRIGI [5]	32
FIGURA 4-15 IMMAGINE RGB IN COMPONENT ORDERING [5]	33
FIGURA 4-16 IMMAGINE RGB IN PACKED ORDERING [5]	33
FIGURA 4-17 IMMAGINE 8-BIT IN SCALA DEI GRIGI E RELATIVO ISTOGRAMMA [5]	34
FIGURA 4-18 INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DI CONTRASTO SU UN ISTOGRAMMA: (A) CONTRASTO BASSO, (B) CONTRASTO NORMALE, (C) CONTRASTO ALTO [5]	34
FIGURA 4-19 IMAGEJ – SET SCALE	35
FIGURA 4-20 IMAGEJ – DEFINIZIONE E APERTURA DI UN RITAGLIO DELL'IMMAGINE	36
FIGURA 4-21 IMAGEJ – TRASFORMAZIONE DELL'IMMAGINE DA RGB AD IMMAGINE IN SCALA DEI GRIGI AD 8 BIT	36
FIGURA 4-22 IMAGEJ – REGOLAZIONE AUTOMATICA DELLA LUMINOSITÀ	37
FIGURA 4-23 IMAGEJ – THRESHOLDING	37
FIGURA 4-24 IMAGEJ – RISULTATO DELLA SEGMENTAZIONE WATERSHID SUL RITAGLIO	38
FIGURA 4-25 IMAGEJ – ANALISI DELLE PARTICELLE	38
FIGURA 4-26 OUTPUT DELLO SCRIPT MATLAB "ALGORITMO_AUTOMATIZZAZIONE_MACROS_IMAGEJ.M", CARTELLA DELLA PROVA NUMERO 6	42
FIGURA 4-27 MACRO APERTA DA IMAGEJ®	42

FIGURA 4-28 CARTELLA DELLA PROVA NUMERO 6 DOPO AVER LANCIATO LA MACRO SU IMAGEJ®	43
FIGURA 4-29 INTERPOLAZIONE LINEARE DEGLI SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION.....	44
FIGURA 4-30 SPREAD FACTOR IN FORMA GRAFICA DAL CATALOGO SYNGENTA CROP PROTECTION [7]	45
FIGURA 4-31 INTERPOLAZIONE LINEARE RAFFINATA DEGLI SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION	46
FIGURA 4-32 SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION IN FUNZIONE DELL'UMIDITÀ RELATIVA [7].....	47
FIGURA 4-33 DIAMETRO DELLA GOCCIA PRIMA E DOPO DELLA CORREZIONE TRAMITE SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION	47
FIGURA 4-34 DIVERSE TIPOLOGIE DI SPREAD FACTOR PER STAIN DIAMETER MINORI DI 1000 MICROMETRI.....	48
FIGURA 4-35 SINISTRA) STAIN DIAMETER MASSIMO PER I 20 RITAGLI IN POSIZIONE CASUALE DI OGNI PROVA; DESTRA) STAIN DIAMETER MASSIMO PER I RITAGLI DI OGNI PROVA IN POSIZIONE ORDINATA	48
FIGURA 4-36 DIVERSE TIPOLOGIE DI SPREAD FACTOR PER STAIN DIAMETER FINO AI 6500 MICROMETRI	49
FIGURA 4-37 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DEL VMD	50
FIGURA 4-38 IDENTIFICAZIONE ED ELIMINAZIONE DEGLI OUTLIERS IN UNO DEI RITAGLI DELLA PROVA NUMERO 6.....	50
FIGURA 4-39 IMAGEJ – AREE SELEZIONATE EVIDENZIATE IN CELESTE, SONO ESCLUSE IN QUESTO CASO QUELLE AI BORDI DELLA FIGURA	52
FIGURA 4-40 RIEPILOGO DEI RISULTATI DEI RITAGLI DELLA PROVA 6	56
FIGURA 4-41 RISULTATI DELLE PROVE SULL'UGELLO AFC11001	57
FIGURA 4-42 VMD, NMD, COVERAGE FACTOR E RS IN FUNZIONE DI PRESSIONE E TEMPERATURA	58
FIGURA 4-43 DROPLET DENSITY DELLE PROVE DELL'UGELLO AFC11001	58
FIGURA 4-44 UNIT DEPOSIT PROVE DELL'UGELLO AFC11001	59
FIGURA 4-45 RISULTATI DELLE PROVE SULL'UGELLO LDC11001	60
FIGURA 4-46 VMD, NMD, COVERAGE FACTOR E RS IN FUNZIONE DI PRESSIONE E TEMPERATURA	60
FIGURA 4-47 DROPLET DENSITY DELLE PROVE DELL'UGELLO LDC11001	61
FIGURA 4-48 UNIT DEPOSIT PROVE DELL'UGELLO LDC11001	61
FIGURA 4-49 RISULTATI DELLE PROVE SULL'UGELLO WRC110015	62
FIGURA 4-50 VMD, NMD, COVERAGE FACTOR E RS IN FUNZIONE DI PRESSIONE E TEMPERATURA	63
FIGURA 4-51 DROPLET DENSITY DELLE PROVE DELL'UGELLO WRC110015	63
FIGURA 4-52 UNIT DEPOSIT PROVE DELL'UGELLO WRC110015	64
FIGURA 4-53 LEGENDA CLASSI DIMENSIONALI DELLE GOCCE [4]	64
FIGURA 4-54 DIMENSIONI DELLE GOCCE SECONDO CATALOGO IN FUNZIONE DI PRESSIONE E TIPO DI UGELLO [4].....	65
FIGURA 4-55 NORMA ASABE S-572.1	65
FIGURA 4-56 SINISTRA) FOTO DELLA PROVA 82 PRIMA DELLA SELEZIONE DEL PATTERN DI RETTANGOLI; DESTRA) RETTANGOLI DI SELEZIONE APPLICATI ALLA PROVA 82	66
FIGURA 4-57 SINISTRA) FOTO DELLA PROVA 53 PRIMA DELLA SELEZIONE DEL PATTERN DI RETTANGOLI; DESTRA) RETTANGOLI DI SELEZIONE APPLICATI ALLA PROVA 53	67
FIGURA 4-58 RISULTATI OTTENUTI ELABORANDO LA PROVA 82 UTILIZZANDO LA METODOLOGIA APPENA DESCRITTA	68
FIGURA 4-59 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, ALTEZZA FISSA A 0,5 M E PRESSIONE VARIABILE	69
FIGURA 4-60 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, ALTEZZA FISSA A 1,0 M E PRESSIONE VARIABILE	69
FIGURA 4-61 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, ALTEZZA FISSA A 1,5 M E PRESSIONE VARIABILE	70
FIGURA 4-62 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, PRESSIONE FISSA A 1,5 BAR E ALTEZZA VARIABILE	70
FIGURA 4-63 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, PRESSIONE FISSA A 3,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE	71
FIGURA 4-64 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO AFC11001, PRESSIONE FISSA A 4,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE	71
FIGURA 4-65 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, ALTEZZA FISSA A 0,5 M E PRESSIONE VARIABILE	72
FIGURA 4-66 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, ALTEZZA FISSA A 1,0 M E PRESSIONE VARIABILE	73
FIGURA 4-67 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, ALTEZZA FISSA A 1,5 M E PRESSIONE VARIABILE	73
FIGURA 4-68 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, PRESSIONE FISSA A 1,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE	74
FIGURA 4-69 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, PRESSIONE FISSA A 3,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE	75
FIGURA 4-70 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO LDC11001, PRESSIONE FISSA A 4,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE	75
FIGURA 4-71 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, ALTEZZA FISSA A 0,5 M E PRESSIONE VARIABILE	76
FIGURA 4-72 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, ALTEZZA FISSA A 1,0 M E PRESSIONE VARIABILE	77
FIGURA 4-73 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, ALTEZZA FISSA A 1,5 M E PRESSIONE VARIABILE	77
FIGURA 4-74 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, PRESSIONE FISSA A 1,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE.....	78
FIGURA 4-75 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, PRESSIONE FISSA A 2,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE.....	79
FIGURA 4-76 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, PRESSIONE FISSA A 3,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE.....	79
FIGURA 4-77 COVERAGE FACTOR E VMD PER SINGOLO UGELLO WRC110015, PRESSIONE FISSA A 4,0 BAR E ALTEZZA VARIABILE.....	80
FIGURA 4-78 COVERAGE FACTOR E VMD PER UNA PRESSIONE FISSA A 3,0 BAR, ALTEZZA 1,0 M E TIPOLOGIA DI UGELLO VARIABILE	81
FIGURA 5-1 CICRUITO IDRAULICO A TRE UGELLI.....	82
FIGURA 5-2 UGELLO WRC110015 MONTATO A 45° RISPETTO L'ORIZZONTALE E UTILIZZATO PER LE PROVE LATERALI	83
FIGURA 5-3 SINISTRA) UGELLO AFC11001; DESTRA) UGELLO LDC11001;	83

FIGURA 5-4 PROVE VERTICALI: COVERAGE FACTOR E VMD PER DUE UGELLI.....	84
FIGURA 5-5 SINISTRA) CIRCUITO A TRE UGELLI E SIMULATORE DI VIGNETO; DESTRA-ALTO) RISULTATO DELL'IRRORAZIONE SUL FOGLIO ORIZZONTALE (IN GIALLO IL CENTRO); DESTRA-BASSO) RISULTATO DELL'IRRORAZIONE SUL VOGLIO VERTICALE (IN GIALLO IL CENTRO).	85
FIGURA 5-6 SINISTRA) ESEMPIO DI PROVA CON $H < 0$; DESTRA) ESEMPIO DI PROVA CON $H > 0$	86
FIGURA 5-7 SCHEMA DELLA VISTA FRONTALE DEL SIMULATORE DI VIGNETO E DEL CIRCUITO A TRE UGELLI.....	86
FIGURA 6-1 CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE	90
FIGURA 6-2 RIDUTTORE DI PRESSIONE 533230H, CALEFFI	91
FIGURA 6-3 VASO DI ESPANSIONE 555708, CALEFFI	91
FIGURA 6-4 SCHEDA TECNICA VASO DI ESPANSIONE 555708, CALEFFI	92
FIGURA 6-5 RIDUTTORE DI PRESSIONE 533241, CALEFFI	92
FIGURA 6-6 PROVA CON CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE, PRESSIONE DI IRRORAZIONE 2 BAR, UGELLO WRC110015.....	93
FIGURA 6-7 PROVA CON CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE, PRESSIONE DI IRRORAZIONE 2 BAR, UGELLO WRC110015: RITAGLI SELEZIONATI	94
FIGURA 6-8 PROVA CON CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE, PRESSIONE DI IRRORAZIONE 2 BAR, UGELLO WRC110015: RISULTATI	94
FIGURA 6-9 PROVA CON CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE, PRESSIONE DI IRRORAZIONE 2 BAR, UGELLO WRC110015: CONFRONTO CON LA RELATIVA PROVA EFFETTUATA CON IL CIRCUITO CON POMPA.....	95

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 3-1 TEMPI DI SVUOTAMENTO DEL SERBATOIO IN FUNZIONE DEL TIPO DI UGELLO E DEL NUMERO DI UGELLI	21
TABELLA 3-2 SCHEDA TECNICA DEL COLORANTE IMPIEGATO.....	24
TABELLA 4-1 SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION	44
TABELLA 4-2 SPREAD FACTOR SYNGENTA CROP PROTECTION LETTI DAL GRAFICO.....	45
TABELLA 4-3 PROVE UGELLO AFC11001	57
TABELLA 4-4 PROVE UGELLO LDC11001.....	59
TABELLA 4-5 PROVE UGELLO WRC110015.....	62
TABELLA 5-1 PANORAMICA SULLE PROVE CON CIRCUITO A TRE UGELLI	89
TABELLA 6-1 STIMA MASSE RISPARMIATE E AGGIUNTE AL CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE	95

1 ABSTRACT

Il seguente lavoro di tesi consiste nello studio sperimentale di alcuni circuiti idraulici pensati e ottimizzati per essere montati su droni e utilizzati per l'irrorazione di pesticidi in vigneto.

L'attività sperimentale è stata eseguita irrorando con una soluzione di acqua e colorante dei fogli di carta fotografica che, opportunamente analizzati tramite il software di image processing ImageJ®, hanno rivelato le dimensioni delle gocce individuate sul foglio.

Diversi algoritmi di post-processing sviluppati su Matlab® hanno permesso per ogni prova di estrapolarne alcuni parametri caratteristici come fattore di copertura (*coverage factor*) e diametro volumetrico mediano (*VMD*) attraverso cui è possibile confrontare le varie prove.

Inizialmente si è studiato un circuito dotato di un unico ugello e si è eseguita una mappatura dei risultati per diversi set di pressione a monte dell'ugello, altezza dell'ugello rispetto al foglio di carta fotografica e tipologia di ugello (tutti a ventaglio). I risultati sono stati studiati in due modi differenti:

1. di ogni prova sono stati studiati 20 ritagli presi in posizione casuale dalla prova e di dimensione fissa molto più piccola dell'intera prova;
2. di ogni prova è stato studiato un pattern di 13 ritagli presi in posizione non casuale e fissa rispetto al centro della prova, i ritagli hanno la stessa dimensione che avevano nell'analisi precedente.

Dopodichè si è testato un circuito montante tre ugelli e all'ottimizzazione di alcuni parametri geometrici dello stesso, inoltre, è stato provato un circuito idraulico messo in pressione da un vaso di espansione precaricato per mezzo di una pompa e che riduce il carico in massa sul drone e i moti di sloshing all'interno del serbatoio.

2 INTRODUZIONE

L'irrorazione di prodotti fitosanitari per la protezione delle piante può rappresentare un problema su terreni scoscesi, un esempio concreto sono le famose colline di Valdobbiadene, dove viene prodotto l'omonimo prosecco. Su terreni caratterizzati da una pendenza così elevata è molto alto il rischio di ribaltamento quando le operazioni di irrorazione sono effettuate con un trattore, inoltre, l'irrorazione non può essere effettuata da operatori con lancia a mano perché esporrebbe gli stessi operatori al rischio di sviluppare seri problemi di salute come problemi neurologici (1).



Figura 2-1 Vigneti di Valdobbiadene: foto di <https://www.colvetoraz.it/it/territorio>

In questo contesto si studia l'ipotesi di irrorare le viti dall'alto attraverso UAV (unmanned aerial vehicle), più comunemente conosciuti come droni. L'utilizzo di droni, oltre ad evitare il problema del ribaltamento dei trattori e il rischio di esposizione degli operatori a patologie derivanti dal contatto con i pesticidi irrorati a mano, consente di sfruttare maggiormente il terreno, riducendo la larghezza delle andane (distanza tra due filari contigui di vite) e lo spazio di eventuale manovra di un trattore. Ovviamente andrebbero comunque rispettati i limiti biologici, che porrebbero un limite superiore allo sfruttamento dei terreni. (2)

In una stagione, vi sono almeno 15 passate solo per la distribuzione dei prodotti fitosanitari, e il numero delle passate cresce ogniqualvolta le piogge vadano ad intaccare questi trattamenti: ogni passata eseguita con un mezzo pesante porterebbe il terreno ad un incremento in compattazione, ed un incremento in compattazione avrebbe l'effetto di richiedere l'impiego di mezzi più pesanti, compattando ulteriormente il terreno e creando quindi un circolo vizioso. Il compattamento del terreno ne peggiorerebbe le proprietà rendendo la lavorazione più energivora e richiedendo quindi l'impiego di mezzi più pesanti. (2)

Inoltre, si è stimato che quando l'irrorazione di pesticidi avviene con trattori circa il 60% del prodotto fitosanitario manca il bersaglio, creando un danno ambientale dovuto alla contaminazione delle falde acquifere, delle abitazioni vicine, degli ecosistemi circostanti e delle altre colture. La causa principale di questa dispersione di pesticidi nell'ambiente circostante è il fenomeno della 'deriva' per cui gocce di dimensioni relativamente piccole hanno dei tempi di caduta più lunghi che le rendono preda delle correnti d'aria e le fanno finire potenzialmente lontano dalle colture interessate dal trattamento. (2) Quest'ultima considerazione è indice della necessità di operare, anche in agricoltura, con interventi mirati e chirurgici. L'agricoltura di precisione già fa utilizzo di droni, più che per l'irrorazione li utilizza per il monitoraggio delle colture dall'alto. Grazie a sensori ottici montati su droni e analisi spettrali si fa una valutazione fisiologica della coltura che permette di stabilire quale sua parte necessita di trattamenti. Questa valutazione si basa su come le piante interagiscono con le radiazioni luminose. (3)

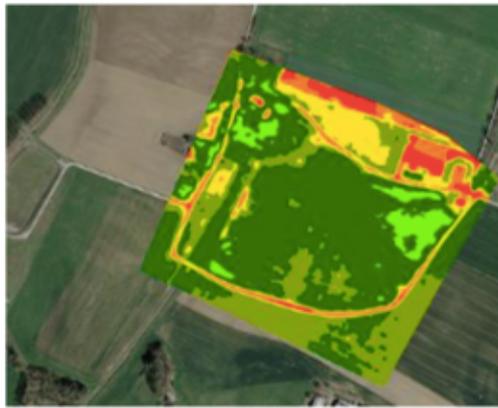


Figura 2-2 Agricoltura di precisione: monitoraggio colture [3]

L'utilizzo di droni per la parte di irrorazione è ancora del tutto sperimentale, oltre ai vantaggi citati precedentemente ci sono diverse difficoltà da superare:

- i volumi di miscela trasportabili sono esigui (10 litri come ordine di grandezza);
- le attrezzature sono meno affidabili in confronto alla grande efficienza degli atomizzatori trainati da trattori;
- le normative relative al volo sono molto stringenti e i droni possono essere pilotati solo da operai qualificati, il cui servizio farebbe lievitare i costi.

L'attività sperimentale prende come vigneto di riferimento quello studiato nella tesi di Marco Persico (2), le cui misure sono riportate nella figura 2-3 e che serviranno per ricostruire in laboratorio un simulatore di vigneto da irrorare tramite il circuito idraulico testato.

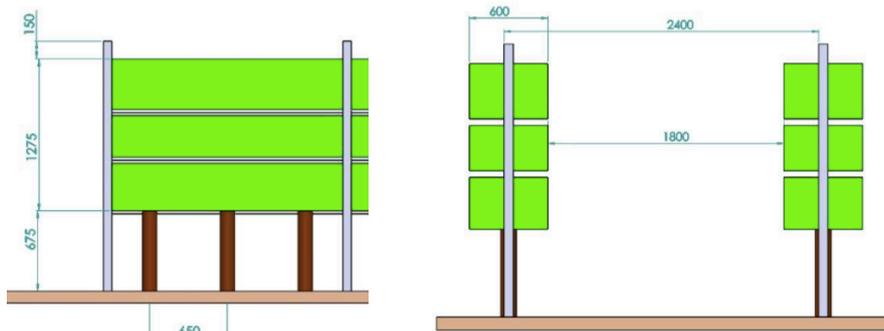


Figura 2-3 Dimensioni vite [2]

Dalla stessa tesi (2) si prende come riferimento per lo studio il drone DJI AGRAS MG-1, esso ha un serbatoio con capacità di carico pari a 10 kg di miscela fitoiatrica e una distanza tra gli ugelli laterali di circa 1400 mm. Questi due dati verranno utilizzati come ordini di grandezza per le attività sperimentali dettagliate in seguito.

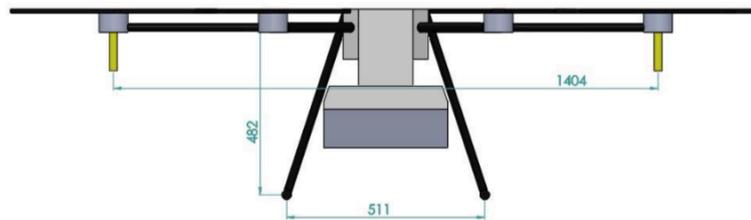


Figura 2-4 Drone di riferimento DJI AGRAS MG-1: quote di interesse [2]

L'irrorazione con drone può avvenire secondo diverse modalità, illustrate nella figura 2-5. Partendo da sinistra a destra si osservano l'irrorazione interfilare, l'irrorazione sopra il filare e l'irrorazione con accostamento al filare. In questa attività ci si è concentrati su un'irrorazione sopra il filare. (2)

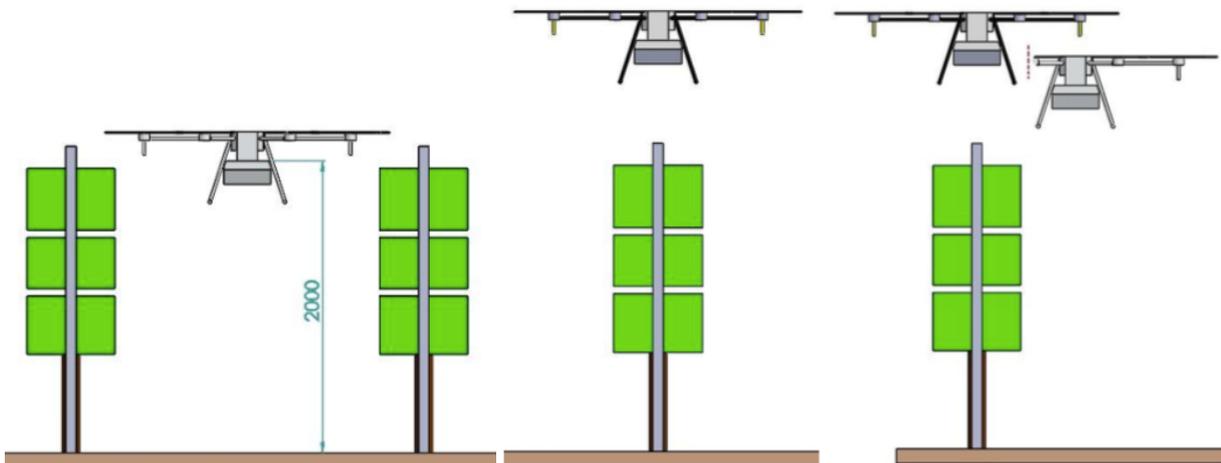


Figura 2-5 Metodologie di irrorazione: sinistra) drone interfilare; centro) drone sopra al filare; destra) drone accostato al filare. [2]

3 CIRCUITO A UGELLO SINGOLO

Al fine di simulare il processo di irrorazione del drone è stato realizzato un circuito idraulico che consente la regolazione di alcuni parametri di cui si vuole studiare l'influenza:

- pressione;
- altezza;
- tipologia di ugello;
- numero di ugelli;
- distanza tra gli ugelli (interazione tra i getti degli ugelli).

Il circuito è composto da: alimentatore, scatolotto dell'interruttore con annesso fusibile, pompa, serbatoio, porta getto, testina porta ugello, filtro, guarnizione e ugello. Verranno esaminati in questo capitolo tutte le componenti utilizzate per la realizzazione di questo circuito.

La pressione è stata regolata mediante un *by-pass* realizzato con un rubinetto regolato manualmente. Il modo in cui si effettua la regolazione di pressione non incide sui risultati sperimentali, infatti ciò che conta è il salto di pressione tra monte e valle dell'ugello.

L'attività sperimentale è stata organizzata e svolta presso il laboratorio di aeronautica *Modesto Panetti* del Politecnico di Torino (Dipartimento di Ingegneria Meccanica E Aerospaziale – DIMEAS). Lo spazio destinato alle prove è stato opportunamente isolato per evitare che colorante e acqua contaminassero o danneggiassero dispositivi, tecnologie e spazi circostanti.



Figura 3-1 banco prova utilizzato per l'attività sperimentale

Lo spazio dove si lavora si trova sotto la galleria del vento del Politecnico di Torino, pertanto gli spazi del laboratorio sono interessati da flussi d'aria in uscita dalla stessa: talvolta le prove sono interessate da correnti d'aria dal regime turbolento e dal modulo di velocità massimo pari a 0,5 m/s. Per mitigare le correnti d'aria, e avere quindi tutte le prove nelle stesse condizioni (per garantire un confronto migliore), è stato posizionato un foglio di Nylon che scherma parte delle correnti dalla direzione di uscita del flusso d'aria.

Le prove quindi sono realizzate in laboratorio e non in campo aperto e non tengono conto del fenomeno della deriva.

In figura 3-1 si vede il circuito completo:

- il traliccio su cui è montato un ugello il cui getto copre un foglio di carta fotografica posizionato su un pallet;
- il circuito a monte dell'ugello, regolato in *by-pass*.

Non è visibile nella figura 3-1 l'alimentazione elettrica descritta in seguito.

E' stata utilizzata un'alimentazione regolabile fino a 20 Ampere di corrente e fino a 20 Volt di tensione, la regolazione è effettuata attraverso delle apposite manopole:

- la tensione scelta è pari a 12V ed è vincolata dai dati di targa della pompa;
- la corrente si lascia al massimo amperaggio consentito dal dispositivo (20 Ampere) e assumerà un valore determinato dal carico.



Figura 3-2 Alimentazione elettrica del circuito

La pompa utilizzata per l'attività sperimentale è realizzata da *REMCO Industries* ed è mostrata nella figura 3-3, pesa 2,7 kg ed eroga una pressione massima di 4 bar. In seguito, è riportata un'analisi sulle portate degli ugelli che ha fissato un limite superiore della pressione a 4 bar, questo limite è ulteriormente rafforzato dal peso della pompa, infatti per ottenere pressioni più alte bisogna utilizzare pompe più grandi e pesanti, e questo comporta un'autonomia di volo del drone minore.



Figura 3-3 Pompa del circuito con il proprio interruttore

Si riporta in seguito la scheda tecnica della pompa utilizzata, da cui si nota proprio come la pressione massima scelta, come anticipato, sia pari a 4 bar.

CODICE	Assorbimento @ 12 V	IN	OUT	Portata	Pressione MAX	Tensione di alimentazione	Tipo
F2133031E1	7.5 A	3D	3D	7.2 l/min 2 US GPM	4 bar 60 PSI	12 Vdc	DEMAND
F2133032E1	7.5 A	3D	3D	7.2 l/min 2 US GPM	4 bar 60 PSI	12 Vdc	BY PASS

Caratteristiche		Dati tecnici		Accessori	
Codice	F2133032E1				
Pressione MAX	4 bar				
Pressione MAX	60 PSI				
Portata	7.2 l/min				
Portata	2 US GPM				
Tipo	BY PASS				
IN	3D				
OUT	3D				
Assorbimento @ 12 V	7.5 A				
Tensione di alimentazione	12 Vdc				

Figura 3-4 Scheda tecnica della pompa del circuito

Nella figura 3-5 è mostrato il circuito idraulico e alcuni dettagli dello stesso. I collegamenti elettrici sono realizzati con delle banane elettriche (figura 3-5 – lettera C) che è possibile collegare e scollegare molto rapidamente.

E' presente uno scatolotto (figura 3-5 – lettera D) dotato di interruttore che permette di accendere e spegnere la pompa in una posizione diversa rispetto a quella dell'alimentazione, questo è utile per posizionare l'alimentazione lontano dalla pompa e quindi a distanza di sicurezza dal circuito idraulico.

Nello scatolotto è anche contenuto un fusibile elettrico da 10 Amperè (figura 3-5 – lettera E) che si romperebbe nel caso ci fosse una sovracorrente e aprendosi salvaguarderebbe il circuito.

La pompa, descritta in precedenza, pesca il fluido da una tanica di cinque litri (figura 3-5 – lettera B) e lo mette in pressione.

La pressione è regolata manualmente tramite un rubinetto (figura 3-5 – lettera A) che permette di smaltire la portata in eccesso rispetto a quella dell'ugello. Gli estremi di regolazione sono:

- rubinetto parallelo al tubo: la resistenza è minima, così come la pressione a monte dell'ugello;
- rubinetto perpendicolare al tubo: la resistenza è infinita, non passa fluido attraverso il *by-pass* e la pressione a monte dell'ugello è massima.

Andando in una direzione piuttosto che nell'altra si regola la pressione a seconda delle esigenze. La quota di fluido che attraversa il *by-pass* finisce nello stesso serbatoio da cui pesca la pompa.

Come è visibile dal dettaglio A della figura 3-5 i tubi sono agganciati ai vari elementi del circuito tramite delle fascette metalliche, queste non vanno strette troppo lontano dalla bocca della pompa o del portaugelli per evitare di aumentare le perdite, inoltre, sotto al tubo ed in corrispondenza delle fascette metalliche, sono alloggiato strisce di lattice e/o filo di teflon per ridurre al minimo le perdite. Nel dettaglio F della figura 3-5 si vede il raccordo ad Y ad attacco rapido utilizzato: uno degli attacchi, quello del *by-pass*, che di tanto in tanto si è visto sganciarsi al crescere della pressione, è stato bloccato tramite due fascette di plastica che hanno risolto il problema.

A valle del circuito mostrato nella figura 3-5 c'è l'ugello irroratore.



Figura 3-5 Circuito idraulico a monte dell'ugello e dettagli dello stesso



Figura 3-6 Banco prova, vista sul traliccio

Dal raccordo ad Y, il fluido prosegue attraverso il tubo fino ad arrivare ad un manometro analogico da cui viene misurata la pressione e poi all'ugello. Il tubo è stato preso abbastanza lungo da poter raggiungere altezze superiori rispetto a quella considerata nella foto 3-7.

Tubo, manometro ed ugello sono stati vincolati ad una barra orizzontale regolabile in altezza.

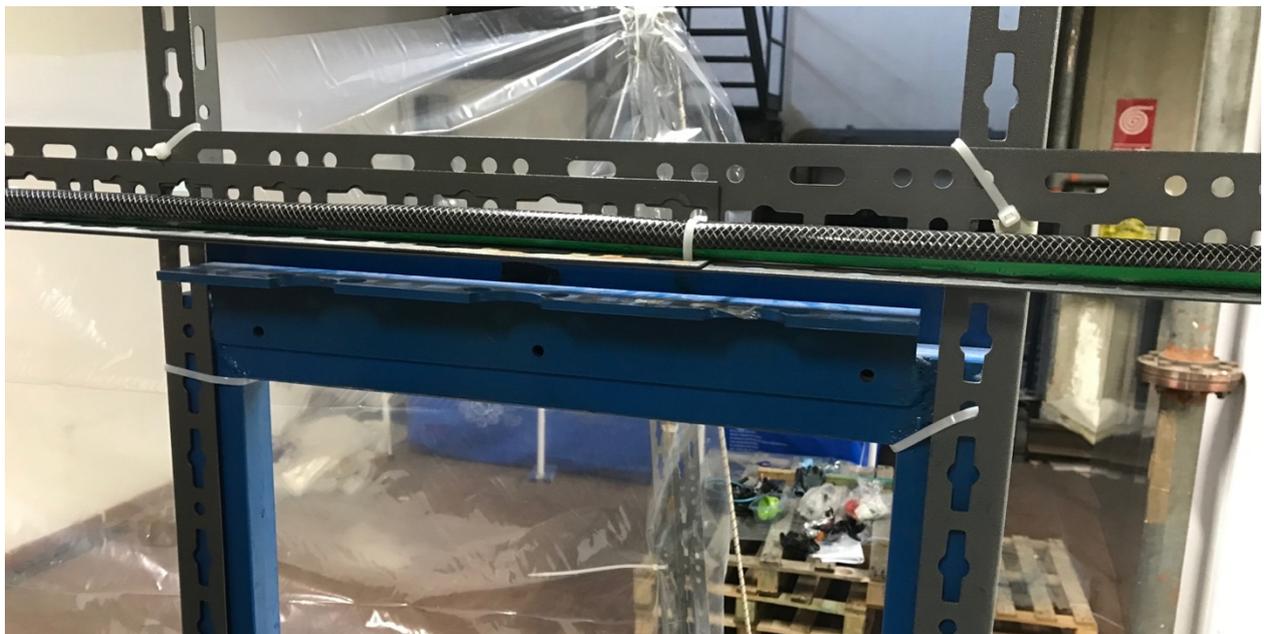


Figura 3-7 Sistema ad architrave per sospendere l'ugello

La barra orizzontale non è altro che un profilo scanalato con dei fori posti ad intervalli costanti, essa è stata fissata con delle fascette di plastica ad altre due barre analoghe poste verticalmente, visto che per cambiare l'altezza si dovrebbero sostituire le fascette di serraggio della barra si è cercato di effettuare tutte le prove necessarie ad una determinata altezza prima di cambiarla. Il sistema ad architrave costruito con i tre profili scanalati reperiti in laboratorio è stato fissato ad un traliccio mobile che serve per sostenere il sistema e movimentarlo tra le varie prove.

Nella figura 3-8 si vede il dettaglio del manometro analogico, collegato al circuito tramite un raccordo a T, e dell'ugello, collegato al circuito idraulico grazie ad un portagetto e ad una testina portaugelli.



Figura 3-8 Dettagli del banco prova: manometro e ugello

3.1 UGELLI

Gli ugelli oggetto di studio sono detti a ventaglio o a fessura, così chiamati perché creano un getto piatto dovuto alla particolare conformazione della testina in cui il foro di uscita è a forma ellittica o rettangolare.

Gli ugelli a foro ellittico o rettangolare distribuiscono una traccia al suolo caratterizzata da una distribuzione lenticolare accentuata al centro rispetto all'esterno, quelli a foro rettangolare producono un getto molto più omogeneo lungo tutta la traccia.

Gli ugelli studiati sono prodotti da *ASJ Nozzle* ed in particolare, tra quelli a ventaglio, si è scelto di studiare gli ugelli AFC11001, WRC110015, LDC11001.

Gli ugelli AFC11001 (*fan air ceramic*) sono degli ugelli antideriva e sono indicati, da catalogo, per trattamenti con erbicidi, fungicidi ed insetticidi. Sono caratterizzati da un angolo del getto pari a 110° e sono realizzati in ceramica. La copertura è abbastanza costante a tutte le pressioni, nonostante quella indicata come ottimale sia pari a 3,75 bar. (4)

Sono in grado di produrre gocce di grandi dimensioni piene di bolle d'aria che si rompono a contatto con la cultura dividendosi in gocce più fini. Si riporta in figura 3-9 la caratteristica dell'ugello.

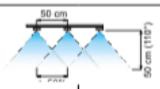
COD. CODE CÓD.	 bar	 drop	 l/min										
				4 km/h	6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
AFC11001	1.5	XC	0.28	85	57	42	34	28	24	21	19	17	14
	3	C	0.40	120	80	60	48	40	34	30	27	24	19
	4	C	0.46	139	92	69	55	46	40	35	31	28	22
	8	M	0.65	196	131	98	78	65	56	49	44	39	31

Figura 3-9 Caratteristica ugello AFC11001 [4]

Gli ugelli WRC110015 (*wide range ceramic*) sono indicati, da catalogo, per trattamenti con erbicidi, fungicidi ed insetticidi. Sono caratterizzati da un angolo del getto costante e pari a 110°, sono realizzati in ceramica. La copertura è abbastanza costante a tutte le pressioni, nonostante quella indicata come ottimale sia pari a 2,5 bar. Riduce la deriva a pressioni di 1-1,5 bar e garantisce un'eccellente copertura già a 1,5-2 bar. (4) Si riporta in figura 3-10 la caratteristica dell'ugello.

COD. CODE CÓD.	 bar	 drop	 l/min	I/ha (spazio tra gli ugelli: 50 cm) I/ha (nozzle spacing: 50 cm) I/ha (espacio entre las boquillas: 50 cm)									
				4 km/h	6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
WRC110015	1	F	0.35	104	69	52	42	35	30	26	23	21	17
	2	F	0.49	147	98	73	59	49	42	37	33	29	24
	3	F	0.60	180	120	90	72	60	51	45	40	36	29
	5	F	0.77	232	155	116	93	77	66	58	52	46	37
	7	VF	0.92	275	183	137	110	92	79	69	61	55	44

Figura 3-10 Caratteristica ugello WRC110015 [4]

Gli ugelli LDC11001 (*low drift ceramic*) sono degli ugelli antideriva e sono indicati, da catalogo, per trattamenti con erbicidi, fungicidi ed insetticidi. Sono caratterizzati da un angolo del getto pari a 110°

e sono realizzati in ceramica. La pressione indicata come ottimale dal costruttore è pari a 3 bar. (4)
Si riporta in figura 3-11 la caratteristica dell'ugello.

COD. CODE CÓD.	 bar	 drop	 l/min	l/ha (spazio tra gli ugelli: 50 cm) l/ha (nozzle spacing: 50 cm) l/ha (espacio entre las boquillas: 50 cm)									
				4 km/h	6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
LDC11001	1	M	0.23	69	46	35	28	23	20	17	15	14	11
	3	F	0.40	120	80	60	48	40	34	30	27	24	19
	4	F	0.46	139	92	69	55	46	40	35	31	28	22
	5	F	0.52	155	103	77	62	52	44	39	34	31	25
	7	F	0.61	183	122	92	73	61	52	46	41	37	29

Figura 3-11 Caratteristica ugello LDC11001 [4]

Sul catalogo, inoltre, sono presenti le foto di alcune prove effettuate su cartine idrosensibili con i diversi ugelli utilizzati a 3 bar. Grazie a queste è possibile avere un'idea del tipo di risultati che ci si deve aspettare. Nell'immagine 3-12, da sinistra a destra, è possibile osservare le prove a 3 bar con AFC11001, WRC110015 e LDC11001.

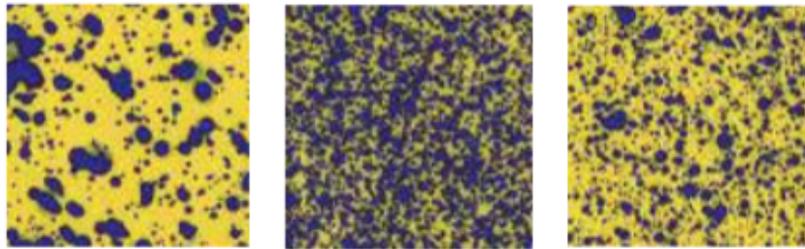


Figura 3-12 Cartine idrosensibili WSP utilizzate a 3 bar rispettivamente con ugelli AFC11001, WRC110015 e LDC11001 [4]

Affinché il funzionamento dell'ugello avvenga in modo corretto bisogna utilizzare i pezzi omologati al relativo ugello: le testine con attacco rapido, il tipo ed il numero di guarnizioni sono diversi a seconda dell'ugello usato.

Tipo Type Tipo	Testina con guarnizione Cap with gasket Cabeza con junta		Guarnizione di ricambio Spare gasket Junta de repuesto		Da utilizzare con i seguenti ugelli To be used with the following nozzles Para utilizar con las siguientes boquillas													
	COD.	PACK	COD.	PACK	SF	WR	WRC	CFLD-C	CFLD-XC	LD	LDC	ATP	AFC	CFA	SFA	CFA-U	CFA-T	AOC
	402 900 xx	25	402 200.040	25														

Figura 3-13 Testina e guarnizione omologate agli ugelli utilizzati [4]

Dalla sezione del catalogo riportata nella figura 3-13 si evince che gli ugelli di tipo WRC, AFC e LDC utilizzano tutti la stessa testina portaugello 402 900 xx e la stessa guarnizione 402 200.040. Agganciare la testina portaugello al portagetto risulta veloce ed efficace grazie al sistema di aggancio a balestra.

Il montaggio degli ugelli agricoli al circuito idraulico è realizzato secondo lo schema della figura 3-14, in cui figurano un portagetto per diserbo, un filtro antigoccia, una guarnizione, l'ugello e la testina portaugelli (testina con attacco rapido).



Figura 3-14 Montaggio ugello [4]

Il filtro usato è un antigoccia di tipo 100 mesh, l'utilizzo del filtro garantisce che l'ugello non si otturi.



**FILTRO CON ANTIGOCCIA
BALL CHECK FILTER
FILTRO CON ANTIGOTEO**

COD.	Tipo / Type / Tipo	PACK
4242313	50 mesh	50
42423135	80 mesh	
4242314	100 mesh	

Figura 3-15 Filtro antigoccia (4)

3.2 TEMPO DI SVUOTAMENTO DEL SERBATOIO

Una volta scelti gli ugelli con cui andare a lavorare, da catalogo è possibile leggere la portata che attraversa ogni ugello in funzione della pressione a monte dello stesso. E' possibile quindi calcolare, noto il volume del serbatoio del drone, il tempo in cui questo si svuoterebbe completamente della miscela fitoiatrice.

Per effettuare questa valutazione si prende come esempio il drone DJI AGRAS MG-1 studiato nella tesi di Marco Persico (2), esso possiede un serbatoio da 10 litri e un'autonomia della batteria che varia dai 12 minuti di quando è a pieno carico, fino ai 25 minuti di quando invece è vuoto. La velocità massima di questo drone è pari a 8 m/s.

I dati appena citati servono esclusivamente a dare un'idea dell'ordine di grandezza dei dati di interesse. Si calcolano quindi i tempi di esaurimento della miscela fitoiatrice nel serbatoio al variare del numero di ugelli in funzione, inoltre, ipotizzando una velocità media del drone pari a 4 m/s, si calcolano i chilometri che il drone riuscirebbe a percorrere prima di svuotare completamente il serbatoio. Nella tabella 3-1 sono presentati i risultati di questa valutazione.

UGELLO	P [bar]	Q [l/min]	V serbatoio [l]	TEMPO ESAURIMENTO MISCELA [min]				velocità media drone [m/s]	SPAZIO PERCORSO DRONE [km]			
				con 1 ugello	con 2 ugelli	con 3 ugelli	con 4 ugelli		con 1 ugello	con 2 ugelli	con 3 ugelli	con 4 ugelli
AFC 110 01	1,50	0,28	10,00	35,71	17,86	11,90	8,93	4,00	8,57	4,29	2,86	2,14
	3,00	0,40		25,00	12,50	8,33	6,25		6,00	3,00	2,00	1,50
	4,00	0,46		21,74	10,87	7,25	5,43		5,22	2,61	1,74	1,30
	8,00	0,65		15,38	7,69	5,13	3,85		3,69	1,85	1,23	0,92
LDC 110 01	1,00	0,23		43,48	21,74	14,49	10,87		10,43	5,22	3,48	2,61
	3,00	0,40		25,00	12,50	8,33	6,25		6,00	3,00	2,00	1,50
	4,00	0,46		21,74	10,87	7,25	5,43		5,22	2,61	1,74	1,30
	5,00	0,52		19,23	9,62	6,41	4,81		4,62	2,31	1,54	1,15
	7,00	0,61		16,39	8,20	5,46	4,10		3,93	1,97	1,31	0,98
WRC 110 015	1,00	0,35		28,57	14,29	9,52	7,14		6,86	3,43	2,29	1,71
	2,00	0,49		20,41	10,20	6,80	5,10		4,90	2,45	1,63	1,22
	3,00	0,60		16,67	8,33	5,56	4,17		4,00	2,00	1,33	1,00
	5,00	0,77		12,99	6,49	4,33	3,25		3,12	1,56	1,04	0,78
	7,00	0,92		10,87	5,43	3,62	2,72		2,61	1,30	0,87	0,65

Tabella 3-1 Tempi di svuotamento del serbatoio in funzione del tipo di ugello e del numero di ugelli

Visti i risultati, si è deciso di limitare a 4 bar la pressione a monte dell'ugello e quindi l'esecuzione delle prove, vengono cioè escluse dalle prove le caselle evidenziate in grigio. Le principali conseguenze di questa decisione sono:

1. si sceglie un limite inferiore del tempo di svuotamento, che continua a dipendere dal tipo di ugello e dal numero di ugelli attivi;
2. scegliendo di lavorare a pressioni più basse si potrà scegliere una pompa dal peso minore rispetto a quella che si sarebbe dovuta scegliere con un range di pressioni più ampio;
3. limitare superiormente la pressione a monte dell'ugello significa limitare inferiormente la dimensione del *droplet*.

Lavorando verosimilmente con più di un ugello attivo, è possibile osservare che tra l'autonomia della batteria (dai 12 minuti a pieno carico ai 25 a drone scarico) e quella del serbatoio sia la seconda a determinare il tempo di volo del drone.

3.3 ATTREZZAGGIO

L'attrezzaggio del banco prova consiste nell'approvvigionamento di carta e colorante. Il colorante, come visibile dall'etichetta presente nella foto 3-16, è un *acid blue 9* - 85% fornito da *Novema* e che prevede una soluzione di 50 grammi di colorante per litro d'acqua.

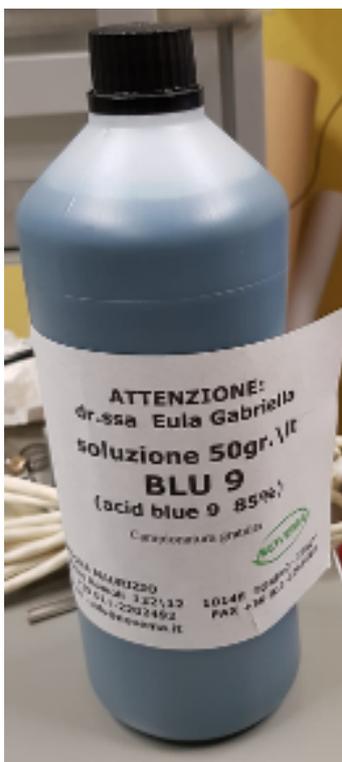


Figura 3-16 Etichetta colorante utilizzato

Nella tabella 3-2 si riporta la scheda tecnica del colorante.

Formula Bruta	$C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$
Colour Index	42090
Cas Register Number	3844-45-9
Titolo colorante puro	65 % MIN
Tonalità polvere	blu-rossastra
Tonalità soluzione 1%	blu limpida
Cloruri- Solfati- Umidità a 135 °C	35 % MAX
Insolubili in acqua	0,2 % MAX
Coloranti accessori	6,0 % MAX
Manganese	25 ppm MAX

Piombo	10 ppm
Arsenico	3 ppm MAX
Metalli pesanti totali espressi come Pb	40 ppm mAX
Odore a pH alcalino	inodore

Tabella 3-2 Scheda tecnica del colorante impiegato

Con un ugello spruzzatore da cucina agganciato ad una bottiglia da mezzo litro è stata spruzzata la soluzione di colorante su vari tipi di carta per vedere quale usare. Sono state provate varie tipologie di carta, tra cui diverse grammature di fogli A3, carta lucida, carta fotografica e carta da pacchi.

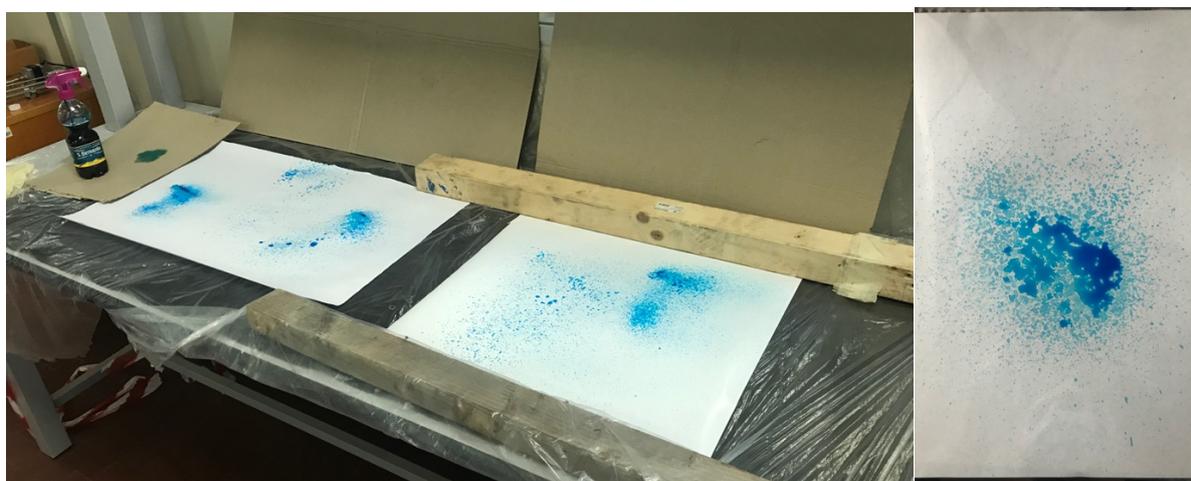


Figura 3-17 Prove colorante su diversi tipi di carta

Dopo varie prove su vari tipi di carta si è optato per la carta fotografica *IJM260 Instant Dry Photo Paper, Gloss* prodotta dalla Canon® e con grammatura pari a 190 g/m². Essa garantisce dopo l'asciugatura un risultato soddisfacente sulle prove con soluzione di colorante, infatti la carta non assorbe troppo le gocce quando queste si asciugano, questo fa sì che la loro forma non vari troppo. Si riporta nella figura 3-18 l'etichetta della carta scelta.



Figura 3-18 Etichetta carta fotografica utilizzata

Il risultato più soddisfacente per via del livello di dettaglio ottenuto è la carta fotografica, ci sono però delle controindicazioni non trascurabili, una volta effettuata la prova su carta fotografica non può essere piegata durante lo spostamento della prova, questo perché i risultati verrebbero compromessi (le gocce scivolerebbero sulla carta). Inoltre, la carta fotografica impiega qualche ora ad asciugarsi in

laboratorio per cui bisogna avere a disposizione un'apposita zona in cui lasciare che i fogli si asciugino senza intralciare il proseguimento dell'attività sperimentale.

4 PROVE A SINGOLO UGELLO

Come prima cosa si regola l'altezza della barra orizzontale su cui è alloggiato il portagetto e quindi l'ugello. Sono state scelte 3 distanze dell'ugello dalla superficie del foglio: 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m. Fissata la quota del drone, si vuole studiare il parametro altezza per studiare la dimensione e la distribuzione delle gocce di miscela fitoiatrica lungo le varie altezze della vite.

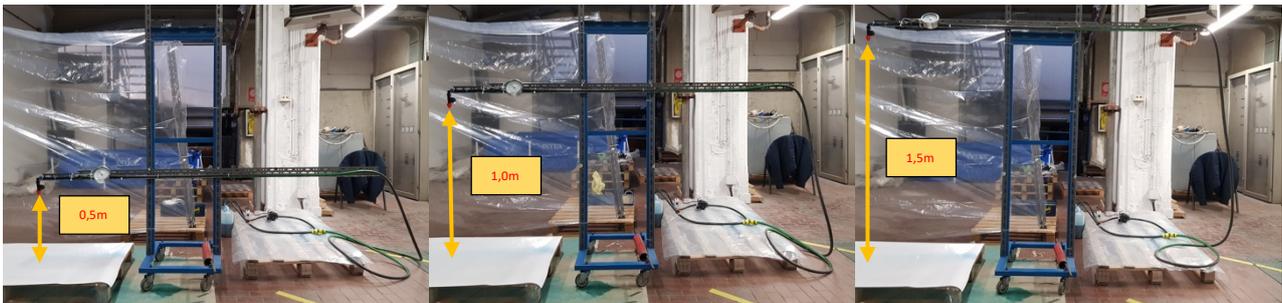


Figura 4-1 Banco prova regolato a tre altezze diverse: 0,5 m, 1 m e 1,5 m

La fase successiva consiste nello scegliere quale ugello montare tra quelli visibili nella foto 4-2, essi sono montati sul portagetto tramite la testina portaugello omologata all'ugello e usando delle apposite guarnizioni. L'attacco a baionetta del portaugello sul portagetto rende veloce l'operazione.

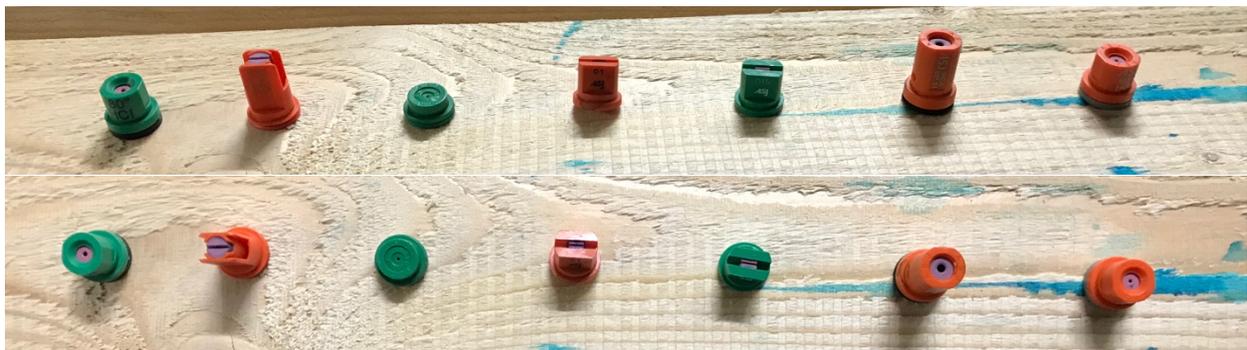


Figura 4-2 Ugelli utilizzati durante l'attività sperimentale, in ordine da sinistra verso destra ci si concentra sul secondo (AFC11001), sul quarto (LDC11001) e sul quinto (WRC110015)

In base al numero di prove che si prevede di fare giornalmente si procede a tagliare dei fogli di carta fotografica dal rotolo acquistato, le dimensioni di questi fogli non sono fisse ma scelte in base al tipo di getto che si osserva in fase di regolazione della pressione.



Figura 4-3 Rotolo di carta prima di essere tagliato

La pressione viene regolata aprendo e chiudendo un rubinetto posizionato sul ramo di bypass in base all'indicazione di pressione vista sul manometro posizionato a monte dell'ugello; per ogni ugello la pressione minima è limitata da catalogo, la pressione massima utilizzata è pari a 4 bar. Una volta scelta l'altezza dell'ugello, il tipo di ugello e la pressione si può procedere con la prova. La pressione è regolata ogniqualvolta si cambi l'ugello perché quest'ultimo influenza la pressione a monte dello stesso tramite la propria capacità di smaltire la portata in modo diverso.



Figura 4-4 Fase di regolazione della pressione

La regolazione della pressione, come visibile dalla foto 4-4, è effettuata in una bacinella lontano dall'area di prova per evitare di contaminarla. Una volta raggiunta la pressione voluta si spegne il circuito e si mette in posizione il traliccio e il foglio per effettuare la prova.

Il foglio di carta fotografica è poggiato su un pallet ricoperto di nylon in modo da poter essere movimentato nell'area destinata all'asciugatura senza rischiare di piegare il foglio e compromettere i risultati della prova.



Figura 4-5 Foglio di prova posizionato su un pallet per poter essere trasportato

Tutto in posizione, si avvia il circuito tenendo un recipiente sotto l'ugello fino a quando la pressione non raggiunge il valore di regime desiderato, a questo punto si toglie il recipiente da sotto l'ugello per una frazione di secondo al termine della quale si riposiziona il recipiente sotto l'ugello e si spegne l'ugello. Terminata la prova si sposta il traliccio per evitare che l'ugello goccioli sulla prova e che le gocce di colorante possano alterare i risultati della prova e si movimentata il pallet con sopra la prova

nell'area adibita all'asciugamento, dove la prova viene 'scaricata'. Una volta scaricato il foglio usato il pallet viene rimesso in posizione e si può procedere con la prova successiva. Nella foto 4-6 si può vedere l'area adibita all'asciugatura dei fogli.



Figura 4-6 Area del laboratorio adibita all'asciugatura dei fogli

Un'altra fase molto importante della procedura è la catalogazione, ogni foglio di carta fotografica è stato marcato in una delle estremità con un numero che fa riferimento ad una tabella di prove organizzate a priori. Sulla tabella, mostrata nella figura 4-7, sono mostrate alcune delle prove effettuate ed il modo in cui sono catalogate.

	A	B	C	D	E	F	G
1	numero prova	ugello	pressione [bar]	altezza [m]	drop dimension da catalogo [um]	tempo [s]	Portata catalogo [l/min]
43	42	HCF80015	4.0	0.5	F	-	0.69
44	43	HCF80015	4.0	0.5	F	-	0.69
45	44	HCA8001	4.0	0.5	VC	-	0.46
46	45	HCI6001	4.0	0.5	VF	-	0.46
47	46	HCI6001	4.0	0.5	VF	-	0.46
48	47	HCI6001	3.0	0.5	F	-	0.40
49	48	HCF80015	3.0	0.5	F	-	0.60
50	49	HCF80015	2.0	0.5	F	-	0.49
51	50	HCA8001	3.0	0.5	VC	-	0.40
52	51	HCI80015	3.0	1.0	F	-	0.60
53	52	AFC11001	3.0	1.0	C	-	0.40
54	53	LDC11001	3.0	1.0	F	-	0.40
55	54	WRC110015	3.0	1.0	F	-	0.60
56	55	HCF80015	3.0	1.0	F	-	0.60
57	56	HCI6001	3.0	1.0	F	-	0.40
58	57	HCI6001	4.0	1.0	VF	-	0.46
59	58	HCI80015	4.0	1.0	VF	-	0.69
60	59	HCF80015	4.0	1.0	F	-	0.69

Figura 4-7 Parte di un foglio Excel® in cui sono catalogate le prove

Dalla figura 4-7 si nota che la colonna dei tempi, in cui dovrebbe essere riportata la durata della prova, è lasciata vuota. La misura dei tempi, infatti, effettuata per una parte delle prove, ha evidenziato che il tempo misurato con un cronometro dipende in larga parte dal tempo di reazione della persona che opera il cronometro stesso e in piccola parte dal tempo effettivo della prova. Non si è quindi ritenuta

affidabile la misurazione. Nella colonna ‘*drop dimension da catalogo*’ sono invece riportate delle sigle che fanno riferimento alla norma ASABE S-572.1 visionabile in figura 4-8 e attraverso le quali si può avere un’idea del *range* di dimensioni delle gocce.

Spray Quality*	Size of Droplets	VMD Range (Microns**)	Color Code	Retention on Difficult to Wet Leaves	Used for	Drift Potential
Extremely Fine	Small	<60	Purple	Excellent	Exceptions	High
Very Fine	↓	61-105	Red	Excellent	Exceptions	↓
Fine		106-235	Orange	Very Good	Good Cover	
Medium		236-340	Yellow	Good	Most Products	
Coarse		341-403	Blue	Moderate	Systemic Herbicides	
Very Coarse		404-502	Green	Poor	Soil Herbicides	
Extremely Coarse	↓	503-665	White	Very Poor	Liquid Fertilizer	↓
Ultra Coarse		Large	>665	Black	Very Poor	

*Always read the pesticide label to determine which spray quality is required.
 **Estimated from sample reference graph in ASABE/ANSI/ASAE Standard S572.1

Figura 4-8 Norma ASABE S-572.1

Una volta asciugata la prova viene eseguita a penna sulla stessa una riga da 3 cm che servirà in fase di *processing* per scalare la foto. La prova viene quindi fotografata usando la macchinetta digitale *Fujifilm FinePix HS50EXR* del *DIMEAS* e passata al computer, dove è pronta per l’elaborazione. Si è scelto di utilizzare una macchinetta fotografica perché si è visto che non si perdono molte informazioni rispetto ad una scansione ma è molto meno gravoso, infatti i fogli hanno forme e dimensioni molto variegate che nella maggior parte dei casi non sono compatibili con la fotocopiatrice presente in laboratorio.



Figura 4-9 Acquisizione delle prove in formato digitale

A titolo di esempio si riporta in seguito l’acquisizione della prova 6. Le foto sono scattate vicino ad una sorgente luminosa, tuttavia, rispetto ad una scansione le condizioni di illuminazione del foglio non risultano molto omogenee come si può vedere dalla foto 4-10. In fase di elaborazione dell’immagine si potrebbero avere dei problemi se si decidesse di effettuare un’analisi sull’intera prova, infatti, le parti della prova meno illuminate potrebbero essere contate dal software come particelle di colorante (in fase di *threshold*, spiegato nei capitoli che seguono).



Figura 4-10 Acquisizione digitale della prova numero 6

Il problema può essere risolto dividendo l'acquisizione digitale della prova 6 in più ritagli ed effettuando lo studio su ognuno di essi. Non si riscontrerà più il problema evidenziato perché nonostante sia ancora evidente che ritagli diversi abbiano condizioni di illuminazione diverse, è anche vero che in ogni singolo ritaglio, viste le dimensioni limitate di quest'ultimo, l'illuminazione è omogenea. Nei capitoli seguenti si approfondirà la procedura scelta per l'elaborazione delle immagini.

Si decide di affrontare il problema con due diverse modalità: la prima consiste nell'esaminare 20 ritagli posizionati casualmente sulla prova e fare una media.

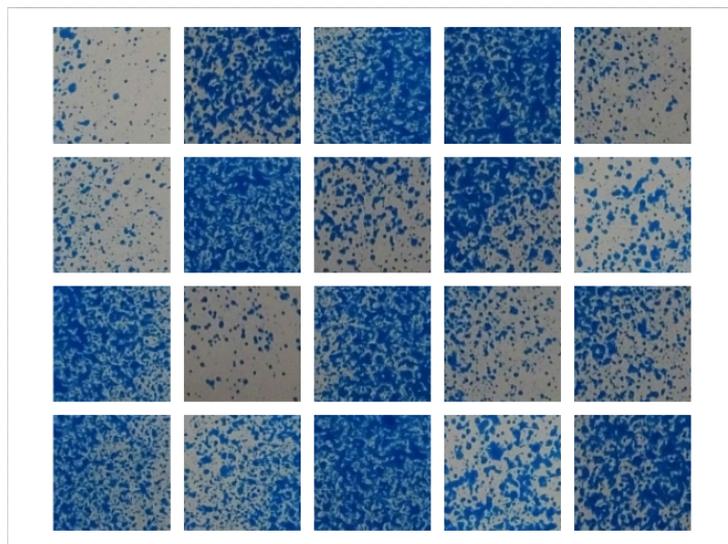


Figura 4-11 Collage dei ritagli ottenuti dalla prova 6 e da elaborare nella fase di processamento

La seconda modalità consiste nell'esaminare un pattern formato da 13 ritagli posizionati in modo ordinato e ad una posizione fissa rispetto al centro del getto, in modo da poter migliorare il confronto tra le varie prova a livello locale. Nella figura 4-12 si riporta un esempio di questa seconda modalità di selezione dei ritagli, applicata alla prova numero 82.

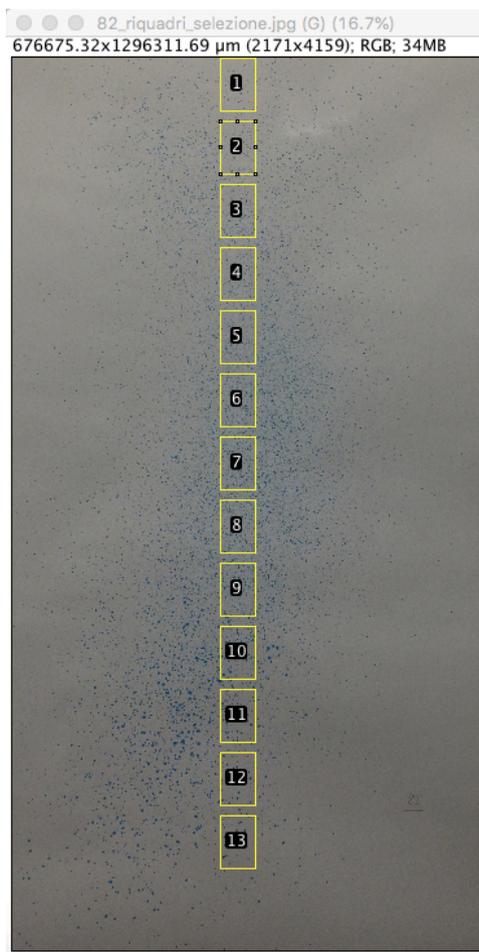


Figura 4-12 Prova 82: ritagli selezionati in modo ordinato

4.1 INTRODUZIONE ALLE IMMAGINI DIGITALI PER L'UTILIZZO DEL SOFTWARE DI IMAGE PROCESSING IMAGEJ

Salvare un'immagine in formato digitale significa salvare una matrice di punti, detti *pixels*, la cui colorazione è codificata tramite uno o più valori numerici (bit). Il termine è la contrazione di "picture element", cioè "elemento di immagine".

Nelle immagini digitali è comune utilizzare un sistema di coordinate la cui origine si trovi in alto a sinistra.

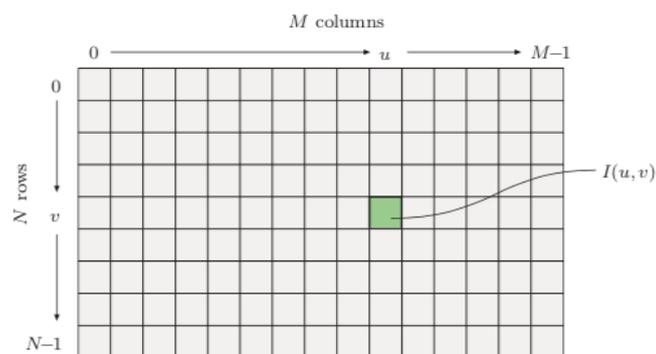


Figura 4-13 Una matrice di pixel $N \times M$ ha come ultima riga la $(N-1)$ -esima e come ultima colonna la $(M-1)$ -esima [5]

I *pixel* sono identificati da una stringa contenente k elementi binari, ovvero che possono assumere valore pari a zero o pari ad uno; per cui i *pixel* possono assumere 2^k valori. Il parametro k è chiamato 'profondità di bit' o semplicemente 'profondità' dell'immagine. Il livello esatto di *bit* di un *pixel* dipende dal tipo di immagine: nelle sezioni seguenti si lavora con immagini in scala dei grigi ed immagini a colori RGB.

Le immagini in scala dei grigi utilizzate sono immagini ad 8 bit, questo significa che la scala di sfumature dal nero al bianco è divisa in 256 ($256=2^8$) bande che vanno dalla banda numero zero che coincide con il colore nero alla banda numero 255 che coincide con il colore bianco.

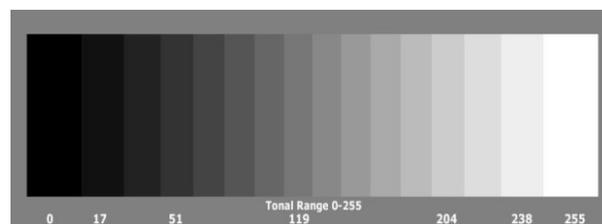


Figura 4-14 Scala dei grigi [5]

Le immagini a colori RGB hanno tre canali per ogni *pixel*, questi canali rappresentano il contributo dei colori rosso, verde e blu alla figura; essi sono detti colori primari perché a partire da questi si possono ottenere tutti gli altri colori. Per ogni colore si usano tipicamente 8 bit, per cui ognuno dei tre colori possiede 256 sfumature e ogni *pixel* utilizza 3×8 bit (24 bit). Possono anche essere riservati 8 bit alla trasparenza, per cui le immagini RGB a colori possono essere anche a 32 bit. Ci sono due

modalità diverse di ordinamento delle componenti di colore in queste immagini: *component ordering* e *packed ordering*. (5) Il primo dei due utilizza matrici separate per i tre canali di colore, come è possibile apprezzare nell'immagine 4-15.

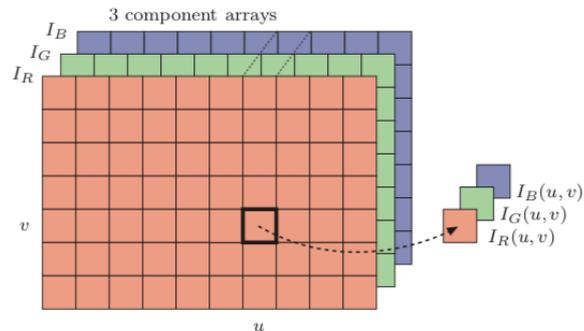


Figura 4-15 Immagine RGB in component ordering [5]

La seconda modalità di ordinamento invece riunisce in un'unica matrice i tre canali. Ogni casella (v,u) della matrice, quindi ogni *pixel* dell'immagine, è un vettore di tre elementi: la componente di rosso, quella di verde e quella di blu. (5) Questa seconda modalità di organizzazione dei dati è quella usata da ImageJ® ed è apprezzabile nella figura 4-16.

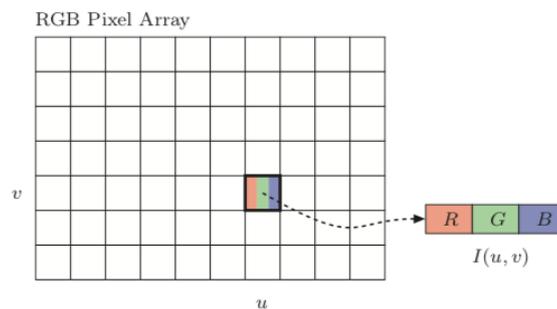


Figura 4-16 Immagine RGB in packed ordering [5]

La conversione da un'immagine a colori RGB ad un'immagine in scala dei grigi avviene calcolando il valore Y di grigio equivalente o di luminanza (intensità della luce emessa) per ogni *pixel* RGB. Si può semplicemente calcolare la media delle componenti di colore:

$$Y = \frac{R + G + B}{3}$$

Oppure utilizzare una media pesata i cui pesi derivano dalla biologia ed in particolare da come l'occhio umano percepisce i tre colori: in ordine di luminosità percepita il verde ($w_G = 0,587$), il rosso ($w_R = 0,299$) ed il blu ($w_B = 0,114$).

$$Y = w_R \cdot R + w_G \cdot G + w_B \cdot B$$

Nonostante l'opzione predefinita da ImageJ® sia la prima, si è deciso di utilizzare la media pesata anziché quella aritmetica.

Per cambiare scala, e passare da *pixel* a μm , si è tracciata su ogni foglio di prova una linea da tre centimetri. Tramite questa riga, di lunghezza nota, si può scalare la figura e lavorare con l'unità di misura desiderata.

4.1.1 ISTOGRAMMI

L'istogramma di un'immagine ad 8 bit non è altro che una rappresentazione della frequenza con cui i *pixel* assumono una delle 256 gradazioni nella scala dei grigi. E' quindi un diagramma che vede alle ascisse la scala dei grigi e alle ordinate la frequenza intesa come numero delle occorrenze. Non si può passare dagli istogrammi alle relative immagini poiché gli istogrammi non contengono nessuna informazione riguardante la posizione dei vari *pixel*, tuttavia da questi grafici è possibile ricavare informazioni importanti riguardo alla qualità dell'immagine, per questo alcune fotocamere digitali di nuova generazione riescono a generare istogrammi in tempo reale, infatti, alcune cose possono essere aggiustate in *post-processing*, altre cose invece no, e dagli istogrammi è proprio possibile capire se le immagini contengono o meno delle informazioni. (5)

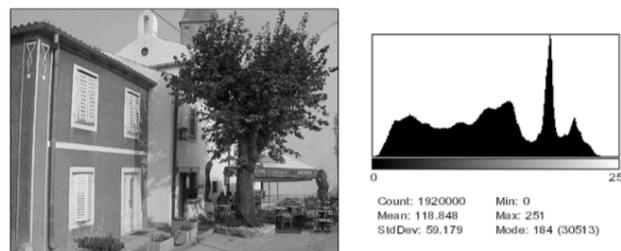


Figura 4-17 Immagine 8-bit in scala dei grigi e relativo istogramma [5]

Tra le cose che possono essere aggiustate in *post-processing* c'è il contrasto (o luminosità), ovvero la parte della scala dei grigi effettivamente sfruttata dall'immagine. Maggiore è il contrasto e più nitida è l'immagine: si vuole che l'immagine sfrutti tutta la scala dei grigi, per cui quando c'è bisogno, si prende la forma dello spettro delle frequenze sulla scala dei grigi, e la si riscalda su tutto l'asse delle ascisse dell'istogramma. (5) E' mostrato un esempio nella figura 4-18.

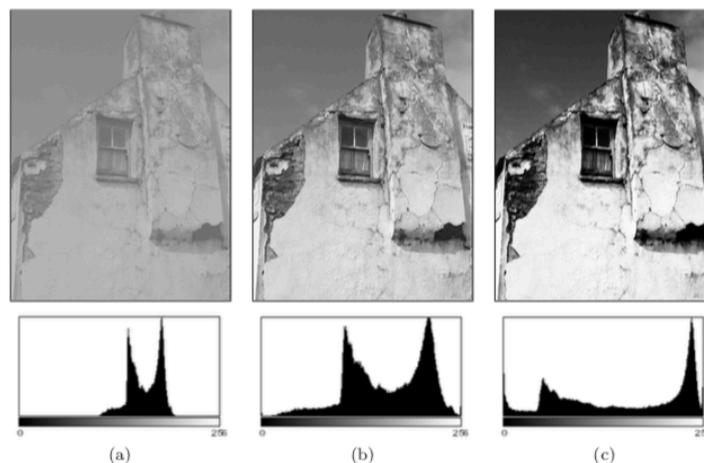


Figura 4-18 Influenza della variazione di contrasto su un istogramma: (a) contrasto basso, (b) contrasto normale, (c) contrasto alto [5]

4.2 DESCRIZIONE ALGORITMO ESEGUITO SU IMAGEJ

Raccolte e catalogate le foto delle prove effettuate, per ognuna di esse si esegue la procedura descritta in questo capitolo.

Prima di tutto si apre la foto con il software di image processing ImageJ®: guardando l'immagine 4-19, dal riquadro evidenziato in rosso in alto a sinistra, si nota come l'unità di misura della foto sia in *pixels*, per cui deve essere scalata.

Si traccia quindi, tramite il comando *straight*, un segmento sopra alla riga di tre centimetri tracciata precedentemente sulla prova; tramite il comando *set scale* si dice al software che la riga tracciata sul computer, sovrapposta alla riga tracciata a penna sulla carta fotografica, misura 30000 μm .

L'immagine risulterà a quel punto scalata e sarà possibile proseguire l'analisi con le dimensioni reali delle impronte delle gocce.

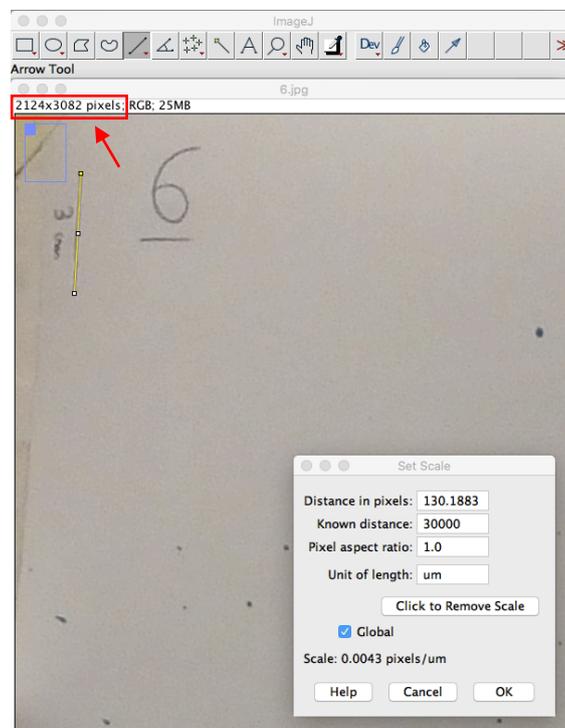


Figura 4-19 ImageJ – set scale

A questo punto si seleziona in un punto casuale della foto, in cui non vi sia assenza di gocce, un'area pari a quella delle cartine idrosensibili (52cm x 78cm); l'area selezionata è salvata come una nuova foto e aperta in una nuova finestra del software ImageJ®. Nei capitoli che seguono si identificherà l'area selezionata con la parola 'ritaglio'.

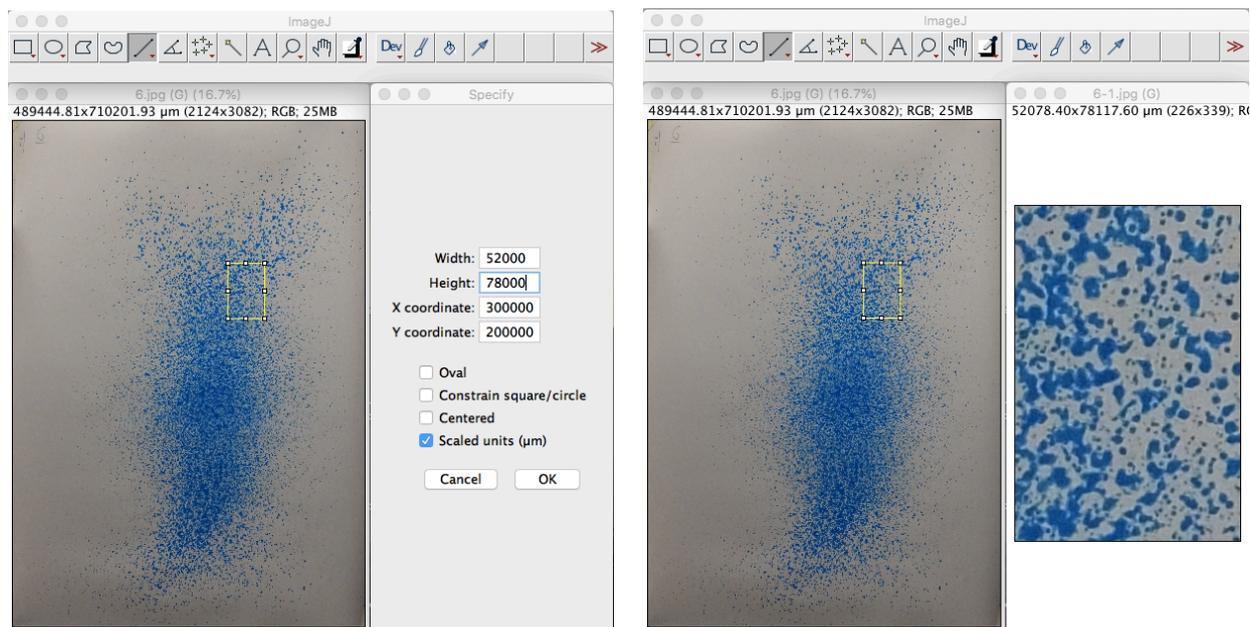


Figura 4-20 ImageJ – definizione e apertura di un ritaglio dell'immagine

Si trasforma il ritaglio da immagine RGB ad immagine 8 bit, in modo da poter effettuare le analisi manipolando solo la scala dei grigi anziché quelle del rosso, verde e blu. Come già spiegato nel capitolo precedente, il passaggio da immagine RGB ad immagine in scala dei grigi viene effettuato attraverso una media dei contributi dei vari colori, pesati in modo proporzionale a quanto appaiano luminosi all'occhio umano. Questa operazione è eseguita per manipolare un unico valore medio anziché tre valori provenienti dai diversi canali di colore e per applicare il *thresholding* di *Otsu*, che si applica ad immagini in scala di grigi.

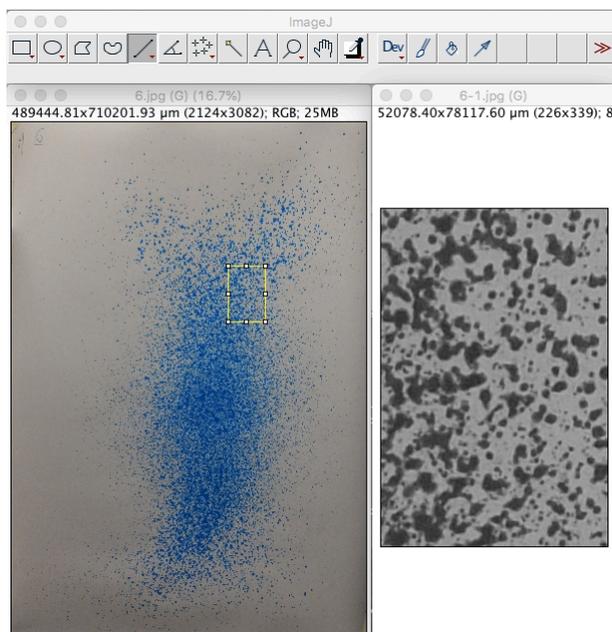


Figura 4-21 ImageJ – trasformazione dell'immagine da RGB ad immagine in scala dei grigi ad 8 bit

Si aggiusta la luminosità (o il contrasto) del ritaglio attraverso l'opzione 'Auto' offerta da ImageJ® per fare in modo che il software acuisca le differenze di colore dell'immagine.

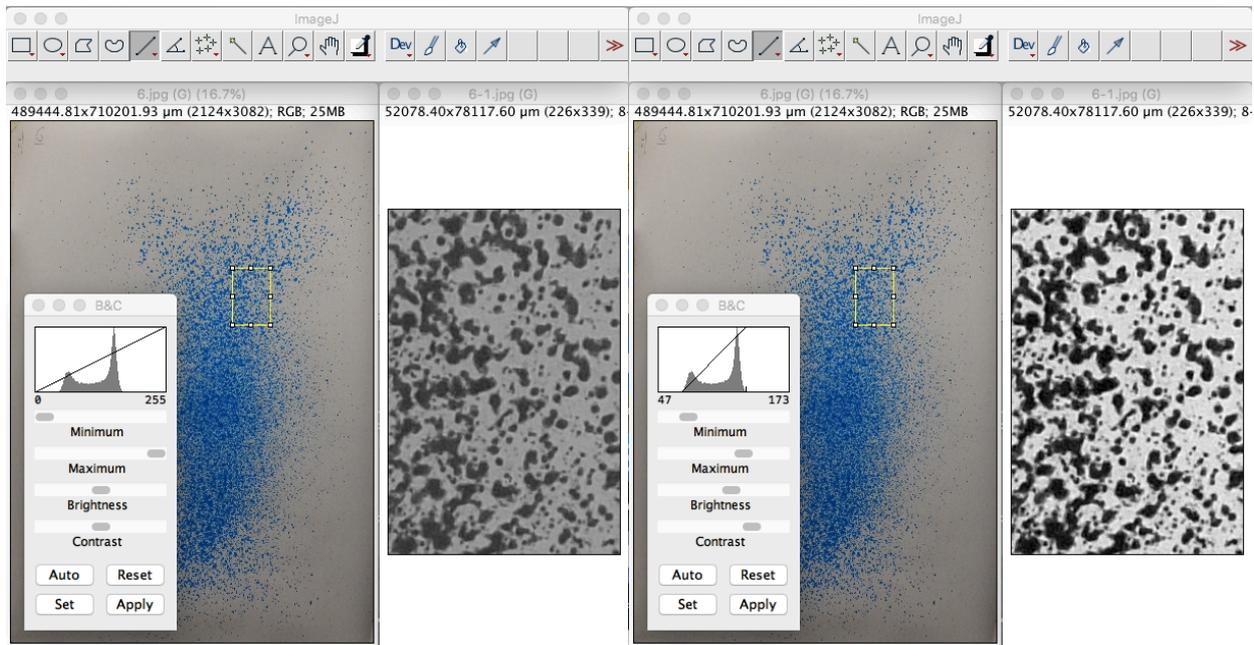


Figura 4-22 ImageJ – Regolazione automatica della luminosità

Si esegue il *'thresholding'* del ritaglio: ovvero si seleziona un valore della scala dei grigi sotto al quale tutte le bande della scala sono portate a zero (corrispondente al nero sulla scala dei grigi), i valori maggiori o uguali a quello selezionato sono invece portati a 255 (corrispondente al bianco sulla scala dei grigi). In questo modo è possibile avere un'immagine in cui c'è una netta distinzione tra soggetto della stessa, nero, e sfondo bianco.

Il *thresholding* nel caso specifico riconosce le gocce presenti sul foglio, e le mette in rilievo rispetto al foglio bianco. L'immagine è sostanzialmente diventata binaria, i *pixels* che la costituiscono possono assumere solo due valori. La soglia può essere scelta ad occhio manualmente, tuttavia, vista la necessità di automatizzare il processo, si sceglie uno dei metodi proposti da ImageJ®: il metodo di Otsu.

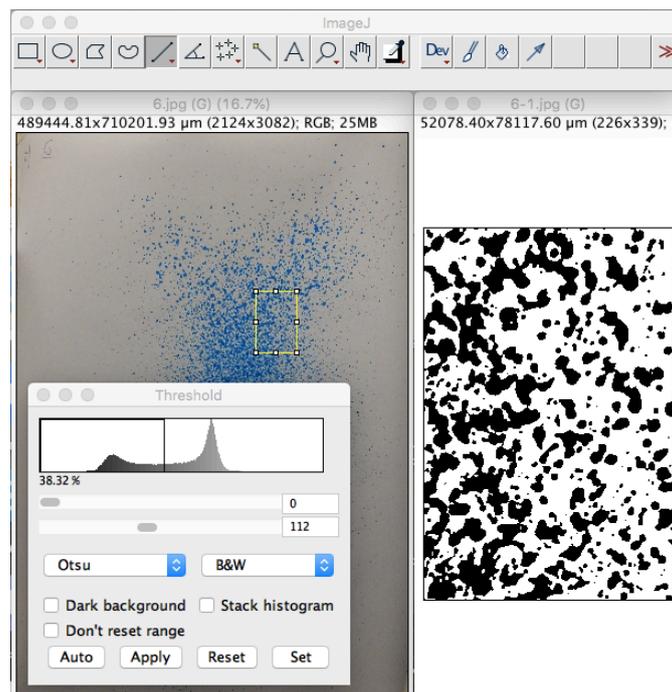


Figura 4-23 ImageJ – Thresholding

A questo punto si utilizza l’algoritmo di segmentazione ‘watershed’ implementato su ImageJ®. ‘La segmentazione watershed è un modo per dividere automaticamente particelle in contatto e quindi separare nettamente delle gocce che potrebbero essersi sovrapposte.’ (6)

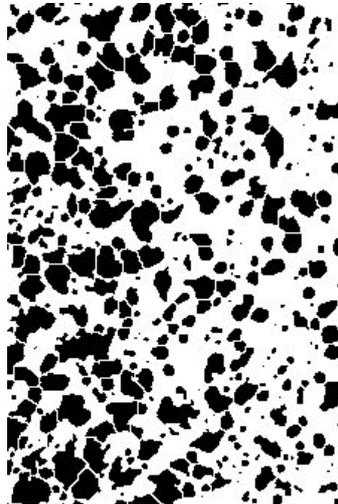


Figura 4-24 ImageJ – risultato della segmentazione watershed sul ritaglio

Si analizza il ritaglio che si vede nell’immagine 4-24, l’analisi rivela le aree delle gocce individuate; sono escluse da questa analisi le gocce che si trovano sui bordi del ritaglio e di cui non si potrebbe ottenere l’area reale.

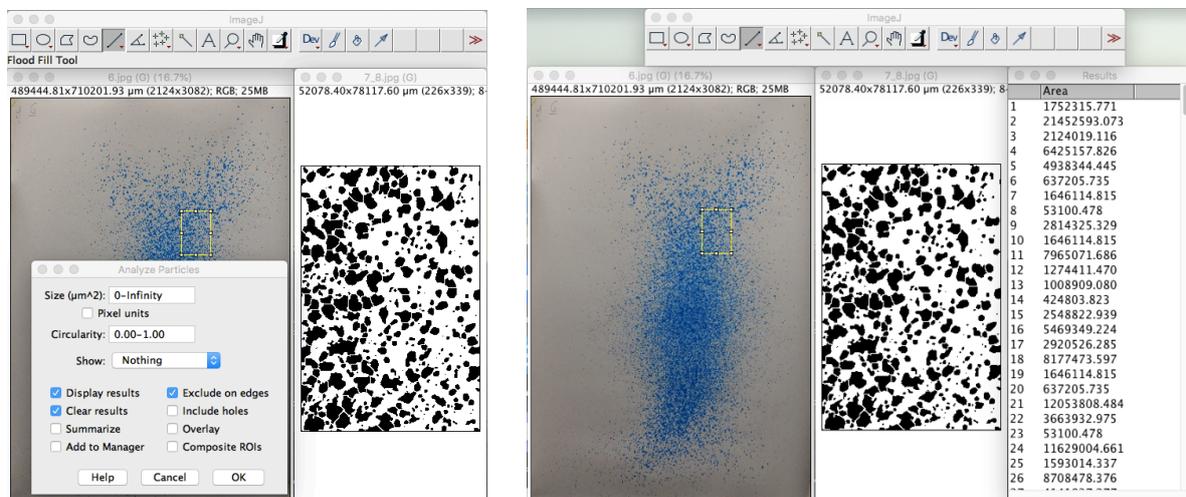


Figura 4-25 ImageJ – Analisi delle particelle

I risultati dell’analisi, che è possibile vedere nella figura 4-25, sono salvati in un file ‘.txt’ che verrà poi manipolato mediante uno script Matlab® al fine di ottenere le informazioni necessarie attraverso degli opportuni grafici.

4.3 GENERAZIONE DELLA MACRO CHE AUTOMATIZZA L'ALGORITMO ESEGUITO SU IMAGEJ

‘Una macro è un semplice programma che automatizza una serie di comandi di ImageJ®’ (6), di solito le macro sono create direttamente su ImageJ®, tuttavia, si è scelto di crearla da Matlab® per gestire l’alto numero di ritagli fatto dell’immagine di partenza e per scegliere la posizione di questi ritagli. Come anticipato in precedenza si eseguono due tipologie di analisi: la prima seleziona in modo casuale la posizione dei ritagli mediante il comando ‘*random*’ di Matlab®, la seconda invece esegue l’analisi su un pattern di ritagli posizionato in modo fisso rispetto al centro di irrorazione. In questo capitolo si descrive il primo dei due algoritmi; si sottolinea che il secondo metodo di analisi presenta solo delle lievi differenze rispetto a quello illustrato in questo capitolo.

La macro è generata dallo script Matlab® “*algoritmo_automatizzazione_Macros_ImageJ.m*”: questo codice scrive una funzione macro che, lanciata nell’ambiente ImageJ®, seleziona 20 ritagli della figura originale di area pari a quella delle cartine idrosensibili (78cm x 52cm), ne analizza il contenuto e restituisce in output un file ‘.txt’, salvato nel *folder*, che riporta l’area delle particelle di fluido individuate. Le aree selezionate hanno quindi forma rettangolare predefinita e posizionamento casuale.

Nella prima parte dello script si sceglie:

- quanti ritagli estrarre da ogni singola foto (variabile *duplicati*);
- il numero della prova da analizzare;
- la misura in pixels del tratto da tre centimetri disegnato su ogni prova (variabile *mis*);
- la grandezza dell’area da ritagliare, pari a quella delle cartine idrosensibili impiegate, scelta mediante i parametri *width_WSP* e *height_WSP*, dove WSP è la sigla di *water sensitive paper*.

```
duplicati=20; %numero di ritagli che si sceglie di fare della figura originale
numero_prova=6;
mis=130.1883; %Misura in pixel del tratto da 3 cm disegnato su ogni prova
width_WSP=52000; %Fonte: www.Salvarani.com
height_WSP=78000; %Fonte: www.Salvarani.com
```

Con la sezione di codice seguente si apre da Matlab® la foto di partenza del test, si individuano le dimensioni della foto e si crea un registro destinato a contenere le informazioni relative alle posizioni di ogni singolo ritaglio nella foto di partenza; si crea quindi un folder in cui andrà a finire il registro delle prove e il file della macro che sarà scritta in seguito: viene creato in scrittura un file di estensione ‘.ijm’ (estensione di ImageJ) su cui saranno poi sovrascritte le righe della macro.

```
I=[num2str(numero_prova),'.jpg'];
my_image =imread(I);
I = rgb2gray(my_image);
X_max_pix=size(I',1); %sembra che imageJ e matlab leggano righe e colonne al contrario
Y_max_pix=size(I',2);
R=30000/mis; % [micrometri/pixels] %30000 micrometri perchè tutte le scale disegnate sono di 3cm
X_max=R*X_max_pix;
```

```

Y_max=R*Y_max_pix;
registro_prove=zeros(duplicati,4);
registro_prove(1,4)=mis; %salvo mis per poter tornare alla scala originale

base = '/Users/giacintofrate/Desktop/processing/';
nome_prova=['prova',num2str(numero_prova)];
folder = fullfile(base,nome_prova);
[status, msg, msgID] = mkdir(folder);
if status == 0 % Never create a file/folder without catching errors
    error(msgID, msg);
end
fid = fopen([nome_prova, '.ijm'],'w+');
movefile([nome_prova, '.ijm'], folder);

%apro folder, creo file di tipo .ijm con il nome che richiama il numero
%della prova e lo apro in scrittura

```

Nel primo ciclo *for* del codice che segue si definiscono delle coordinate *random* a partire dalle quali vengono scelte le aree da analizzare, queste coordinate sono forzate in una zona centrale attraverso i limiti X_MIN , X_MAX , Y_MIN , Y_MAX scelti ad occhio prova per prova, in modo che non si ricada in zone completamente prive di droplet. I valori random di ascissa e ordinata generati, che costituiscono le coordinate del vertice alto e sinistro del rettangolo di cui si andrà ad effettuare l'analisi sono salvati nella variabile 'registro_prove'.

Inoltre, grazie allo stesso ciclo *for* viene scritta sul file '.ijm' della macro la riga 'ritaglio' per ognuno dei ritagli ricavati dalla foto originale del test. La riga 'ritaglio' fa in modo che venga salvato nel folder un ritaglio dell'immagine originale, delle dimensioni stabilite precedentemente, e posizionato casualmente come definito nelle righe precedenti.

Le righe di codice presenti tra i due cicli *for* servono ad informare ImageJ® della scelta, diversa da quella di *default*, di usare una media pesata anziché una media aritmetica per la trasformazione dell'immagine da RGB ad immagine ad 8 bit che verrà eseguita nei passaggi successivi.

Il secondo ciclo *for* invece permette, una volta salvati tutti i ritagli della foto originale, di scrivere sul file '.ijm' i comandi seguenti, riportati in ordine:

1. *apro immagine*: si apre l'immagine di area pari a quella della cartina idrosensibile salvata in precedenza;
2. *brightness*: si aggiusta la luminosità;
3. *bit*: si trasforma l'immagine in 8 bit;
4. *watershed*: si utilizza l'algoritmo *watershed* di ImageJ® per segmentare particelle che si toccano;
5. *analizza*: si genera un vettore di output contenente tutte le aree identificate;
6. *salva risultati*: i risultati vengono salvati nel *folder* identificato dal nome del test.

La sequenza di comandi appena descritta è riportata in un ciclo *for* perché ripetuta per ogni ritaglio della foto originale. Nello stesso ciclo *for* l'elenco puntato appena descritto è eseguito due volte in modi leggermente diversi, la prima volta quando si analizzano le particelle si escludono quelle ai bordi del ritaglio per non avere delle dimensioni falsate. Tuttavia, per calcolare il *coverage factor* descritto nel capitolo seguente, bisogna tener conto anche delle particelle ai bordi del ritaglio, per cui la seconda volta queste vengono considerate.

```

for iii=1:duplicati

```

```

%creare X e Y random
X_MIN= X_max*0; %minimo valore di X, escludo la parte ai bordi del foglio
X_MAX = X_max*0.75; %massimo valore di X, escludo la parte ai bordi del foglio
X_MAX = min(X_MAX, (X_max-width_WSP)*0.99); %per non prendere area ai bordi della
figura quando scelgo X_MAX = X_max * 1
x_random= (X_MAX-X_MIN).*rand(1, 1, 'double')+X_MIN;
Y_MIN= Y_max*0.3; %minimo valore di X, escludo la parte ai bordi del foglio
Y_MAX = Y_max*0.65; %massimo valore di X, escludo la parte ai bordi del foglio
Y_MAX = min(Y_MAX, (Y_max - height_WSP)*0.99); %per non prendere area ai bordi della
figura quando scelgo Y_MAX = Y_max * 1
y_random= (Y_MAX-Y_MIN).*rand(1, 1, 'double')+Y_MIN;
round(x_random,4,'significant'); %definisco il numero massimo di cifre significative
round(y_random,4,'significant'); %imageJ ha 4 cifre significative
registro_prove(iii,1)=iii; %numero prova
registro_prove(iii,2)=x_random;
registro_prove(iii,3)=y_random;
%creare testo Macro
ritaglio=['selectWindow("",num2str(numero_prova),'.jpg')\nrun("Specify...",
"width=',num2str(width_WSP),' height=',num2str(height_WSP),' x=',num2str(x_random),'
y=',num2str(y_random),' scaled");\nrun("Duplicate...", " ");\nsaveAs("Jpeg",
"/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2str(numero_prova), '/prova'
,num2str(numero_prova),'_',num2str(iii),'.jpg');\nclose();\n'];
fprintf(fid, ritaglio);
end

rgb_weighted =['run("Conversions...", "scale weighted");\n'];
fprintf(fid, rgb_weighted);

% -----
for iii=1:duplicati

apro_immagine=['open("/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2str(numero_prova
),'/prova',num2str(numero_prova),'_',num2str(iii),'.jpg');\n'];
bit=['run("8-bit");\n'];
brightness=['//run("Brightness/Contrast...");\nrun("Enhance Contrast",
"saturated=0.35");\n'];

threshold=['setAutoThreshold("Otsu");\n//run("Threshold...");\nsetOption("BlackBackground
", false);\nrun("Convert to Mask");\n'];
watershed=['run("Watershed");\n'];
analisi=['run("Analyze Particles...", "display exclude clear");\n'];

salva_risultati=['saveAs("Results",\n"/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2
str(numero_prova), '/Results',num2str(numero_prova),'_',num2str(iii),'.txt');\nclose();\n\
n'];
fprintf(fid, apro_immagine);
fprintf(fid, brightness);
fprintf(fid, bit);
fprintf(fid, threshold);
fprintf(fid, watershed);
fprintf(fid, analisi);
fprintf(fid, salva_risultati);

apro_immagine=['open("/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2str(numero_prova
),'/prova',num2str(numero_prova),'_',num2str(iii),'.jpg');\n'];
bit=['run("8-bit");\n'];
brightness=['//run("Brightness/Contrast...");\nrun("Enhance Contrast",
"saturated=0.35");\n'];

threshold=['setAutoThreshold("Otsu");\n//run("Threshold...");\nsetOption("BlackBackground
", false);\nrun("Convert to Mask");\n'];
watershed=['run("Watershed");\n'];
analisi=['run("Analyze Particles...", "display clear");\n']; %non c'è la funzione
'exclude on edges'

salva_risultati=['saveAs("Results",\n"/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2

```

```

str(numero_prova), '/Results', num2str(numero_prova), 'perCF', num2str(iii), '.txt');\nclose()
;\n\n'];
fprintf(fid, apro_immagine);
fprintf(fid, brightness);
fprintf(fid, bit);
fprintf(fid, threshold);
fprintf(fid, watershed);
fprintf(fid, analizza);
fprintf(fid, salva_risultati);

end

%chiudo file .ijm e lo salvo
fclose(fid);
save([folder, '/registro_prove_figura', num2str(numero_prova), '.mat'], 'registro_prove');

```

Lanciato lo script di Matlab®, questo genera una cartella con il nome della prova che si sta trattando. La cartella, visibile nella figura 4-26, contiene il registro, delle prove in cui vengono specificate le coordinate dei ritagli selezionati, e la macro, che esegue questi ritagli e ne analizza il contenuto.

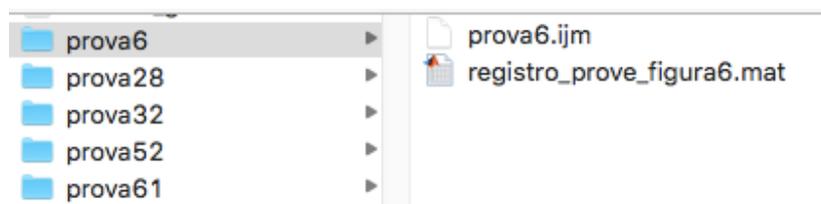


Figura 4-26 Output dello script Matlab “algoritmo_automatizzazione_Macros_ImageJ.m”, cartella della prova numero 6

Aperta la macro da ImageJ, essa appare come in figura 4-27:

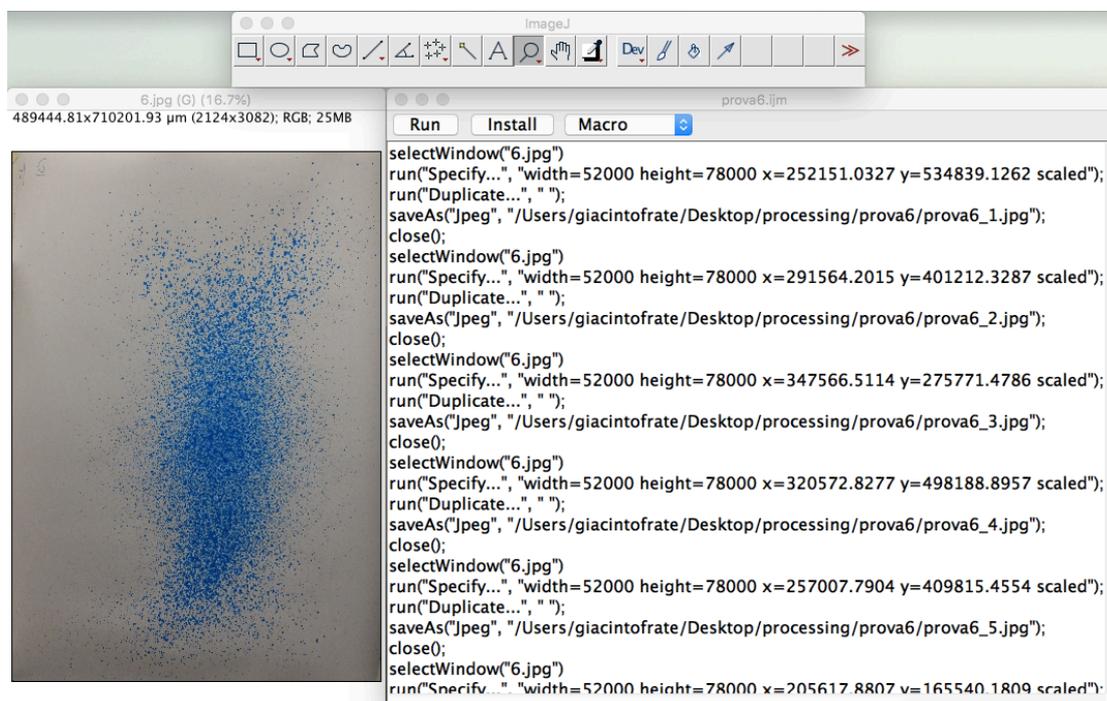


Figura 4-27 Macro aperta da ImageJ®

Premuto il tasto ‘run’ della macro, questa implementa le azioni spiegate precedentemente. Gli output ottenuti da ImageJ® sono dei file di testo contenenti le aree delle impronte delle gocce e dei file JPEG dei ritagli. Questi output sono salvati nel folder, che appare come nella figura 4-28.

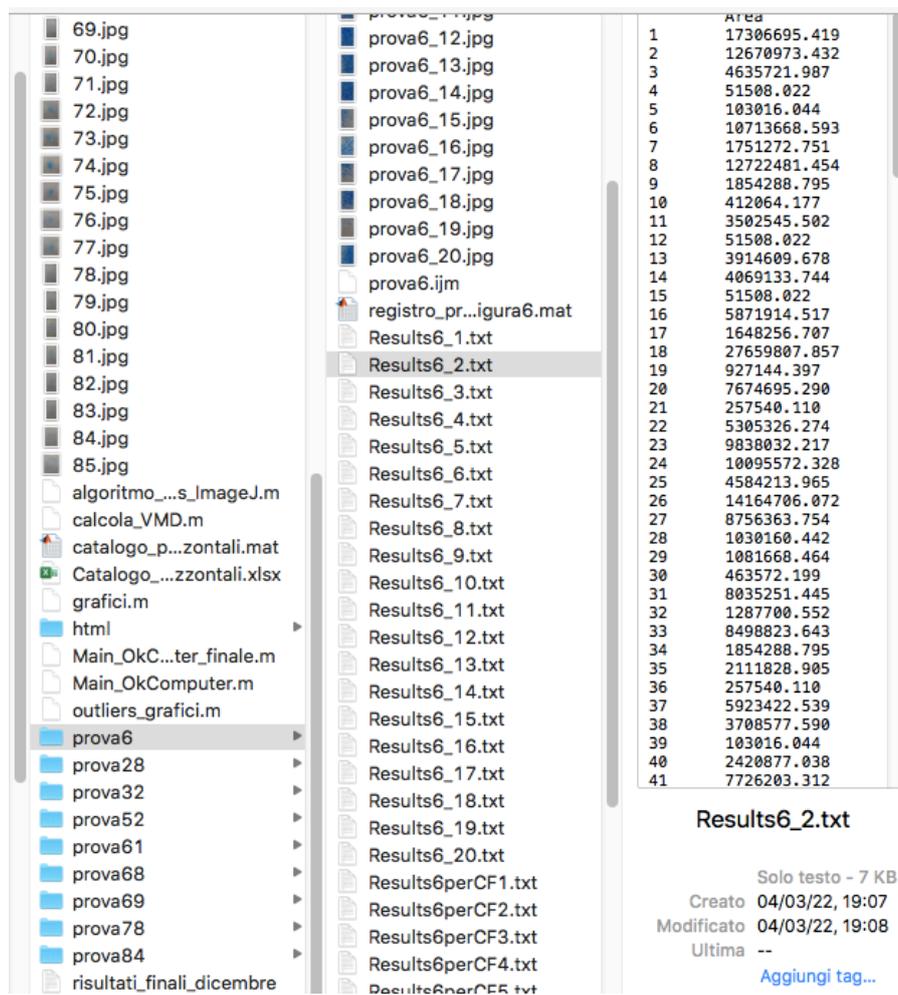


Figura 4-28 Cartella della prova numero 6 dopo aver lanciato la Macro su ImageJ®

I file di testo presenti nella cartella di ogni prova costituiscono l'input del codice 'Main_finale' di elaborazione dei dati. Come è possibile notare dall'immagine 4-28, per ogni ritaglio, ad esempio il ritaglio "prova6_2.jpg", esistono due file di testo:

- "Results6_2.txt": sono considerate le aree che non si trovano ai bordi del ritaglio;
- "Results6perCF2.txt": sono considerate tutte le aree, come necessario per il calcolo del coverage factor.

4.4 DEFINIZIONE GRANDEZZE DA CALCOLARE

Il diametro della goccia non coincide con quello dell'impronta (o macchia) lasciata sul foglio, infatti, quando si effettuano le misure, bisogna considerare le proprietà assorbenti della carta in base alle quali le impronte delle gocce risultano più o meno dilatate rispetto ad una sezione ideale della goccia stessa. Per tener conto di questo aspetto si dividono i diametri trovati dall'area dell'impronta per un fattore correttivo chiamato *spread factor*. Questo fattore è tabulato solo per le cartine idrosensibili, per cui si ipotizza che i valori dei coefficienti per la carta fotografica utilizzata siano simili. Si riporta in seguito la tabella dei valori degli *spread factor* utilizzati da *Syngenta Crop Protection*. (7)

Stain diameter of drops, in μm	Spread factor
100	1,7
200	1,8
300	1,9
400	2,0
500	2,1
600	2,1

Tabella 4-1 *Spread factor Syngenta Crop protection*

Il grafico seguente costituisce l'interpolazione lineare dei punti della tabella 4-1, da questo grafico si capisce come i pochi punti della tabella non bastino ad esaurire le possibili casistiche.

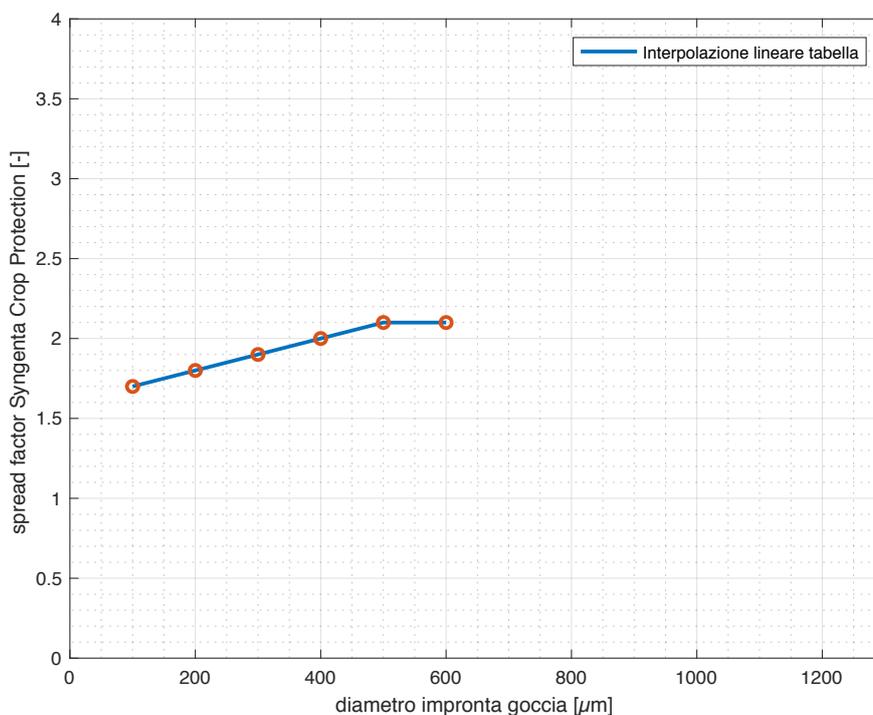


Figura 4-29 *Interpolazione lineare degli spread factor Syngenta Crop Protection*

Visto che *Syngenta Crop Protection* fornisce anche un grafico degli *spread factor* in funzione del diametro dell'impronta si decide di integrare ai valori della tabella 4-1 degli altri valori letti dal grafico, i nuovi e i vecchi valori sono letti dal grafico 4-30 e sono riportati nella tabella 4-2.

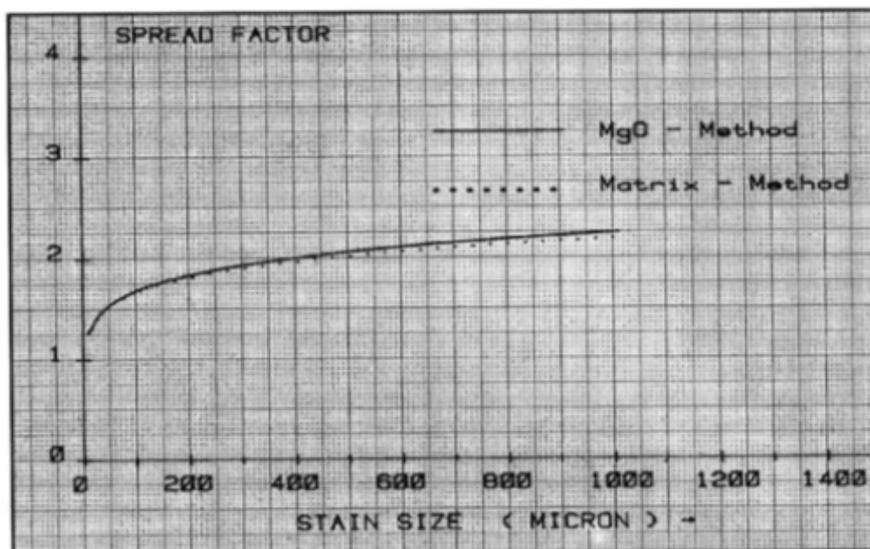


Figura 4-30 *Spread factor* in forma grafica dal catalogo *Syngenta Crop Protection* [7]

L'ascissa sul grafico 4-30 rappresenta lo *stain size*, ovvero il diametro dell'impronta, sull'asse delle ordinate invece si può leggere il coefficiente di correzione. Dal grafico è possibile individuare le coordinate di ulteriori punti che serviranno ad interpolare linearmente la curva: come si vedrà nel capitolo successivo, questo è realizzato automaticamente su uno script Matlab®. La curva messa a disposizione da *Syngenta Crop Protection* fornisce uno *spread factor* per un diametro della macchia che va fino ai 1000 μm , tuttavia, visto che la curva sembra tendere verso un asintoto posizionato ad un'ordinata pari a 2,250, si decide di imporre questo *spread factor* per tutti i diametri di macchia superiori ai 1000 μm .

Stain diameter of drops, in μm	Spread factor
10	1,250
50	1,500
100	1,700
150	1,750
200	1,800
250	1,875
300	1,900
350	1,950
400	2,000
500	2,100
600	2,100
1000	2,250
inf	2,250

Tabella 4-2 *Spread factor* *Syngenta Crop Protection* letti dal grafico

Si riporta quindi il grafico degli *spread factor* effettivamente impiegati nell'elaborazione dei dati, i punti evidenziati in rosso sono quelli della tabella 4-2. E' immediato notare che la curva è più raffinata, approssima meglio quella proposta da *Syngenta Crop Protection* e copre un range di dati maggiore.

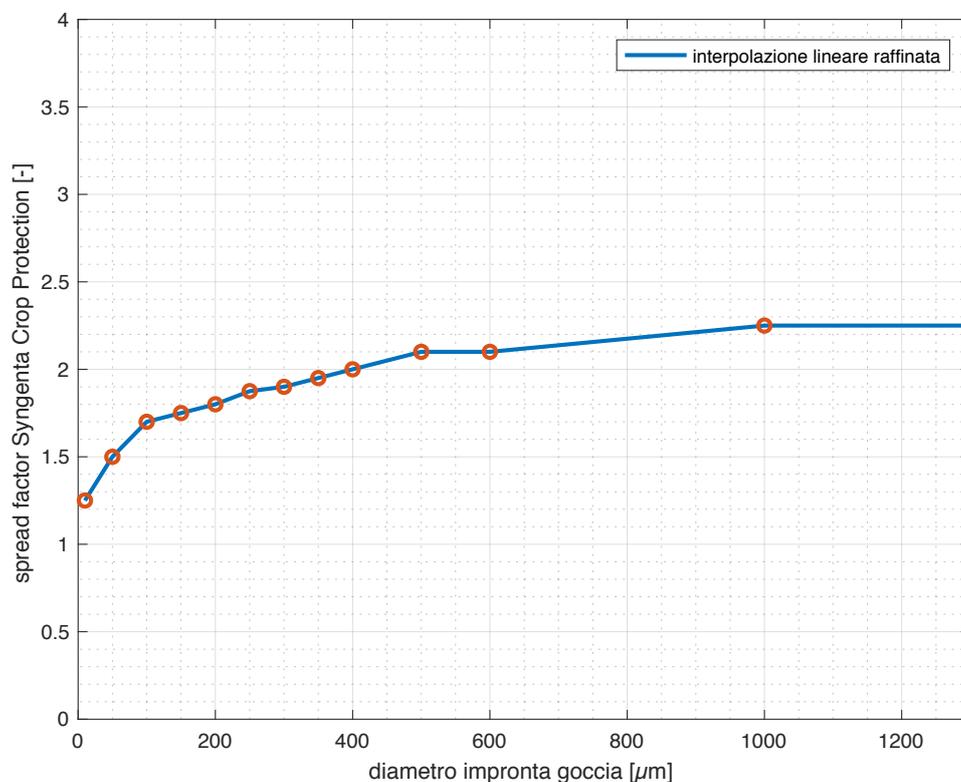


Figura 4-31 Interpolazione lineare raffinata degli *spread factor* Syngenta Crop Protection

Il grafico 4-32 evidenzia, invece, i diversi risultati che si otterrebbero al variare dei valori di umidità relativa, tuttavia, si nota che quando il diametro dell'impronta è superiore ai 600 micrometri (i valori in cui questo studio ricade) non c'è praticamente differenza, motivo per cui non si è misurata l'umidità relativa in laboratorio.

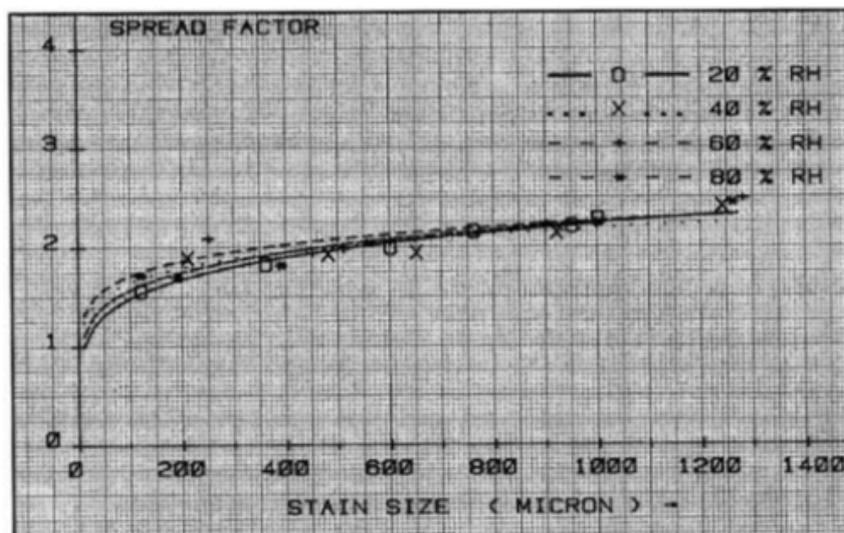


Figura 4-32 Spread factor Syngenta Crop Protection in funzione dell'umidità relativa [7]

Nella figura 4-33 è possibile apprezzare la differenza tra i diametri non corretti e quelli corretti con lo *spread factor* proposto da *Syngenta Crop Protection* per uno dei ritagli della prova 6 (ritaglio numero 15).

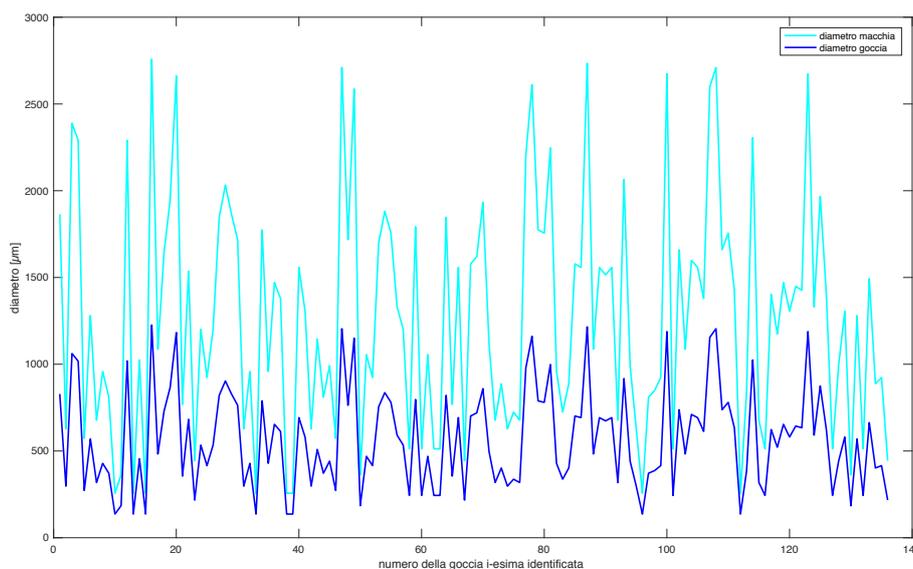


Figura 4-33 Diametro della goccia prima e dopo della correzione tramite *spread factor* Syngenta Crop Protection

Dall'immagine 4-33 si nota che il valore del diametro della macchia arriva fino ai 3000 micrometri, tuttavia, la tabella *Syngenta Crop Protection* offre delle garanzie per uno *stain diameter* che va poco oltre i 1000 micrometri. L'assunzione di *spread factor* costante e pari a 2,25 per uno *stain diameter* che tende ad infinito va verificata.

Vi è la possibilità di usare diverse tipologie di *spread factor*, in precedenza è stato illustrato quello proposto da *Syngenta Crop Protection*, tuttavia in letteratura se ne trovano di diversi, tra cui si propongono i seguenti:

- *USDA-ARS System*: $\text{Actual droplet} = (0.53549306 \times \text{stain diameter}) - (0.000084839 \times \text{stain diameter}^2)$; (8)
- *DropletScan™ System*: $\text{Actual droplet} = \text{stain diameter} / (1.6333 + 0.0009 \times \text{stain diameter})$; (8)

- *Swath Kit*TM: Actual droplet = $-4.42 + (0.583 \times \text{stain diameter}) - (0.000132 \times \text{stain diameter}^2)$; (8)
- *Hill and Inaba*: Actual droplet = $0.51 \times \text{stain diameter} + 53$; (8)

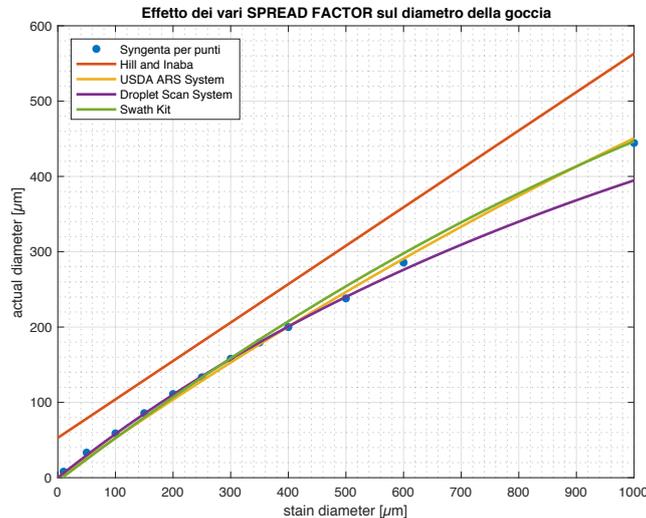


Figura 4-34 Diverse tipologie di spread factor per stain diameter minori di 1000 micrometri

Dal grafico 4-34 si nota che quasi tutta la letteratura converge sul valore degli *spread factor* fino a diametri di impronta dell'ordine dei 1000 micrometri, l'unico metodo che differisce è l'*Hill and Inaba*, che però è anche il più datato e che in quanto tale si decide di non usare.

Bisogna però capire con quale ordine di grandezza di *stain diameter* si ha a che fare, per farlo si mettono in un grafico i massimi diametri di macchia ottenuti per ogni ritaglio di ogni prova, sia per le prove esaminate con ritagli ordinati (figura 4-35 a destra) che per prove con ritagli in posizione casuale (ritagli a sinistra).

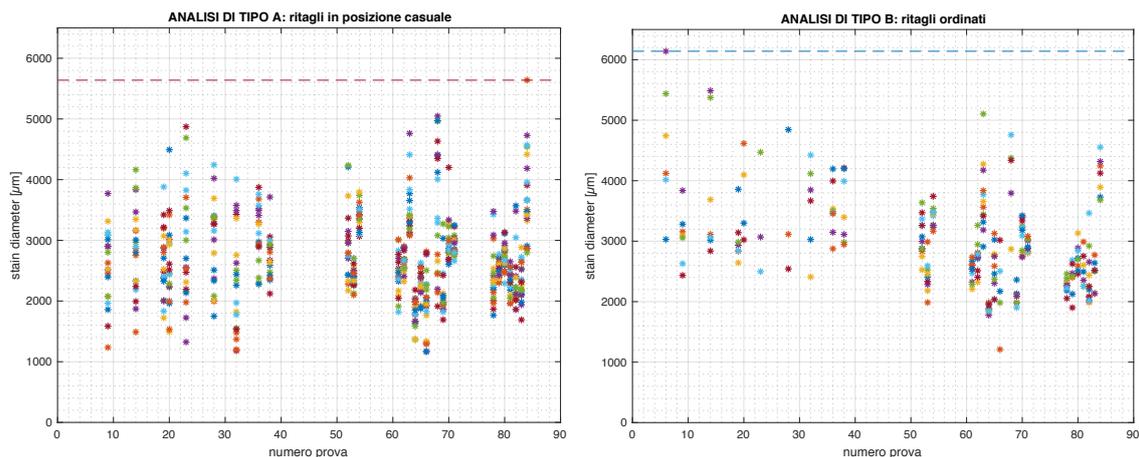


Figura 4-35 Sinistra) *stain diameter* massimo per i 20 ritagli in posizione casuale di ogni prova; Destra) *stain diameter* massimo per i ritagli di ogni prova in posizione ordinata

Dai grafici della figura 4-35 è possibile ricavare un ordine di grandezza degli *stain diameter* massimi che intervengono nell'analisi: serve uno *spread factor* che funzioni per degli *stain diameter* con valori fino ai 6200 micrometri.

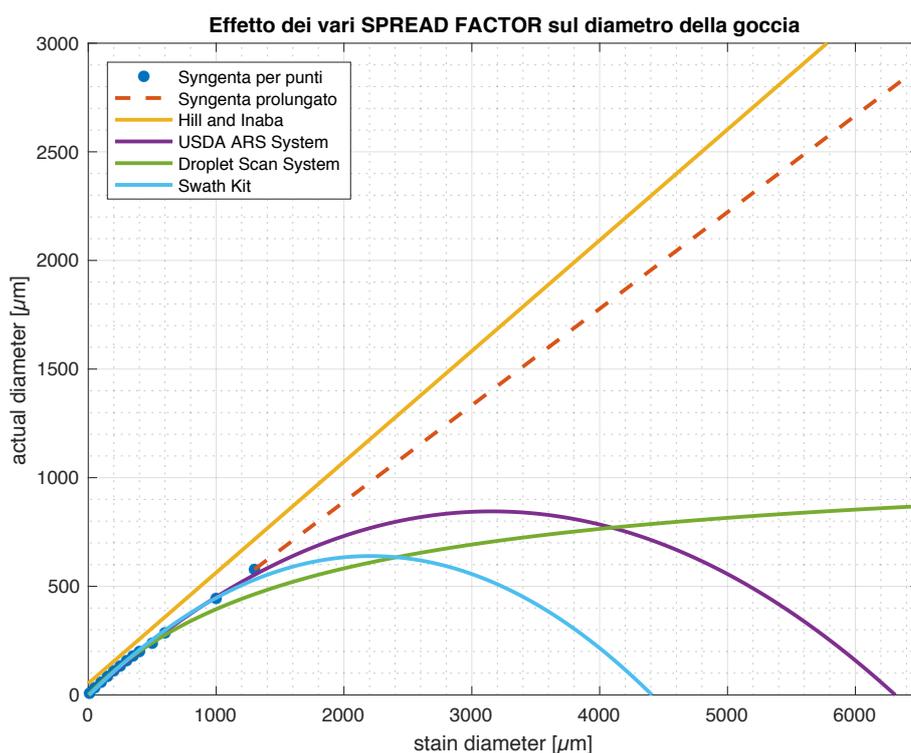


Figura 4-36 Diverse tipologie di spread factor per stain diameter fino ai 6500 micrometri

In base a quanto mostrato nella figura 4-36 è possibile fare alcune considerazioni:

- si decide di non usare lo *spread factor* proposto da *Syngenta Crop Protection* perché garantito per *stain diameter* fino a 1300 micrometri;
- non si usa lo *spread factor* proposto da *Hill and Inaba* perché datato, si è scelto tuttavia di riportarlo nella figura 4-36 perché Hill e Inaba furono le persone che si accorsero per primi dell'esigenza di utilizzare un fattore di conversione tra il diametro dell'impronta della goccia e il diametro della goccia stessa;
- non si usano i fattori sviluppati da *Swath Kit* e *USDA ARS System* perché le curve visibili in figura 4-36 mostrano un punto di massimo oltre il quale, al crescere dello *stain diameter*, i diametri delle gocce diminuirebbero anziché aumentare, e questo rappresenta un assurdo fisico.

Per quanto appena osservato si decide di scegliere come *spread factor* da utilizzare in tutte le analisi quello sviluppato da *Droplet Scan System*, la cui curva è monotona crescente e non presenta i problemi evidenziati per gli *spread factor* di *Swath Kit* e *USDA ARS System*.

Alcuni dei risultati che si desidera avere dall'elaborazione dei dati sono il *coverage factor* ed il *volumetric median diameter VMD*.

Il primo rappresenta la percentuale di area coperta dalle impronte delle gocce rispetto all'area del ritaglio di foglio considerato. Si noti che questa valutazione viene eseguita prima dell'identificazione degli *outliers*, per cui non vi sono aree escluse dal calcolo. Inoltre, le aree considerate sono quelle delle impronte e non quelle delle gocce, non vengono cioè corrette da uno *spread factor*.

Teoricamente dal diametro di ogni macchia sul foglio di carta fotografica bisognerebbe risalire a quello della goccia dividendo il diametro della macchia per lo *spread factor* di quel tipo di carta.

Dopodiché bisognerebbe moltiplicare il diametro della goccia così ottenuto per un secondo *spread factor*, diverso dal primo, proprio della foglia di vite considerata.

In sostanza il diametro di ogni macchia ottenuta dalle prove sperimentali dovrebbe essere diviso per il primo *spread factor* e moltiplicato per il secondo *spread factor*, tuttavia, come già detto precedentemente questi valori non sono tabulati, per cui si ipotizza che siano simili e si considerano per il calcolo del *coverage factor* direttamente i diametri delle macchie.

Il *volumetric median diameter* o VMD è il diametro delle gocce per cui il 50% dell'intero volume liquido consiste di gocce più piccole di quel valore.

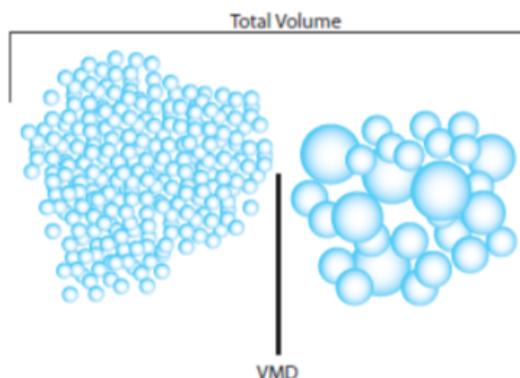


Figura 4-37 Rappresentazione grafica del VMD

Sono esclusi dal conteggio gli *outliers* determinati mediante il metodo dei quartili, gli *outliers* sono dei valori anomali rispetto al set di dati che vengono eliminati per non alterare l'analisi. Nella figura 4-38 è possibile osservare il set di dati sperimentali (ritaglio 15 della prova 6) prima e dopo l'eliminazione degli *outliers*.

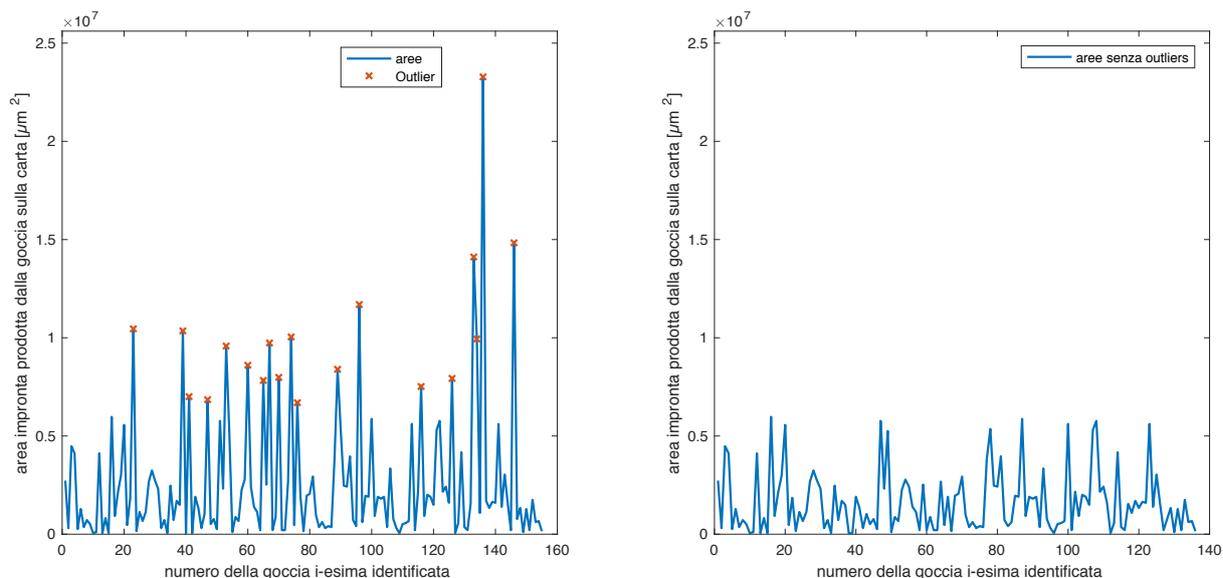


Figura 4-38 Identificazione ed eliminazione degli outliers in uno dei ritagli della prova numero 6

E' stato realizzato un apposito script Matlab® chiamato '*calcola_VMD*' per il calcolo dei valori ricercati, questo script viene richiamato all'interno del codice '*Main_finale*'.

```

%calcolo VMD
volumi_i = (pi/6)*(diametri.^3); %calcolo volume gocce
volumi_i_ordinati = sort(volumi_i); %ordino in ordine crescente di volume le particelle
volumi_cumulati = cumsum(volumi_i_ordinati); %ogni casella del vettore contiene
%la somma cumulata dei volumi delle caselle precedenti
volume_totale = volumi_cumulati(end,1)*ones(length(volumi_i),1);
vettore_errori = abs(volumi_cumulati-(volume_totale.*0.5)); %50%
[Minimo,Indice] = min(vettore_errori);
Volume_VMD= volumi_i_ordinati(Indice);
VMD = (Volume_VMD*(6/pi))^(1/3);

```

Nel codice precedente si calcolano i volumi delle gocce usando il diametro già corretto tramite lo *spread factor*; nel vettore '*volumi_i_ordinati*' si ordinano le gocce in senso crescente di volume e in un altro vettore '*volumi_cumulati*' si esegue la somma cumulata dei volumi. Dopodiché si vede quale elemento del vettore *volumi_cumulati* minimizza l'errore rispetto al 50% del volume totale (il volume totale coincide con l'ultimo elemento del vettore *volumi_cumulati*). Andando a ritroso si passa dall'elemento appena individuato del vettore *volumi_cumulati* alla goccia corrispondente a tale elemento, da questa si calcola il diametro, esso corrisponde al VMD cercato.

Le analisi su ImageJ® seguono due percorsi leggermente differenti a seconda degli obiettivi:

- nel primo si sceglie di escludere le gocce ai bordi del ritaglio, questo perché per il calcolo del VMD si considererebbero aree tagliate, quindi più piccole di quelle reali;
- nel secondo si sceglie di considerare tutte le gocce per calcolare il *coverage factor*, non considerarle approssimerebbe la percentuale di copertura per difetto.

Nella figura 4-39 le aree considerate sono evidenziate in celeste e numerate, si può notare che sono escluse le aree ai bordi del ritaglio, quindi la figura si riferisce al primo tipo di analisi. Nel secondo tipo di analisi verrebbero considerate anche quelle che sono state escluse in questa figura.

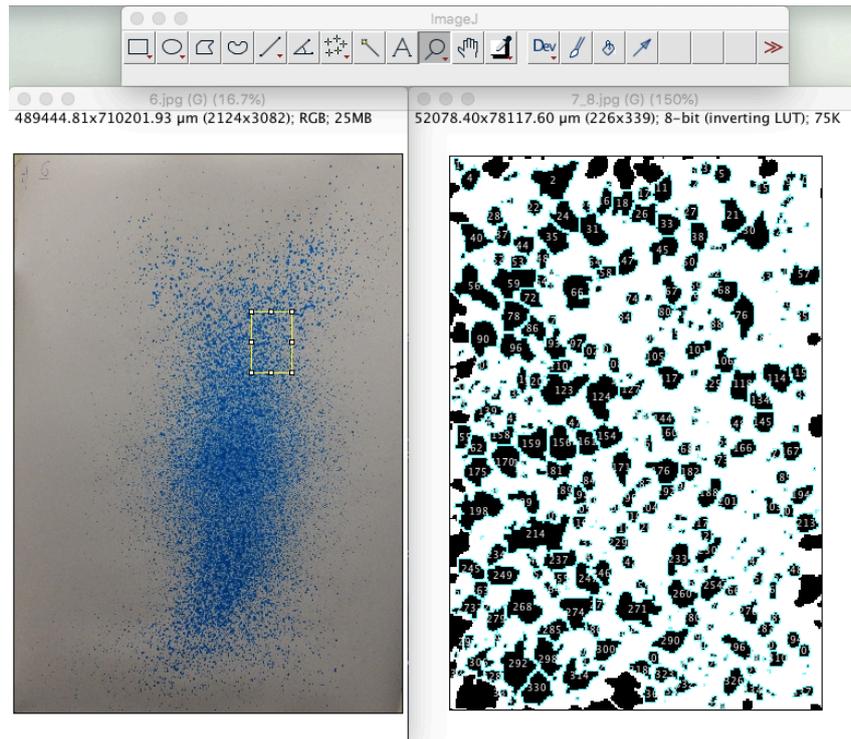


Figura 4-39 ImageJ – aree selezionate evidenziate in celeste, sono escluse in questo caso quelle ai bordi della figura

Mentre il VMD riflette la taglia della massa fluida, il fattore RS o *relative span* descrive l'uniformità della distribuzione di taglia delle gocce, è una misura della profondità dello spettro di taglia delle gocce attorno al VMD . E' calcolata come segue:

$$RS = \frac{D_{90} - D_{10}}{VMD}$$

Dove D_{90} e D_{10} sono rispettivamente i diametri per cui il 90% e il 10% del volume totale delle gocce consiste in gocce più piccole di quel valore. Più è piccolo RS e più è piccolo lo spettro della taglia delle gocce, indicando che l'uniformità della distribuzione di taglia delle gocce è migliore.

La sezione di script che segue esegue quanto appena descritto.

```
%D10
vettore_errori = abs(volumi_cumulati-(volume_totale.*0.1)); %10%
[Minimo,Indice] = min(vettore_errori);
Volume_D10= volumi_i_ordinati(Indice);
D10 = (Volume_D10*(6/pi))^(1/3);

%D90
vettore_errori = abs(volumi_cumulati-(volume_totale.*0.9)); %90%
[Minimo,Indice] = min(vettore_errori);
Volume_D90= volumi_i_ordinati(Indice);
D90 = (Volume_D90*(6/pi))^(1/3);

RS = (D90 - D10)/VMD;
NMD = median(diametri);
unit_deposit = volumi_cumulati(end,1)/area_totale_WSP;
droplet_density = length(diametri)/area_totale_WSP;
```

Nella sezione di script precedente sono calcolati altri parametri importanti da considerare:

- il *number median diameter* o NMD è il diametro per cui il 50% delle gocce sono più piccole rispetto a quel diametro, a prescindere dal volume delle particelle;
- l'*unit deposit* è il volume totale di deposito rispetto all'area analizzata (pari a quella della cartina idrosensibile);
- la *droplet density* pari al numero totale di particelle individuate rispetto all'area analizzata (pari a quella della cartina idrosensibile).

4.5 ELABORAZIONE DEI DATI PER L'ANALISI DEI RITAGLI IN POSIZIONE RANDOM

L'elaborazione dei dati sperimentali è gestita dallo *script* Matlab® “*Main_finale*” trascritto e analizzato in questo capitolo. L'obiettivo del codice è quello di ricavare, per ogni prova effettuata, alcuni dati numerici tra cui il *coverage factor* ed il *volumetric median diameter VMD* descritti nel capitolo precedente. Per ogni prova realizzata in laboratorio si sono ricavati più ritagli, come visto nei capitoli precedenti, per cui bisogna gestire in ingresso al codice più file di testo '.txt'. I valori di *coverage factor*, *VMD* e delle altre grandezze ottenute saranno calcolati come media aritmetica dei risultati dei vari ritagli usati.

Con le prime righe di codice si seleziona il numero della prova, l'altezza e la larghezza del ritaglio rettangolare ed il fattore *mis* di conversione tra *pixel* e μm .

Il codice calcola l'area del ritaglio, pari a quella delle WSP (*water sensitive paper*) utilizzate. Dopodiché, sulla base del numero della prova selezionata, seleziona la cartella contenente i file di interesse. Da questa cartella prende e numera tutti i file di testo '.txt', ognuno di essi è il risultato dell'analisi effettuata tramite ImageJ® su uno specifico ritaglio della foto originaria.

```
%algoritmo_automatizzazione_Macros_ImageJ.m
numero_prova=6;
mis=130.1883; %Misura in pixel del tratto da 3 cm disegnato su ogni prova
width_WSP=52000; %Fonte: www.Salvarani.com
height_WSP=78000; %Fonte: www.Salvarani.com

%fine parte copiata dall'altro file
area_totale_WSP=width_WSP*height_WSP; %area di una cartina idrosensibile

base = '/Users/giacintofrate/Desktop/processing/';
nome_prova=['prova', num2str(numero_prova)];
Folder = fullfile(base,nome_prova);
DirSqr = dir([Folder, filesep, 'Results', num2str(numero_prova), '_*.txt']);
Numero_totale_prove=numel(DirSqr); % =Numero_totale_prove_perCF
DirSqr_perCF = dir([Folder, filesep, 'Results', num2str(numero_prova), 'perCF*.txt']);
```

Nel ciclo *for* che segue si calcolano i *coverage factor* dei vari ritagli e si salvano nel vettore *vettoreCOVERAGE*.

```

for ii = 1 : numel(DirSqr_perCF)
    % Nome della prova (inclusa estensione)
    test_name = DirSqr_perCF(ii).name;

    % Lettura del file txt
    data = importdata([Folder,filesep,test_name]);
    data=data.data;

    counter = data(:,1); %sets x to column 1
    area = data(:,2); %sets y to column 2
    area_coperta_WSP = sum(area); %sommo tutte le aree nere
    vettoreCOVERAGE(ii,1) = area_coperta_WSP/area_totale_WSP;
end

```

Si utilizza un altro ciclo *for* per calcolare le altre grandezze di interesse. Questa operazione è fatta in un ciclo a parte perché rispetto al calcolo del *coverage factor* si escludono le particelle ai bordi e si eliminano gli errori di misura o *outliers*.

Aperto il file '.txt' dei risultati dell'analisi effettuata con ImageJ® si salvano in un vettore 'area' le aree rilevate dallo stesso software, si esegue a questo punto un'analisi di tipo statistico, ovvero si trovano gli *outliers* del vettore *area* mediante il metodo dei quartili: per farlo si utilizza la funzione *isoutlier* offerta tra le opzioni di Matlab®, si crea quindi un nuovo vettore delle aree '*areal*' che escluda i valori identificati come *outliers*. Si calcolano quindi i diametri equivalenti a partire dalle aree, questi non sono i diametri delle gocce ma delle macchie sul ritaglio di foglio, per passare al diametro delle gocce si dividono i diametri per uno *spread factor* che tiene conto delle proprietà assorbenti della carta.

Si richiama il codice "calcola_VMD" spiegato nel capitolo precedente, esso calcola a partire dai diametri corretti e privi di *outliers* i parametri: VMD, D₉₀, D₁₀, RS, NMD, unit deposit, droplet density.

```

numero_ritaglio=0; %inizializzazione contatore
for ii = 1: numel(DirSqr)

    % Nome della prova (inclusa estensione)
    test_name = DirSqr(ii).name;

    % Lettura del file txt
    data = importdata([Folder,filesep,test_name]);

    %data = readtable(data);
    data=data.data;

    counter = data(:,1); %sets x to column 1
    area = data(:,2); %sets y to column 2
    area_massima=max(area);

    %elimino gli outliers
    TF = isoutlier(area,'quartiles');
    areal=area(not(TF));

    %calcolo diametri
    diametri=sqrt(areal*4/pi);

    %passo dal diametro della macchia a quello della goccia
    i_max=size(diametri,1);

```

```

%Spread factor Droplet Scan System, Hoffmann and Hewitt, 2005:

for i=1 : i_max
    diametri(i)= diametri(i)/(1.6333 + 0.0009*diametri(i));
end

calcola_VMD; %lancio lo script calcola VMD, che mi dà "VMD", "D10","D90" e "RS"

%verifico che la VDM della prova sia contenuta nei limiti

    numero_ritaglio = numero_ritaglio + 1;
    vettoreVMD(numero_ritaglio,1)=VMD;
    vettoreRS(numero_ritaglio,1)=RS;
    vettoreD10(numero_ritaglio,1)=D10;
    vettoreD90(numero_ritaglio,1)=D90;
    vettore_NMD(numero_ritaglio,1)=NMD;
    vettore_unit_deposit(numero_ritaglio,1)=unit_deposit;
    vettore_droplet_density(numero_ritaglio,1)=droplet_density;

end

```

L'ultima sezione del codice aggiunge i risultati ottenuti ad un file di testo creato appositamente per ospitare i risultati finali.

```

% aggiorno il file dei dati
risultati_finali='risultati_finali.txt';
folder1 = '/Users/giacintofrate/Desktop/processing/';
fid1 = fopen([folder1,risultati_finali],'a+'); %con a+ non cancello ciò che c'è già
scritto sul file
fprintf(fid1,['\n',num2str(numero_prova),'          ',num2str(mean(vettoreVMD)), ...
            '          ',num2str(mean(vettoreCOVERAGE)), '          ',num2str(mean(vettoreRS)), '
            ', ...
            num2str(mean(vettore_NMD)), '          ',num2str(mean(vettore_unit_deposit)), ...
            '          ',num2str(mean(vettore_droplet_density))]);
fclose(fid1);

```

Si crea inoltre una finestra di riepilogo per ogni prova in cui si salvano su un file '.txt' tutti i vettori contenenti i risultati intermedi dei vari ritagli e per ogni vettore il valore medio e la deviazione standard.

```

riepilogo_prova=['riepilogo_prova_', num2str(numero_prova),'.txt'];
folder2 = ['/Users/giacintofrate/Desktop/processing/prova',num2str(numero_prova)];
fid2 = fopen([folder2,filesep,riepilogo_prova],'a+'); %con a+ non cancello ciò che c'è
già scritto sul file
fprintf(fid2,['\n', 'VMD','          ', 'D10','          ', 'D90'...
            ', '          ', 'Coverage', '          ', 'RS',...
            ', '          ', 'NMD', '          ', 'unit deposit',...
            '          ', 'droplet density']);%titoli tabelle

for i= 1:numero_ritaglio
    fprintf(fid2,['\n', num2str(vettoreVMD(i,1)), '          ',num2str(vettoreD10(i,1)),
    ...
            '          ',num2str(vettoreD90(i,1)), '          ',num2str(vettoreCOVERAGE(i,1)),
    ...

```

```

        ', num2str(vettoreRS(i,1)), '          ', num2str(vettore_NMD(i,1)), ...
        ', num2str(vettore_unit_deposit(i,1)), '
    ', num2str(vettore_droplet_density(i,1))] );
end

fprintf(fid2, ['\n', 'VMD medio:', num2str(mean(vettoreVMD)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettoreVMD))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'D10 medio:', num2str(mean(vettoreD10)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettoreD10))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'D90 medio:', num2str(mean(vettoreD90)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettoreD90))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'coverage medio:', num2str(mean(vettoreCOVERAGE)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettoreCOVERAGE))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'RS medio:', num2str(mean(vettoreRS)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettoreRS))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'NMD medio:', num2str(mean(vettore_NMD)), '          Dev.Standard:
', num2str(std(vettore_NMD))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'unit deposit medio:', num2str(mean(vettore_unit_deposit)), '
Dev.Standard: ', num2str(std(vettore_unit_deposit))]);
fprintf(fid2, ['\n', 'droplet density medio:', num2str(mean(vettore_droplet_density)), '
Dev.Standard: ', num2str(std(vettore_droplet_density))]);

fclose(fid2);

```

Nella figura 4-40 si riporta il riepilogo della prova numero 6 appena generato mediante la sezione di script precedente e che mostra i risultati intermedi ottenuti per i vari ritagli della prova, a partire dai quali si calcolano media e deviazione standard.

VMD	D10	D90	Coverage	RS	NMD	unit deposit	droplet density
[µm]	[µm]	[µm]	[-]	[-]	[µm]	[µL cm ⁻²]	[droplets cm ⁻²]
670.1661	470.0539	769.5885	0.48738	0.44696	518.6928	7.0758	7.5444e-08
582.7041	423.1593	722.8031	0.38359	0.51423	488.8796	4.6636	6.5582e-08
387.3194	302.0604	429.899	0.0077592	0.33006	342.8357	0.10182	4.4379e-09
591.3404	429.899	696.7591	0.36576	0.45128	495.3415	5.3191	7.4951e-08
720.6836	573.143	815.7324	0.65203	0.33665	652.9546	9.0562	6.6075e-08
659.3832	474.9921	761.8769	0.5236	0.43508	543.3717	7.5544	8.0868e-08
544.9813	383.9437	661.8633	0.1224	0.50996	442.525	1.8223	3.3531e-08
371.4446	285.4092	442.525	0.0059813	0.42299	342.8357	0.095667	4.1913e-09
559.7829	383.9437	618.214	0.015404	0.4185	492.6587	0.34769	5.4241e-09
407.4018	266.5064	464.9439	0.0098038	0.48708	285.4092	0.28586	1.4793e-08
636.5212	442.525	738.3332	0.39945	0.46473	479.7694	5.9501	7.6183e-08
374.6871	285.4092	442.525	0.015772	0.41933	316.9666	0.40742	2.2682e-08
459.5201	354.2343	523.9924	0.018198	0.36942	400.8885	0.3671	9.6154e-09
574.7332	374.6871	663.0847	0.027126	0.50179	404.7884	0.73381	1.3807e-08
454.1593	330.4752	549.2811	0.10831	0.48178	364.814	2.3665	7.7909e-08
563.043	408.6882	654.2674	0.17505	0.43616	448.4564	3.8747	6.5582e-08
442.525	316.9666	534.0137	0.033475	0.49047	354.2343	0.95143	3.3777e-08
573.143	400.8885	692.0916	0.41335	0.50808	445.4907	6.2999	1.0602e-07
586.7036	392.6572	683.1877	0.086736	0.49519	439.4356	1.7655	2.003e-08
573.143	392.6572	675.7654	0.23245	0.49396	436.3462	3.7968	6.7801e-08
VMD medio [µm]:536.6653				Dev.Standard [µm]: 103.5878			
D10 medio [µm]:384.615				Dev.Standard [µm]: 75.3422			
D90 medio [µm]:627.0374				Dev.Standard [µm]: 119.6845			
coverage medio [-]:0.20418				Dev.Standard [-]: 0.20978			
RS medio [-]:0.45069				Dev.Standard [-]: 0.055629			
NMD medio [µm]:434.8347				Dev.Standard [µm]: 87.4547			
unit deposit medio [µL cm ⁻²]:3.1418				Dev.Standard [µL cm ⁻²]: 2.9047			
droplet density medio [droplets cm ⁻²]:4.6388e-08				Dev.Standard [droplets cm ⁻²]: 3.2187e-08			

Figura 4-40 Riepilogo dei risultati dei ritagli della prova 6

4.5.1 ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO AFC11001

L'ugello a ventaglio AFC11001 è stato provato per le varie combinazioni di pressione e altezza evidenziate in tabella 4-3. Come già detto in precedenza ogni prova è catalogata da un numero, riportato nella seconda colonna della tabella stessa, che permette di collegare in modo inequivocabile la prova fisica all'immagine digitale e ai file di risultati.

ugello	numero prova	pressione [bar]	altezza [m]
AFC11001	6	3.0	0.5
	28	1.5	0.5
	32	4.0	0.5
	52	3.0	1.0
	61	4.0	1.0
	68	1.5	1.0
	69	4.0	1.5
	78	3.0	1.5
	84	1.5	1.5

Tabella 4-3 Prove ugello AFC11001

Le prove appena definite, producono i seguenti risultati medi:

PROVA	VMD [µm]	COVERAGE [-]	RS [-]	NMD [µm]	unit deposit [µL cm ⁻²]	droplet density [droplets cm ⁻²]
6	536.6653	0.20418	0.45069	434.8347	3.1418	4.6388e-08
28	550.7418	0.17484	0.55073	363.4995	1.7167	3.6058e-08
32	489.5226	0.25908	0.51951	365.8969	4.8947	1.2592e-07
52	560.7904	0.060055	0.41783	481.7708	1.3731	2.2461e-08
61	519.6385	0.11892	0.48277	406.2216	2.5366	5.4524e-08
68	608.9354	0.10261	0.44457	488.9196	1.5948	3.2606e-08
69	479.435	0.089059	0.42909	414.6064	2.1657	4.7424e-08
78	528.0023	0.045142	0.42122	443.6272	0.8738	1.7184e-08
84	615.7585	0.082782	0.45702	496.6717	1.0367	1.3067e-08

Figura 4-41 Risultati delle prove sull'ugello AFC11001

Come detto in precedenza i risultati dell'immagine 4-41 sono ottenuti dalla media dei risultati ottenuti su 20 ritagli della prova originaria, questi risultati intermedi sono consultabili dai file di riepilogo presenti nelle cartelle delle relative prove, di cui si è riportato un esempio alla fine del capitolo precedente.

Nell'immagine 4-42 si riportano dei grafici utili alla lettura dei risultati della figura 4-41, in particolare sono diagrammate le grandezze: VMD, NMD, RS, *coverage factor*. E' una matrice di figure in cui le prime due righe mostrano le varie grandezze in funzione dell'altezza dell'ugello e a pressione fissa mentre le ultime due righe mostrano le grandezze in funzione della pressione e ad altezza dell'ugello fissata. Le grandezze fissate nominate nelle righe precedenti aumentano il loro valore passando dalle prime alle ultime colonne nella matrice di figure.

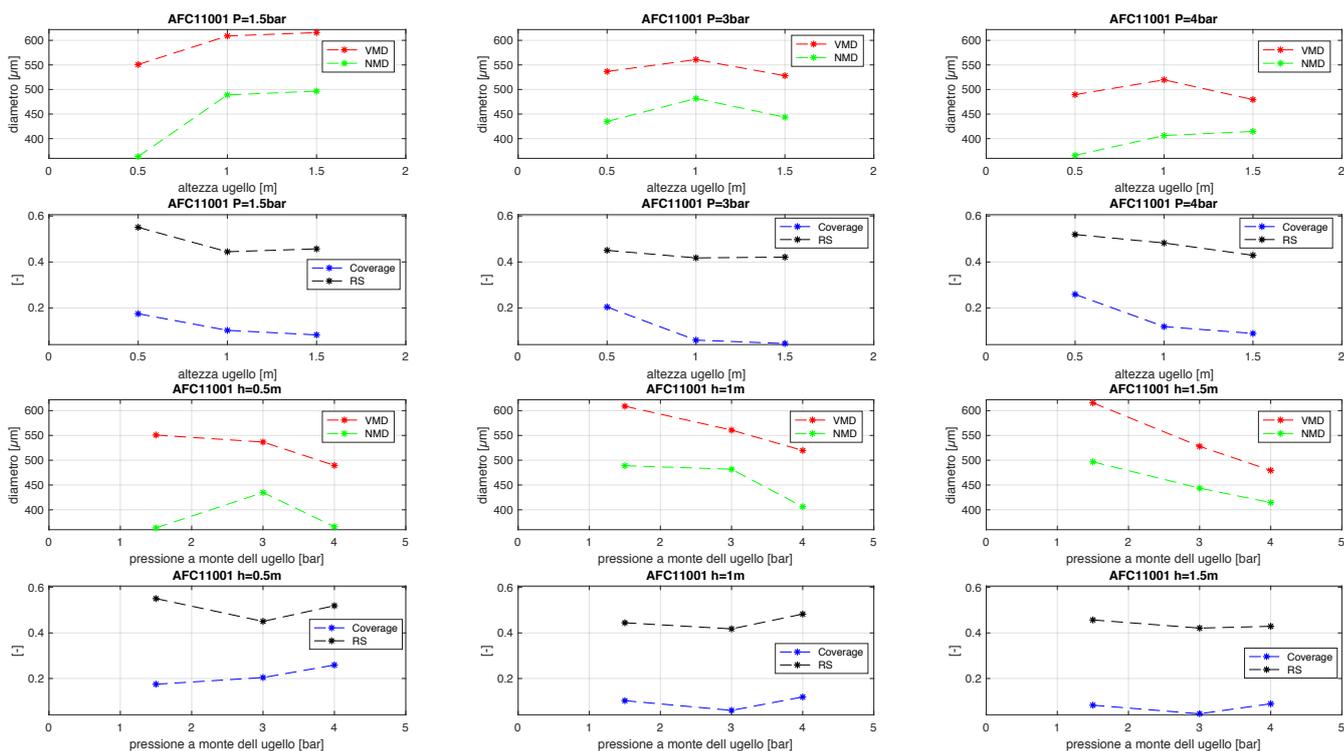


Figura 4-42 VMD, NMD, coverage factor e RS in funzione di pressione e temperatura

Il fattore RS o *relative span* rimane abbastanza costante tra 0,4 e 0,6: questo significa che la distribuzione delle gocce è abbastanza costante nell'arco di tutto lo studio, sebbene non del tutto. Come ci si aspettava, la dimensione delle gocce (NMD e VMD) scende all'aumentare della pressione mentre il *coverage factor* rimane abbastanza costante. All'aumentare dell'altezza dell'ugello invece si nota un andamento leggermente decrescente del *coverage factor* e abbastanza costante per VMD e NMD.

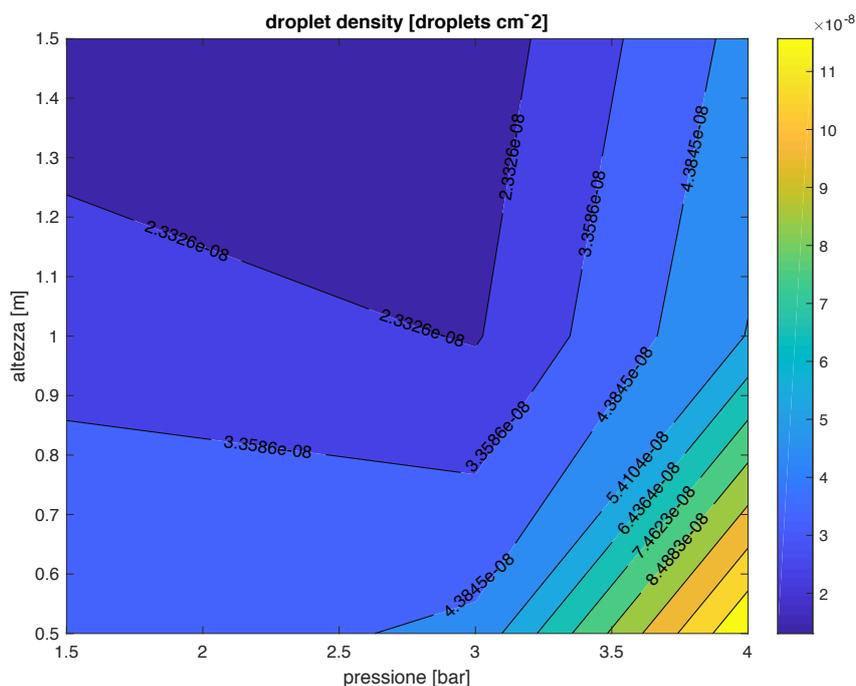


Figura 4-43 Droplet density delle prove dell'ugello AFC11001

Il fattore di *droplet density* dà un'indicazione sulla quantità di gocce presenti in una certa area, dalla figura 4-43 si vede come raggiunga i propri valori massimi alle pressioni più alte (4 bar) e alle altezze più basse (0,5 m).

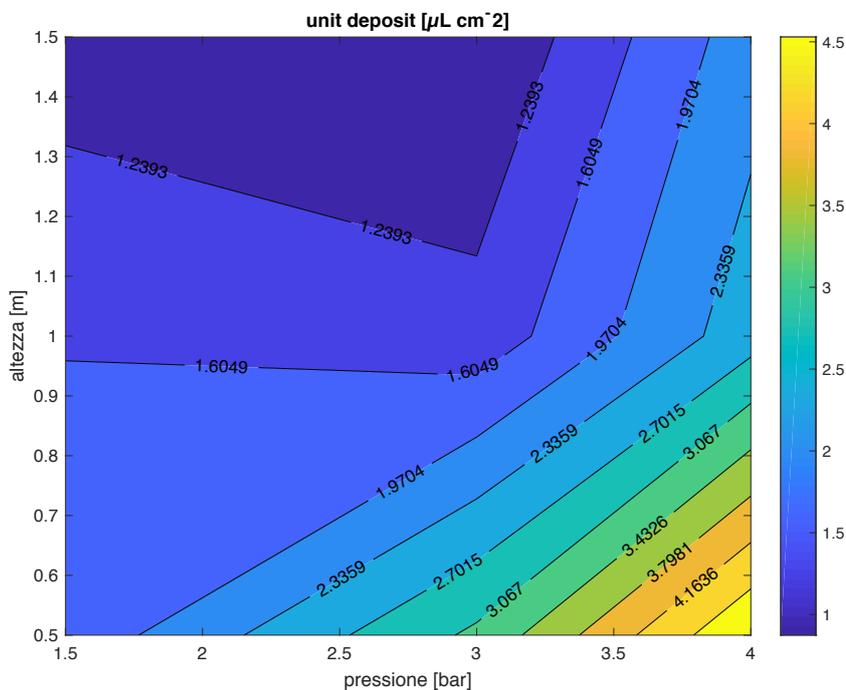


Figura 4-44 Unit deposit prove dell'ugello AFC11001

Il parametro *unit deposit* misura la quantità di liquido calcolata in una certa area, questo parametro non può che andare di pari passo con il *coverage factor* perché il volume di liquido depositato è calcolato a partire dall'area delle macchie presenti in una determinata area e che quindi definiscono il coverage. Come per la *droplet density* raggiunge i propri valori massimi alle pressioni più alte (4 bar) e alle altezze più basse (0,5 m).

4.5.2 ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO LDC 110 01

L'ugello a ventaglio LDC11001 è provato per diversi set di pressioni ed altezze, presentate nella tabella 4-4 insieme al numero che identifica la prova.

ugello	numero prova	pressione [bar]	altezza [m]
LDC11001	9	3.0	0.5
	23	1.0	0.5
	36	4.0	0.5
	53	3.0	1.0
	62	4.0	1.0
	66	1.0	1.0
	71	4.0	1.5
	79	3.0	1.5
83	1.0	1.5	

Tabella 4-4 Prove ugello LDC11001

Le prove svolte producono i risultati che seguono.

PROVA	VMD [μm]	COVERAGE [-]	RS [-]	NMD [μm]	unit deposit [$\mu\text{L cm}^{-2}$]	droplet density [droplets cm^{-2}]
23	545.0126	0.3134	0.49907	404.6209	4.8049	9.2024e-08
9	524.0163	0.38869	0.46303	411.8127	8.7425	1.9041e-07
36	578.7122	0.39919	0.43392	464.976	7.9212	1.2968e-07
53	517.9759	0.27976	0.46441	404.7305	6.9085	1.6268e-07
79	528.5687	0.32379	0.46385	404.6751	7.6605	1.738e-07
66	453.4784	0.14209	0.59933	267.7816	1.8033	7.3841e-08
83	505.7921	0.076541	0.46953	403.8211	1.7116	4.1494e-08
62	541.5054	0.32434	0.46847	413.7518	7.1457	1.4946e-07
71	565.7415	0.32325	0.42834	464.0735	7.6945	1.3143e-07

Figura 4-45 Risultati delle prove sull'ugello LDC11001

Come per i risultati dell'ugello AFC11001 anche i risultati dell'immagine 4-45 sono ottenuti dalla media dei risultati ottenuti su 20 ritagli della prova originaria.

Nell'immagine 4-46 si riportano i grafici di VMD, NMD, RS, *coverage factor*. Anche in questo caso il fattore RS o *relative span* rimane abbastanza piatto tra 0,4 e 0,6 confermando l'uniformità della distribuzione delle gocce nell'arco di tutto lo studio, seppur non ottimale. Aumentando la pressione ci si aspetterebbe di avere delle dimensioni delle gocce minori, eppure, dai grafici seguenti si riscontra una tendenza generale a crescere. Al crescere della pressione aumenta anche il *coverage factor*.

La dimensione VMD delle gocce sembra invece rimanere abbastanza costante al variare dell'altezza dell'ugello, così come per il *coverage factor*.

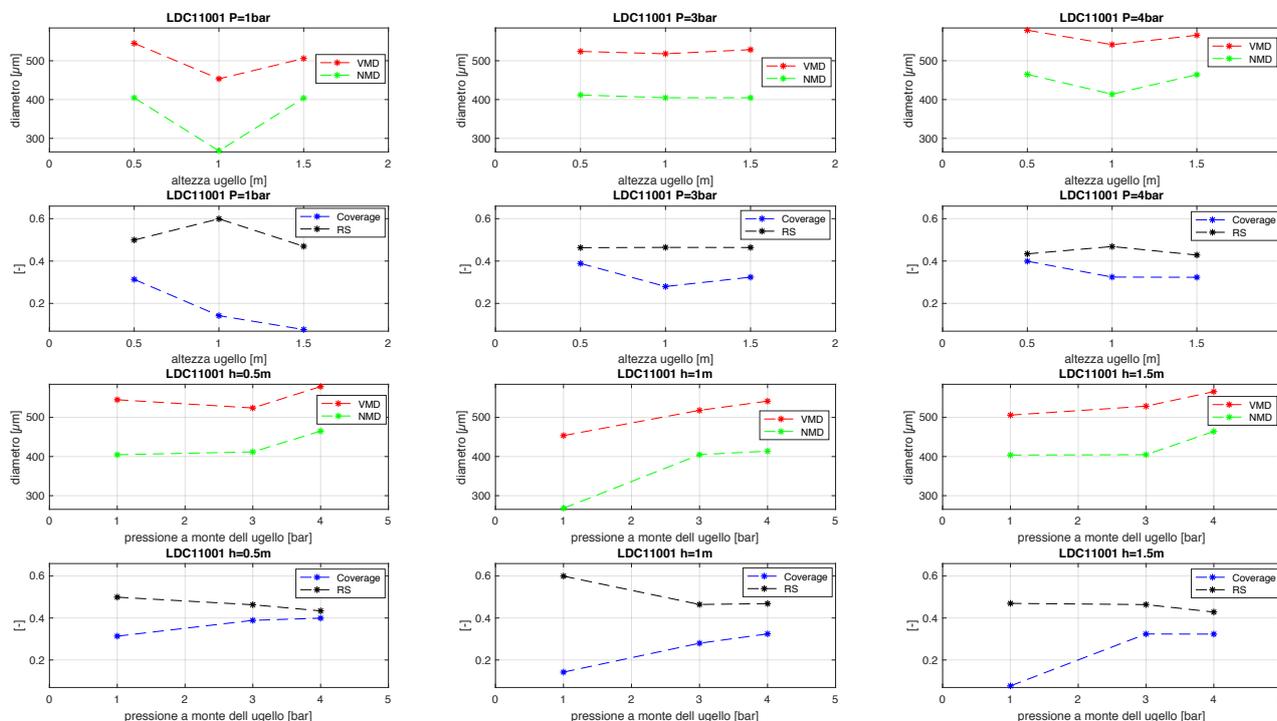


Figura 4-46 VMD, NMD, coverage factor e RS in funzione di pressione e temperatura

Nell'immagine 4-47 si riporta la *droplet density* delle varie prove riguardanti l'ugello LDC11001. I valori sembrano dipendere quasi esclusivamente dalla pressione, non variano molto invece al variare dell'altezza. Si osservano valori massimi di *droplet density* ad una pressione di 3 bar.

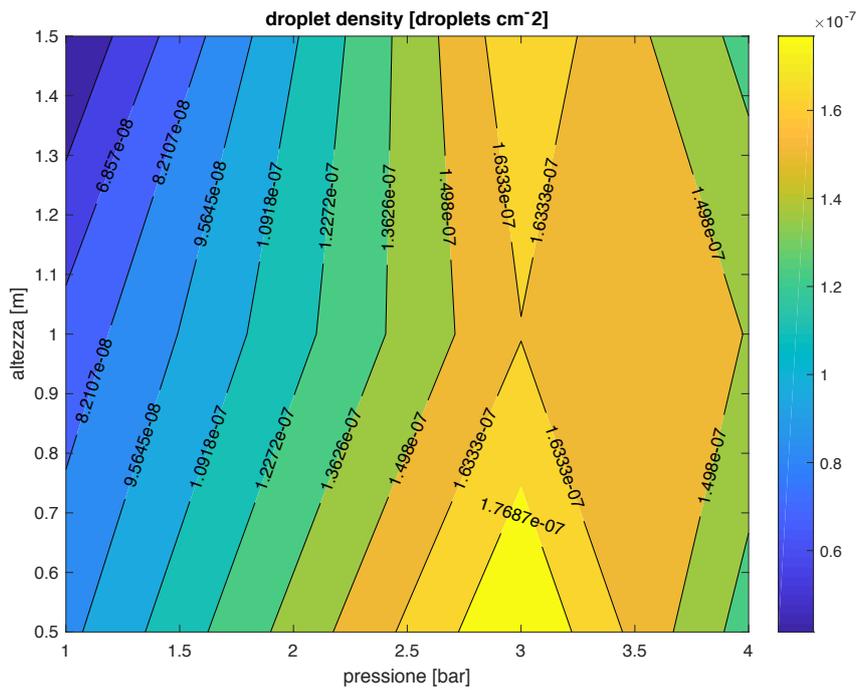


Figura 4-47 Droplet density delle prove dell'ugello LDC11001

Per l'*unit deposit*, mostrata in figura 4-48, la dipendenza dall'altezza è leggermente maggiore. In questo caso i valori maggiori si osservano ad una pressione di 3 bar e ad un'altezza di 0,5 m dell'ugello.

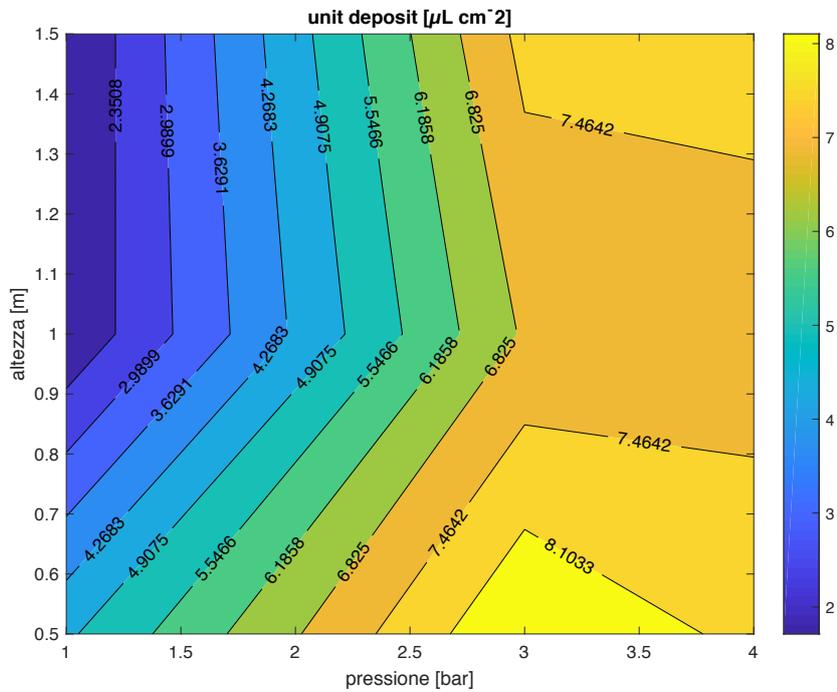


Figura 4-48 Unit deposit prove dell'ugello LDC11001

4.5.3 ANALISI IN POSIZIONE RANDOM: RISULTATI UGELLO WRC110015

Per l'ugello WRC110015 sono state realizzate più prove rispetto ai precedenti ugelli, infatti, come visibile dalla tabella 4-5, le prove sono state realizzate per quattro valori diversi di pressione anziché tre.

ugello	numero prova	pressione [bar]	altezza [m]
WRC110015	14	3.0	0.5
	19	2.0	0.5
	20	1.0	0.5
	38	4.0	0.5
	54	3.0	1.0
	63	4.0	1.0
	64	2.0	1.0
	65	1.0	1.0
	70	4.0	1.5
	80	3.0	1.5
	81	2.0	1.5
	82	1.0	1.5

Tabella 4-5 Prove ugello WRC110015

Nella figura 4-49 si riportano i risultati delle elaborazioni.

PROVA	VMD [µm]	COVERAGE [-]	RS [-]	NMD [µm]	unit deposit [µL cm ⁻²]	droplet density [droplets cm ⁻²]
14	545.7555	0.41855	0.47013	416.2666	7.2452	1.4683e-07
19	526.8715	0.38209	0.48022	406.8134	7.7493	1.7452e-07
20	524.0571	0.35604	0.51573	369.1438	5.2123	1.284e-07
38	534.9148	0.45006	0.49578	395.7627	6.6206	1.4228e-07
54	604.2838	0.32904	0.42566	490.9896	6.5279	9.1395e-08
63	608.3736	0.39781	0.4366	485.684	6.5535	9.2579e-08
64	443.3069	0.26514	0.50961	324.1949	6.5754	2.6505e-07
65	501.6545	0.097488	0.47654	403.7611	2.3814	5.7409e-08
70	568.7059	0.33913	0.44427	451.5605	7.369	1.2894e-07
80	548.013	0.3272	0.44461	434.0676	7.5317	1.4806e-07
81	509.0368	0.2658	0.46104	398.4988	6.7899	1.6535e-07
82	504.2071	0.077162	0.46008	412.245	1.8592	4.5168e-08

Figura 4-49 Risultati delle prove sull'ugello WRC110015

E' difficile definire una tendenza generale delle varie grandezze rappresentate nella figura 4-50. Ancora una volta il fattore RS o *relative span*, indicatore dell'uniformità di distribuzione, rimane costante ad un valore poco più basso di 0,5. Il valore di *coverage factor* diminuisce quando si aumenta la distanza tra ugello e carta fotografica e aumenta invece aumentando la pressione.

I diametri NMD e VMD seguono andamenti conto intuitivi, ad esempio, fissata la distanza ugello-carta a 1,5 m, i diametri NMD e VMD aumentano all'aumentare della pressione.

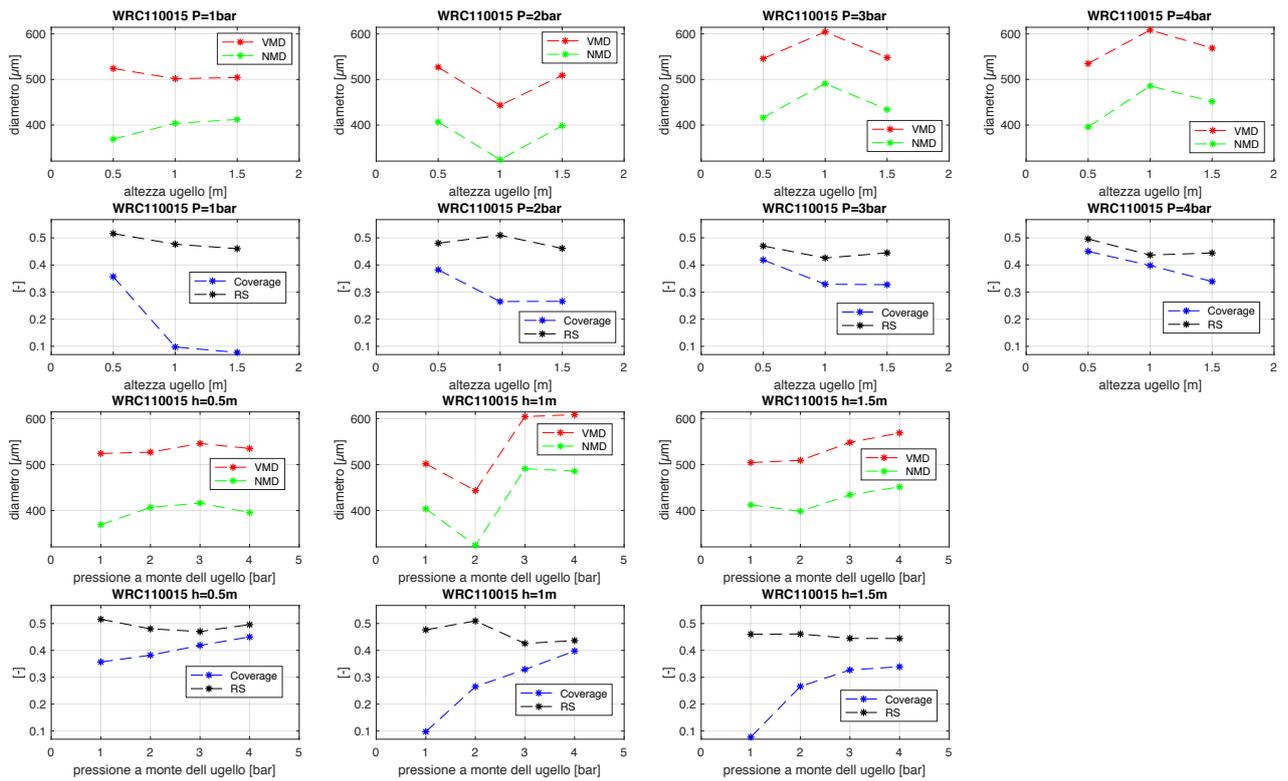


Figura 4-50 VMD, NMD, coverage factor e RS in funzione di pressione e temperatura

Dalla figura 4-51 è possibile notare che la *droplet density* diventa massima andando verso una pressione di 2 bar e un'altezza dell'ugello di 1 metro.

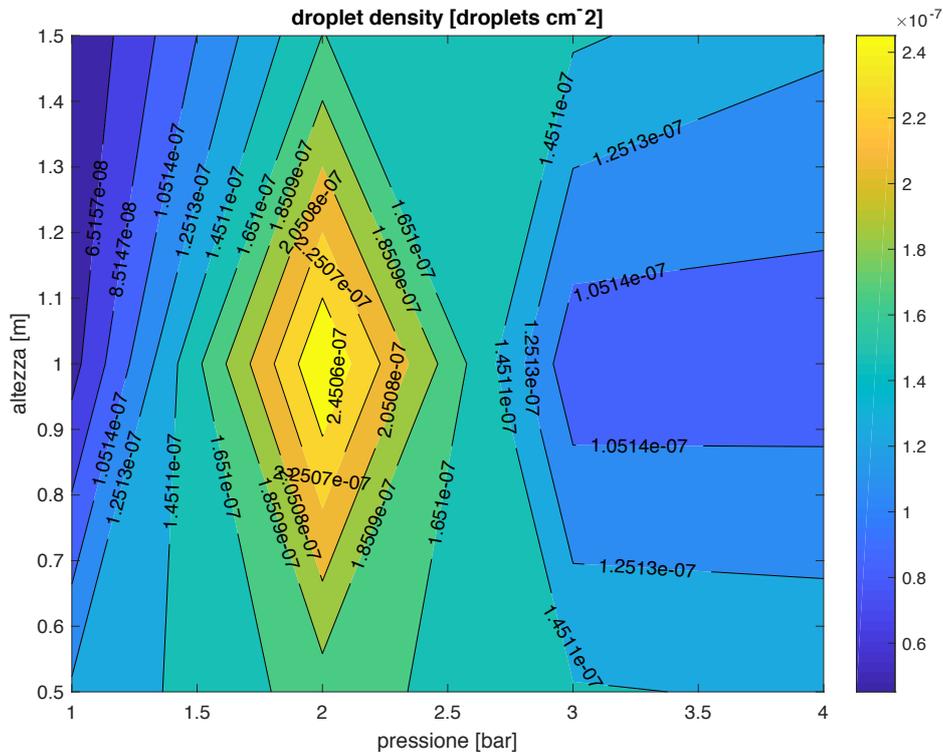


Figura 4-51 Droplet density delle prove dell'ugello WRC110015

Nella figura 4-52 si vede l'*unit deposit* delle varie prove, essa rimane abbastanza costante per pressioni maggiori di 2 bar e a tutte le altezze considerate.

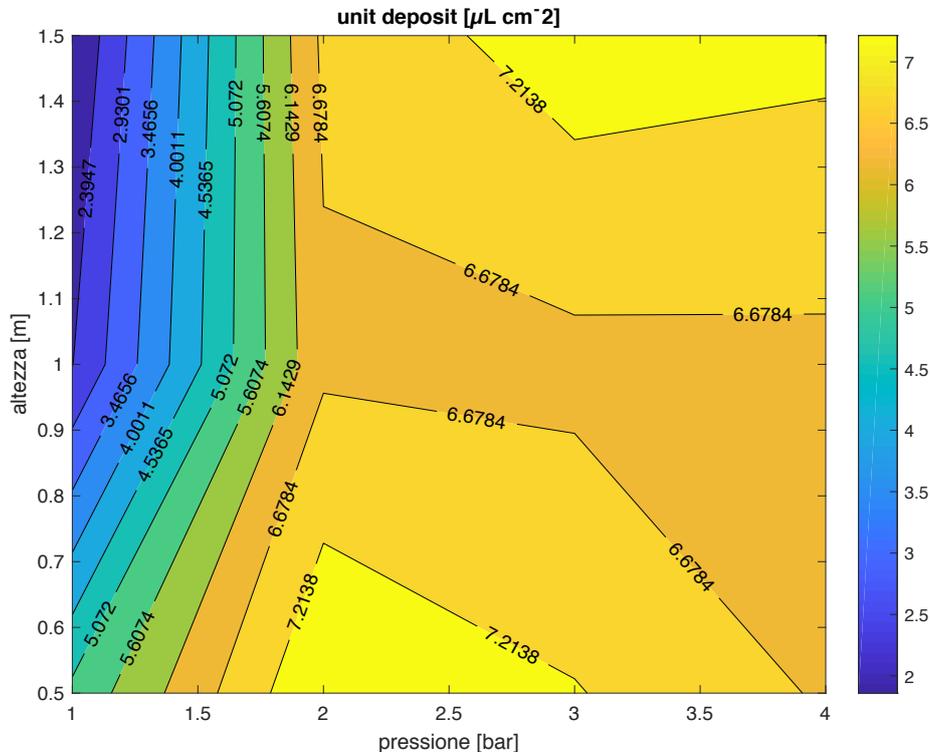


Figura 4-52 Unit deposit prove dell'ugello WRC110015

4.5.4 CONFRONTO TRA RISULTATI OTTENUTI E LETTERATURA

Per i vari ugelli usati il catalogo presenta un'indicazione sul tipo di goccia che ci si attende. Le indicazioni vengono date con delle lettere che rappresentano le iniziali del nome della classe di grandezza. Nell'immagine 4-53 è possibile vedere una legenda delle lettere utilizzate.

	DIMENSIONE DELLE GOCCE DROP SIZE RATING DIMENSIONES DE LAS GOTAS
VF	Molto fine - Very fine - Muy fina
F	Fine - Fine - Fina
M	Media - Medium - Media
C	Grossa - Coarse - Gruesa
VC	Molto grossa - Very coarse - Muy gruesa
XC	Estremamente grossa - Extremely coarse - Extremadamente gruesa
UC	Ultra grossa - Ultra coarse - Ultra gruesa

Figura 4-53 Legenda classi dimensionali delle gocce [4]

Si riportano in figura 4-54 le indicazioni del catalogo per i tre ugelli usati in funzione delle pressioni di utilizzo.

Wide Range Ceramic					
 WRC	 <i>bar</i>				
	1	2	3	5	7
WRC110015	F	F	F	F	VF
Low Drift Ceramic					
 LDC	 <i>bar</i>				
	1	3	4	5	7
LDC11001	M	F	F	F	F
Fan Air Ceramic					
 AFC 110°	 <i>bar</i>				
	1.5	3	4		
AFC11001	XC	C	C	M	

Figura 4-54 Dimensioni delle gocce secondo catalogo in funzione di pressione e tipo di ugello [4]

Per interpretare le indicazioni del catalogo si fa riferimento allo standard *S-572.1* di *ASABE* (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*) che alle classi individuate in precedenza fa corrispondere un range in cui il diametro VMD (*volumetric median diameter*) deve ricadere.

Spray Quality*	Size of Droplets	VMD Range (Microns**)	Color Code	Retention on Difficult to Wet Leaves	Used for	Drift Potential
Extremely Fine	Small	<60	Purple	Excellent	Exceptions	High
Very Fine		61-105	Red	Excellent	Exceptions	
Fine		106-235	Orange	Very Good	Good Cover	
Medium		236-340	Yellow	Good	Most Products	
Coarse		341-403	Blue	Moderate	Systemic Herbicides	
Very Coarse		404-502	Green	Poor	Soil Herbicides	
Extremely Coarse		503-665	White	Very Poor	Liquid Fertilizer	
Ultra Coarse	Large	>665	Black	Very Poor	Liquid Fertilizer	Low

*Always read the pesticide label to determine which spray quality is required.
**Estimated from sample reference graph in ASABE/ANSI/ASAE Standard S572.1

Figura 4-55 Norma ASABE S-572.1

I risultati ottenuti sperimentalmente non sono del tutto coerenti con i valori di riferimento indicati da catalogo, infatti il valore VMD sperimentalmente eccede il range indicato in tutte le prove. Una possibile giustificazione di questa incoerenza di risultati potrebbe stare nella diversa tipologia di prove effettuate, infatti il produttore ha testato gli ugelli attraverso tecniche ottiche che utilizzano il laser, mentre le prove sperimentali effettuate in laboratorio si sono concentrate sullo studio di fogli di carta fotografica precedentemente irrorati. Sebbene il getto fisso sia stato limitato nel tempo, nello studio statico, le gocce potrebbero essersi sovrapposte parzialmente e, analizzate tramite il software di image processing potrebbero essere state interpretate come delle gocce più grandi anziché distinte.

4.6 ANALISI ORDINATA

Nei capitoli precedenti sono state eseguite delle analisi di carattere medio sulle prove effettuate in laboratorio. Tuttavia, per migliorare il confronto tra le varie prove bisogna introdurre un nuovo fattore: la spazialità della prova stessa.

A tal proposito si è deciso di analizzare 13 ritagli della prova distribuiti in modo equidistante su una lunghezza di 60 cm, pari allo spessore della vite individuato da Marco Persico (2) nella tesi “*Studio e progetto di un banco prova per irrorazione di pesticidi in vigneto tramite droni*”. Il centro di questo *pattern* di rettangoli di selezione, aventi area pari a quella delle cartine idrosensibili 52000 x 78000 (mm x mm), è costituito dal rettangolo numero sette ed è individuato manualmente prova per prova come visibile nell’esempio riportato nella figura 4-56. Nelle prove in cui il getto è perpendicolare alla superficie del foglio, e la superficie del foglio è poggiata orizzontalmente, non è difficile individuare visivamente il centro del getto vista l’evidente simmetria delle stesse prove.

Quindi, individuato il centro del getto, coincidente per scelta con il centro della distribuzione delle gocce, si posiziona il *pattern* di ritagli di selezione. Si sottolinea che quando questo *pattern* di rettangoli di selezione viene spostato lo si fa in modo rigido, ovvero non cambiando la distanza relativa tra i vari rettangoli.

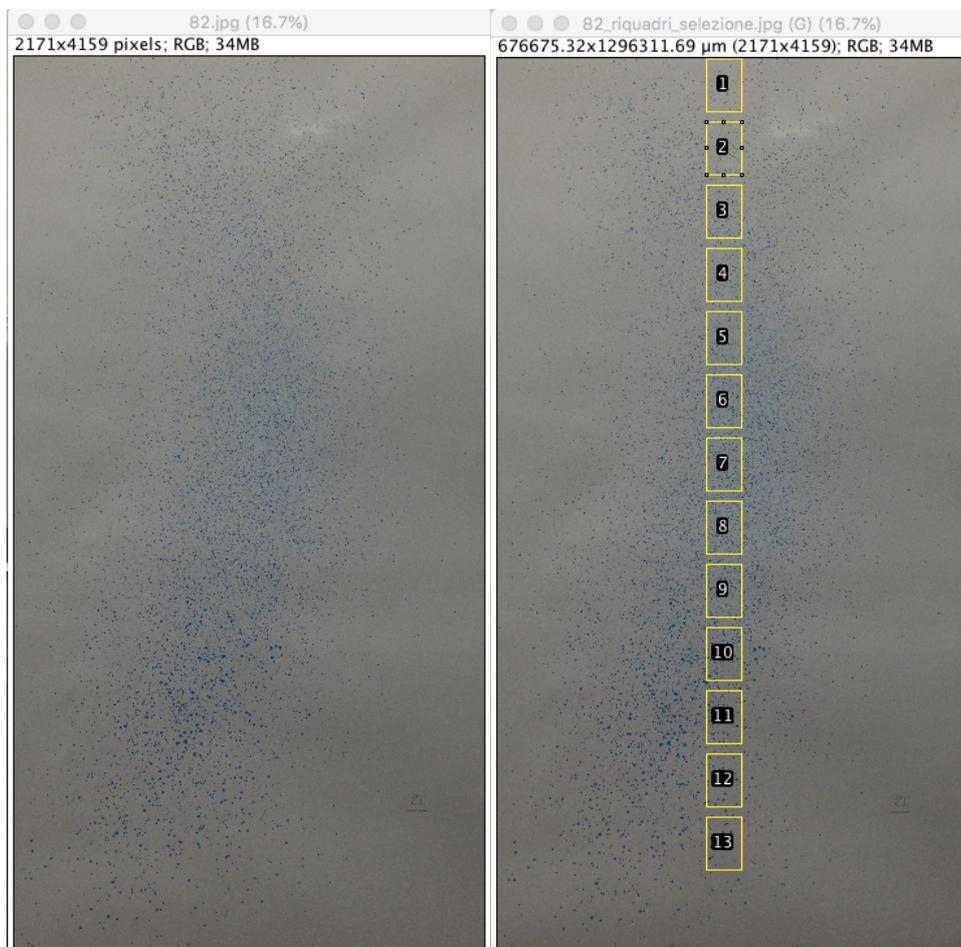


Figura 4-56 Sinistra) foto della prova 82 prima della selezione del *pattern* di rettangoli; destra) rettangoli di selezione applicati alla prova 82

Talvolta, come in figura 4-57, la prova non ricopre tutti i 60 cm ma una lunghezza inferiore, per cui anziché analizzare 13 ritagli se ne analizzano meno, in questo caso 12.

Inoltre, nel caso specifico della prova seguente, visto che la prova è molto estesa in lunghezza la luminosità della foto cambia molto, per cui si decide di non considerare i ritagli dal numero 10 al 12 dopo aver verificato a posteriori di aver ottenuto un *threshold* lontano da quello che ci si aspettava per questi ritagli. Le informazioni perse in questo modo possono essere recuperate considerando che questi ritagli sono grosso modo simmetrici rispetto al ritaglio numero 7: ad esempio per il ritaglio numero 11 ci si aspetta dei risultati simili al ritaglio numero 3, perché simmetrici rispetto al ritaglio centrale (numero 7).

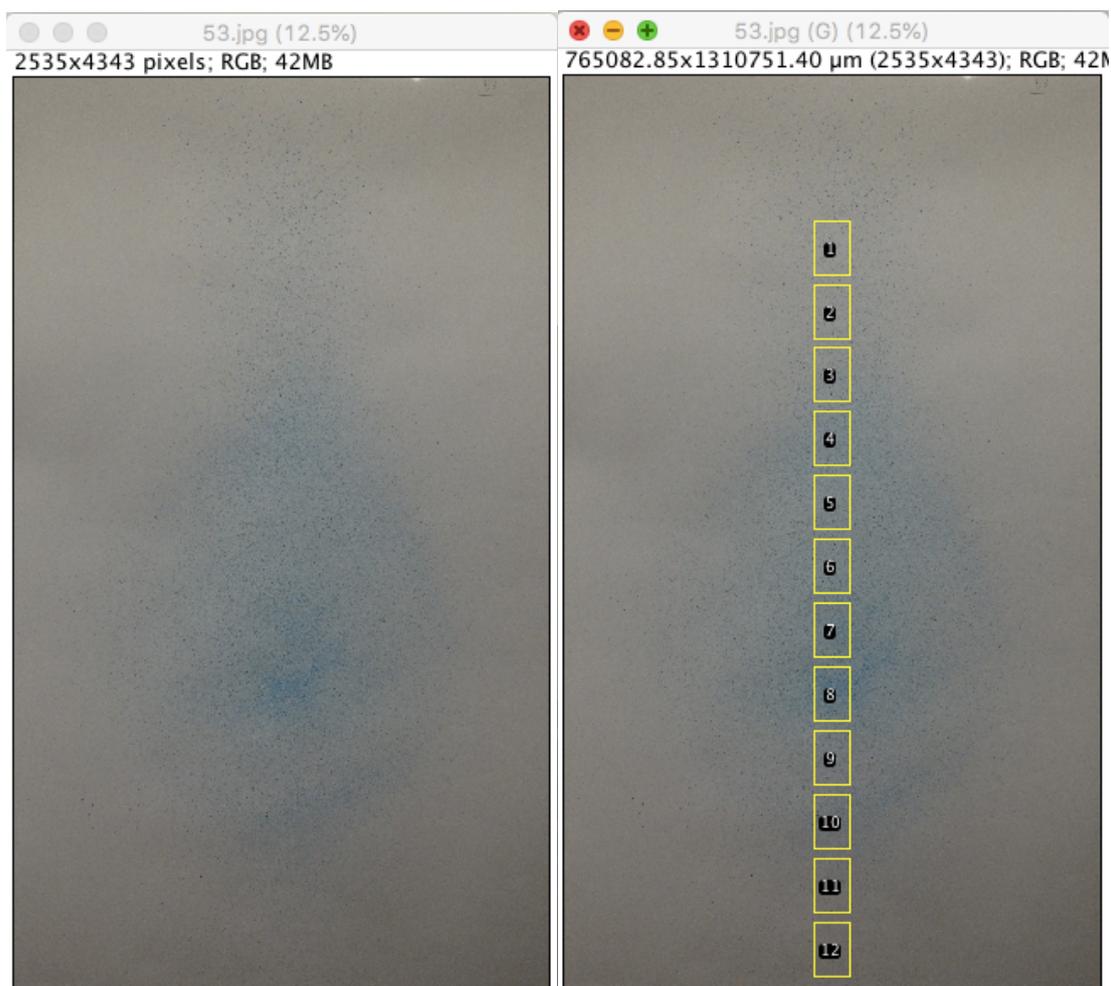


Figura 4-57 Sinistra) foto della prova 53 prima della selezione del pattern di rettangoli; destra) rettangoli di selezione applicati alla prova 53

Con i criteri appena descritti sono stati ottenuti, per gli ugelli già considerati in precedenza, i risultati che seguono. Lo si è fatto modificando leggermente i codici *Matlab* riportati nelle sezioni precedenti, che anziché selezionare i ritagli in modo casuale li selezionano sempre allo stesso modo una volta scelto il centro della distribuzione, e, ottenuti i risultati, non stampano solo il valore mediato ma anche i valori intermedi dei vari ritagli analizzati. Nella figura 4-58 si riporta una porzione del file dei risultati dove è evidente la colonna 'zona' aggiunta che individua il numero del ritaglio considerato.

PROVA	ZONA	VMD [μm]	COVERAGE [-]	RS [-]	NMD [μm]	unit deposit [$\mu\text{L cm}^{-2}$]	droplet density [droplets cm^{-2}]
82	1	485.2025	0.026156	0.32754	457.0366	0.70822	1.3067e-08
82	2	476.4013	0.065701	0.38469	422.1982	1.7179	3.7475e-08
82	3	485.2025	0.085557	0.46044	400.9525	1.9383	4.8323e-08
82	4	458.1769	0.085006	0.49462	376.611	2.1119	6.2377e-08
82	5	465.8074	0.10225	0.47567	393.4073	2.7012	7.717e-08
82	6	457.0366	0.12005	0.49585	385.0091	2.7887	8.0375e-08
82	7	501.6422	0.12422	0.50543	393.4073	3.4568	8.9497e-08
82	8	467.0374	0.11883	0.49566	376.611	2.7236	7.7909e-08
82	9	497.3642	0.10879	0.47413	393.4073	2.6377	6.7801e-08
82	10	508.8017	0.098156	0.45558	415.348	1.9242	4.3393e-08
82	11	541.1406	0.074084	0.46979	434.7424	1.3634	2.6134e-08
82	12	515.8826	0.058299	0.4548	446.3087	0.84941	1.5533e-08
82	13	613.5365	0.027856	0.37274	546.3658	0.71704	7.8895e-09

Figura 4-58 Risultati ottenuti elaborando la prova 82 utilizzando la metodologia appena descritta

4.6.1 RISULTATI UGELLO AFC11001

L'ugello a ventaglio AFC11001 mostra dei risultati interessanti: fissata l'altezza dell'ugello dalla superficie da irrorare la copertura aumenta nelle varie zone aumentando la pressione da 1,5 bar a 3 bar. La copertura non aumenta in modo significativo passando invece da 3 a 4 bar di pressione. Usare una pressione maggiore o uguale a 3 bar consente quindi di coprire uno spessore della vite maggiore. Per quanto riguarda le dimensioni delle gocce, a 0,5 m di altezza dell'ugello dalla superficie da irrorare le particelle crescono di dimensione passando da 1,5 bar a 3 bar e diminuiscono passando da 3 bar a 4 bar.

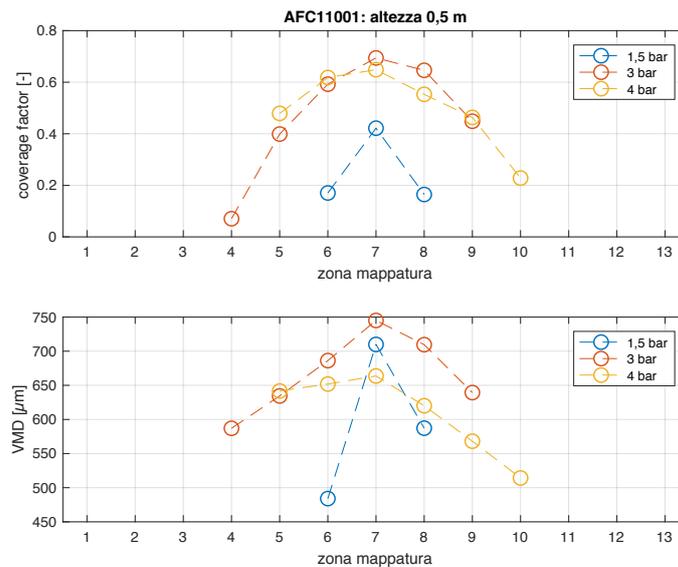


Figura 4-59 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, altezza fissa a 0,5 m e pressione variabile

Fissata un'altezza di irrorazione di 1 m si può notare come, passando da una pressione di 1,5 bar ad una pressione di 3 bar, la copertura passi da una curva più alta e concentrata lungo le zone centrali ad una curva più distribuita lungo le zone da 1 a 13 ma più schiacciata. Come prima la copertura non varia molto passando da 3 a 4 bar di pressione. Le dimensioni delle gocce scendono all'aumentare della pressione.

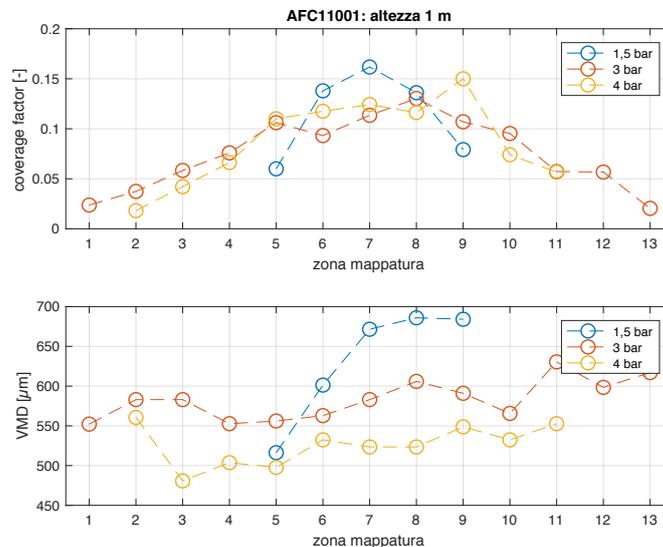


Figura 4-60 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, altezza fissa a 1,0 m e pressione variabile

Le prove ad un'altezza di irrorazione di 1,5 m confermano i risultati delle prove ad un'altezza di irrorazione di 1m. Questa volta però la differenza nella copertura tra le prove a 3 bar e 4 bar è più marcata rispetto al grafico 4-60, meno marcata invece per quanto riguarda la dimensione delle gocce.

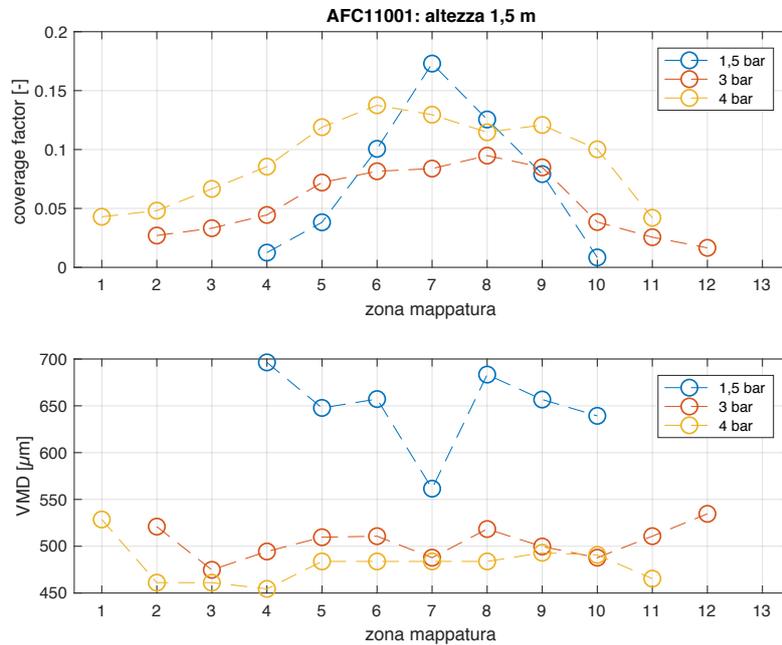


Figura 4-61 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, altezza fissa a 1,5 m e pressione variabile

Fissando invece la pressione ad 1,5 bar e variando l'altezza dell'ugello dalla superficie di irrorazione si nota come aumentando l'altezza le zone periferiche vengono irrorate maggiormente mentre quelle centrali vengono coperte meno rispetto al caso a 0,5m di altezza. E' difficile determinare un andamento univoco per quanto riguarda le dimensioni delle gocce.

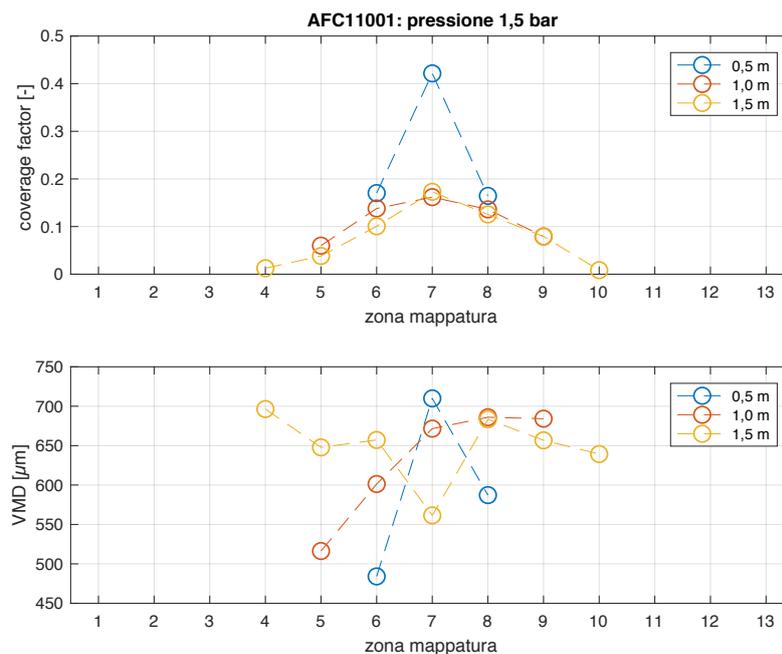


Figura 4-62 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, pressione fissa a 1,5 bar e altezza variabile

Passando ad una pressione di irrorazione pari a 3 bar si può notare che aumentando l' altezza del punto di irrorazione la copertura aumenta nelle zone periferiche e diminuisce centralmente, ad una pressione di 3 bar non ci sono particolari differenze tra i valori di copertura a 1,0 m e 1,5 m di altezza. Anche le dimensioni delle gocce diminuiscono nelle zone centrali all' aumentare dell' altezza del punto di irrorazione, la differenza tra le altezze di 1,0 m e 1,5 m è più marcata per le dimensioni delle gocce rispetto ai fattori di copertura.

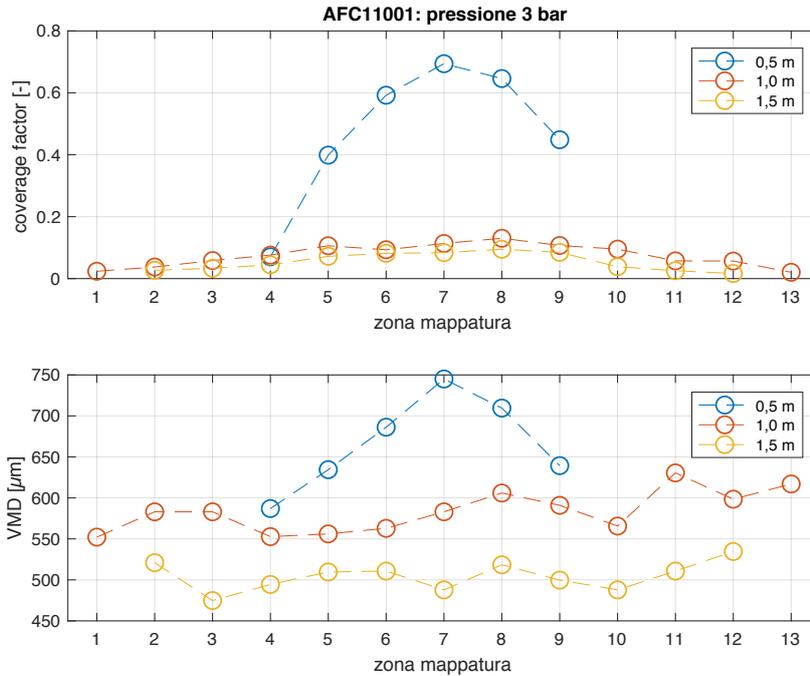


Figura 4-63 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, pressione fissa a 3,0 bar e altezza variabile

Passando ad una pressione di irrorazione pari a 4 bar si conferma quanto già detto per il caso a 3 bar.

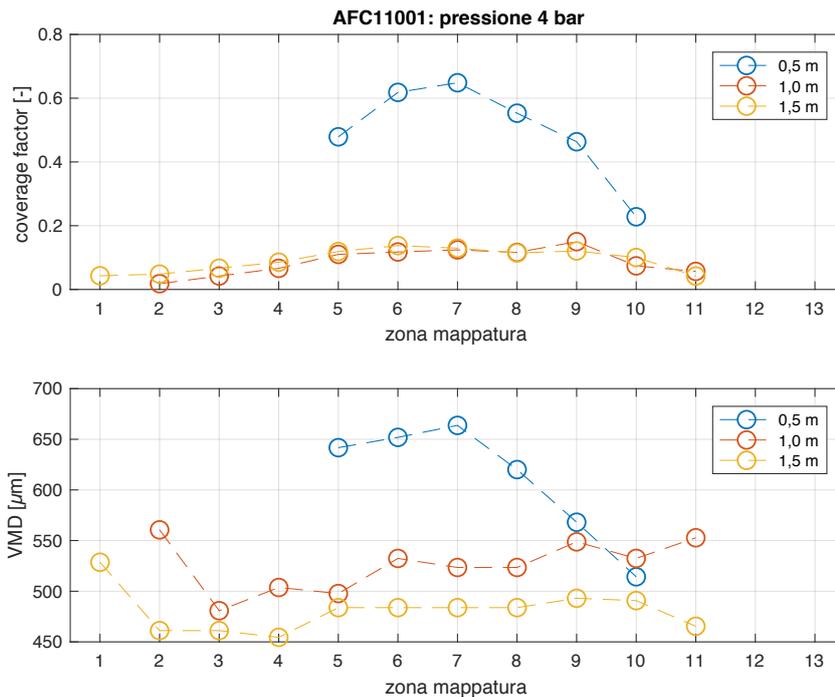


Figura 4-64 Coverage factor e VMD per singolo ugello AFC11001, pressione fissa a 4,0 bar e altezza variabile

4.6.2 RISULTATI UGELLO LDC11001

Vengono ora analizzati i risultati dell'ugello a ventaglio LDC11001: fissata l'altezza a 0,5 m si può vedere come la copertura della vite aumenta nelle zone periferiche passando da 1 a 3 bar di pressione e diminuisce al centro. Aumentando ulteriormente la pressione da 3 a 4 bar la copertura scende lievemente. Per quanto riguarda la dimensione delle gocce, all'aumentare della pressione da 1 a 3 bar le gocce diventano più piccole nella zona centrale mentre nelle zone periferiche iniziano ad essere presenti. Passando da 3 a 4 bar le dimensioni delle gocce non cambiano in modo sensibile.

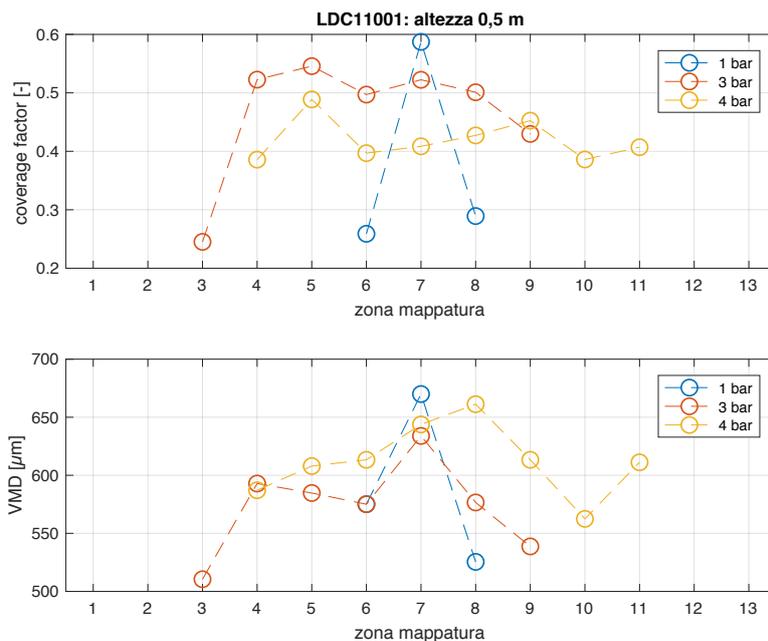


Figura 4-65 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, altezza fissa a 0,5 m e pressione variabile

Considerando l'altezza dell'ugello irroratore pari ad 1 m si ottengono i risultati mostrati nella figura 4-66. Portando la pressione da 1 a 3 bar la copertura migliora in tutte le zone, specialmente in quelle più periferiche che alla pressione di 1 bar non erano proprio irrorate. Un ulteriore miglioramento del fattore di copertura si riscontra passando da una pressione di 3 bar ad una pressione di 4 bar. Le dimensioni delle gocce sono molto simili a 3 e 4 bar in tutte le zone analizzate, ad 1 bar sono più grandi nella zona centrale. Contro-intuitivamente si nota che le gocce sono più grandi a 4 bar rispetto a 3 bar in molte zone, questo potrebbe essere dovuto ad un tempo di irrorazione dissimile.

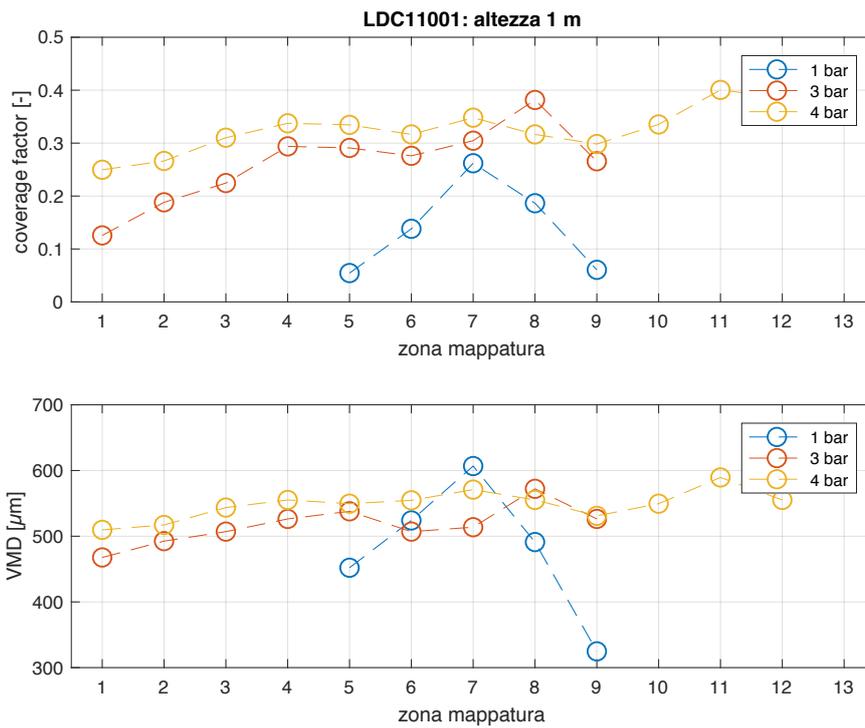


Figura 4-66 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, altezza fissa a 1,0 m e pressione variabile

Portando l'altezza ad 1,5 m si possono fare per il fattore di copertura le stesse considerazioni fatte per un'altezza dell'ugello di 1,0 m. Per quanto riguarda la dimensione delle gocce si ottengono nuovamente dei risultati contro-intuitivi in quanto le dimensioni delle gocce aumentano all'aumentare della pressione.

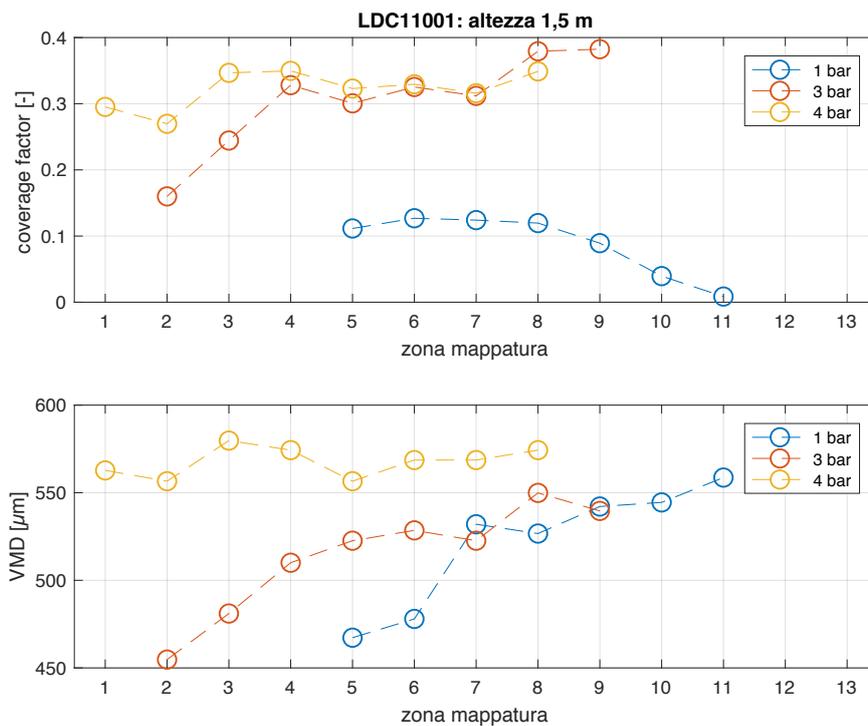


Figura 4-67 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, altezza fissa a 1,5 m e pressione variabile

Fissata a questo punto la pressione ad 1 bar si vede chiaramente che nella zona centrale la copertura diminuisce all'aumentare dell'altezza dell'ugello irroratore. Perifericamente invece la copertura aumenta all'aumentare dell'altezza senza riuscire mai a coprire tutto lo spessore della vite. Le dimensioni delle gocce scendono nella zona centrale all'aumentare dell'altezza, perifericamente le gocce tendono ad essere più grandi all'aumentare della distanza dell'ugello.

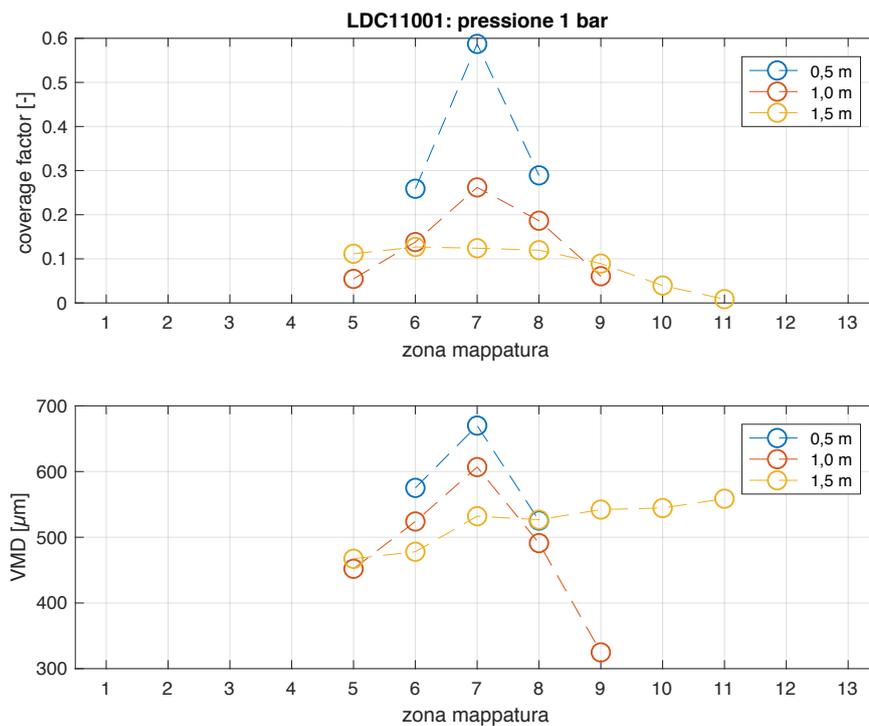


Figura 4-68 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, pressione fissa a 1,0 bar e altezza variabile

Ad una pressione di 3 bar la copertura scende all'aumentare dell'altezza dell'ugello da 0,5 m a 1,0 m, non c'è grossa differenza invece passando da 1,0 m a 1,5 m. Perifericamente la copertura è già abbastanza buona ad un'altezza di 0,5 m, tuttavia le regioni più periferiche sono coperte solo quando l'ugello si trova almeno ad 1,0 m di distanza dalla superficie orizzontale. Le dimensioni delle gocce variano come il fattore di copertura in questo caso, infatti le curve del fattore di copertura e del diametro VMD hanno forme molto simili.

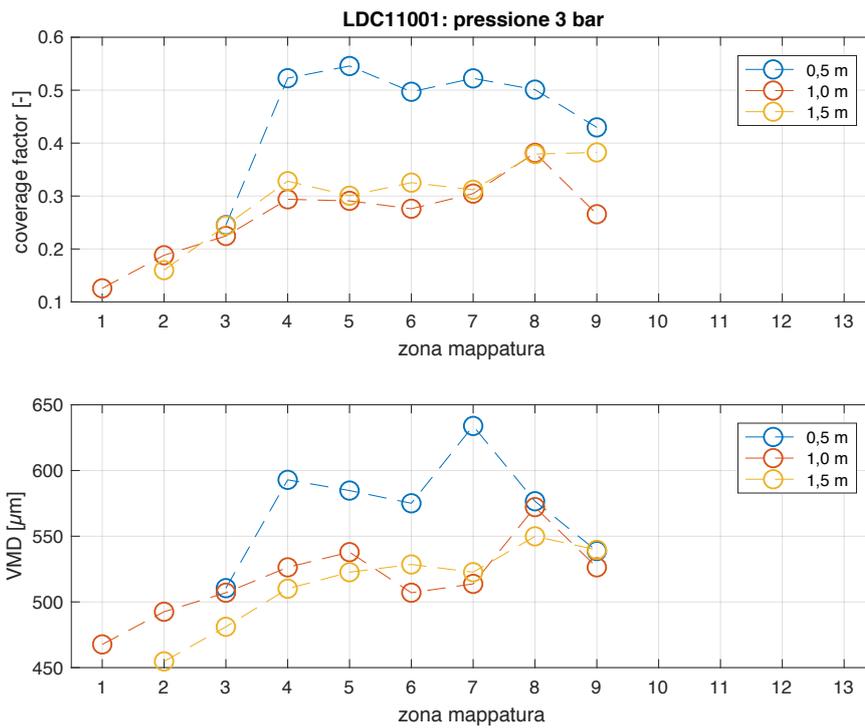


Figura 4-69 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, pressione fissa a 3,0 bar e altezza variabile

Ad una pressione pari a 4 bar si può notare come le forme del fattore di copertura e del diametro VMD passino da una curva più alta e stretta ad una più bassa e distribuita lungo tutte le zone quando si passa da un'altezza dell'ugello dalla superficie bersaglio di 0,5 m ad un'altezza di 1,0 m. Per entrambe le grandezze non ci sono grandi differenze quando si passa da un'altezza di 1,0 m ad un'altezza di 1,5 m.

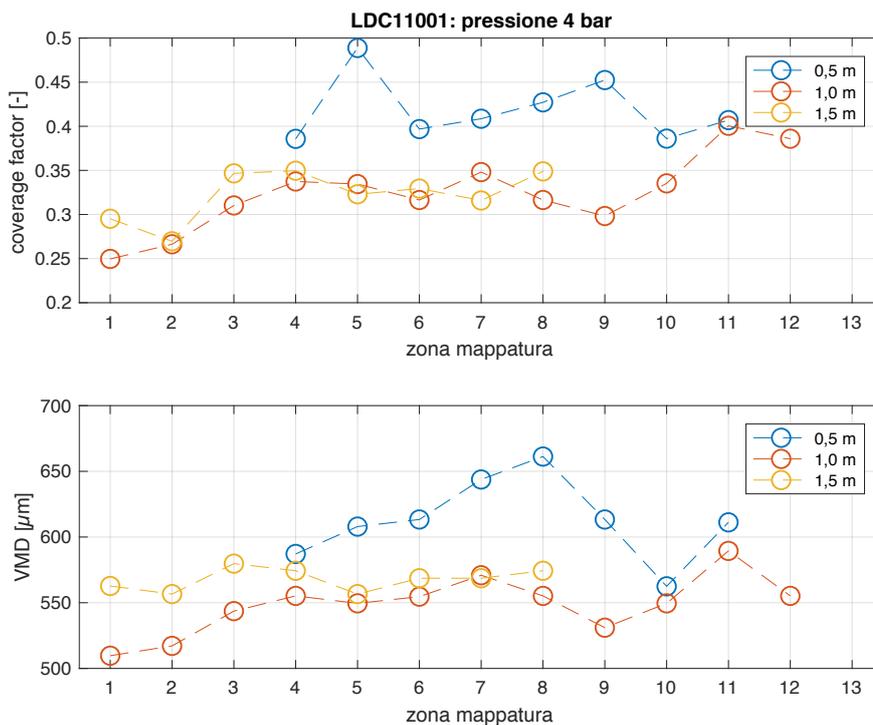


Figura 4-70 Coverage factor e VMD per singolo ugello LDC11001, pressione fissa a 4,0 bar e altezza variabile

4.6.3 RISULTATI UGELLO WRC110015

Vengono ora analizzati i risultati dell'ugello a ventaglio WRC110015. Partendo da un'altezza dell'ugello irroratore di 0,5 m da una superficie bersaglio posizionata orizzontalmente e costituita da carta fotografica si può notare che vi è una differenza sostanziale nel fattore di copertura solo passando dalla pressione di 1 bar a una pressione di 2 bar. Aumentando ulteriormente la pressione oltre i 2 bar i risultati rimangono molto simili alla curva a 2 bar. I risultati riguardanti i diametri VMD non riportano un andamento interpretabile in modo chiaro.

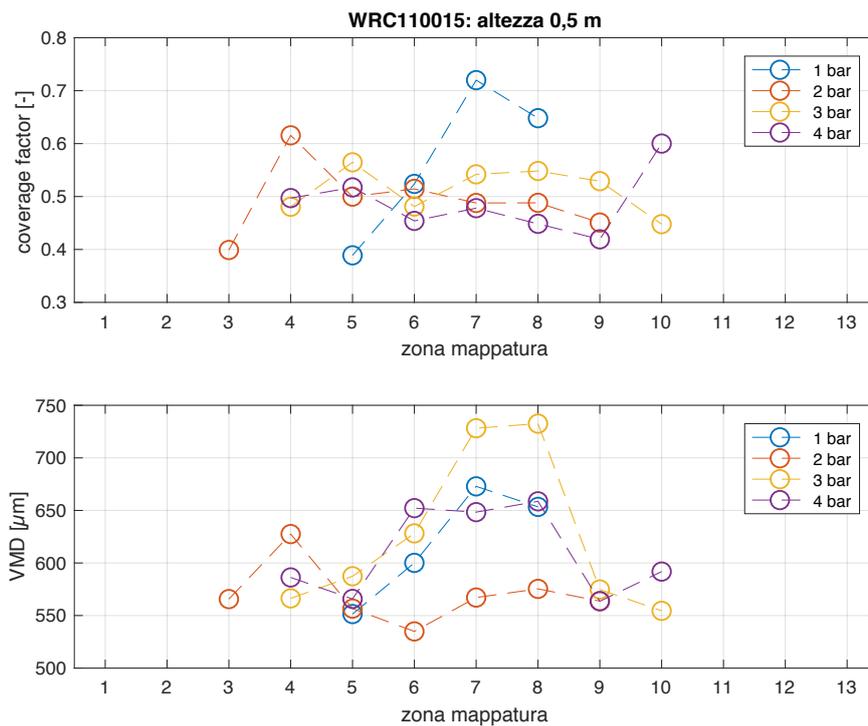


Figura 4-71 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, altezza fissa a 0,5 m e pressione variabile

Passando ad un'altezza di irradiazione pari a 1,0 m le curve appaiono da subito meglio distribuite su tutte le 13 zone esaminate. Su tutte le zone si nota che la copertura aumenta all'aumentare della pressione. I risultati sono invece contro-intuitivi per quanto riguarda i diametri VMD, che diminuiscono passando da una pressione di 1,0 bar ad una pressione di 2,0 bar ma aumentano all'aumentare della pressione di irradiazione oltre i 2,0 bar.

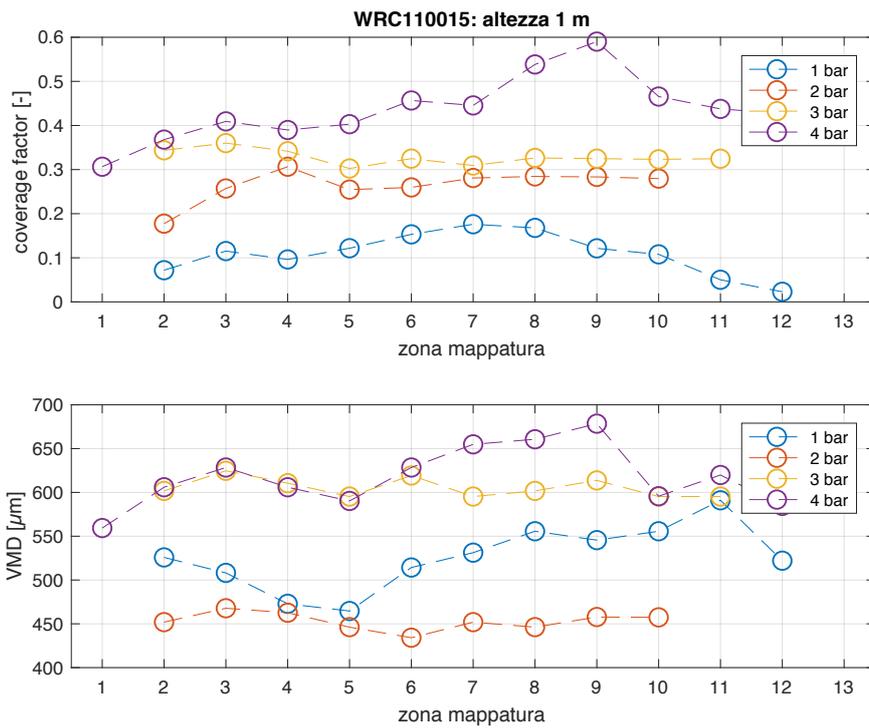


Figura 4-72 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, altezza fissa a 1,0 m e pressione variabile

Ad un'altezza di irrorazione pari a 1,5 m, passando da una pressione di 1 bar ad una pressione di 2 bar il coverage factor aumenta; aumentando la pressione oltre i 2 bar non si osservano variazioni significative. Anche in questo caso la tendenza generale dei diametri VMD è di crescere al crescere della pressione, risultato contro-intuitivo.

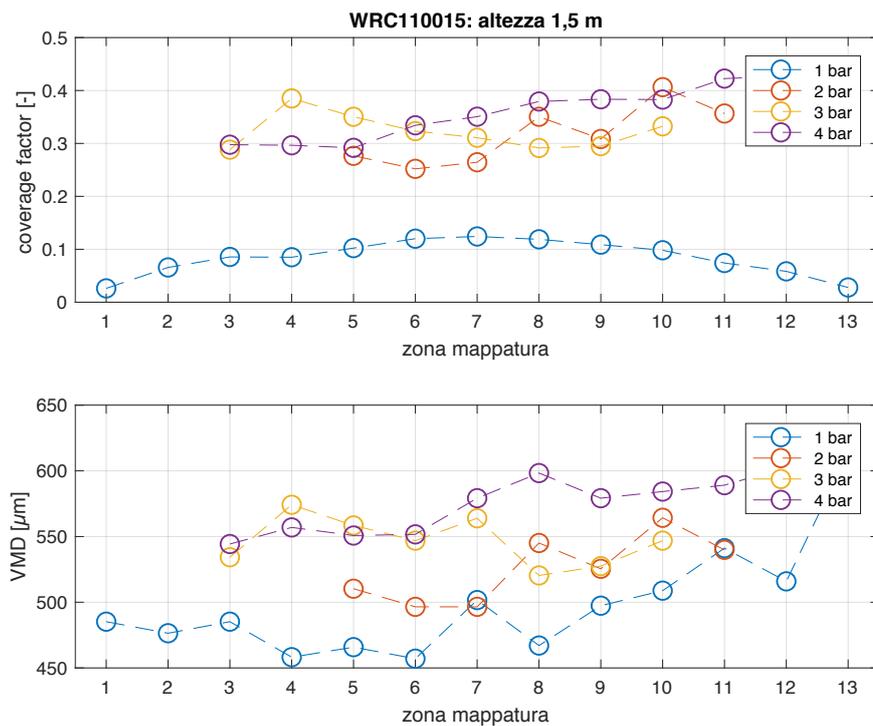


Figura 4-73 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, altezza fissa a 1,5 m e pressione variabile

Ora si procede con l'esaminare i risultati dell'ugello WRC110015 una volta fissata la pressione e al variare dell'altezza dell'ugello. Fissata la pressione di irrorazione ad 1 bar il fattore di copertura del getto è molto alto ad un'altezza di irrorazione di 0,5 m e concentrato esclusivamente nelle zone centrali. Passando ad un'altezza di 1,0 m la copertura diminuisce nelle zone centrali e aumenta in quelle periferiche, ad un'altezza di 1,5 m la copertura non cambia molto rispetto all'altezza precedente. Le forme delle curve dei diametri VMD sono molto simili a quelle dei coverage factor.

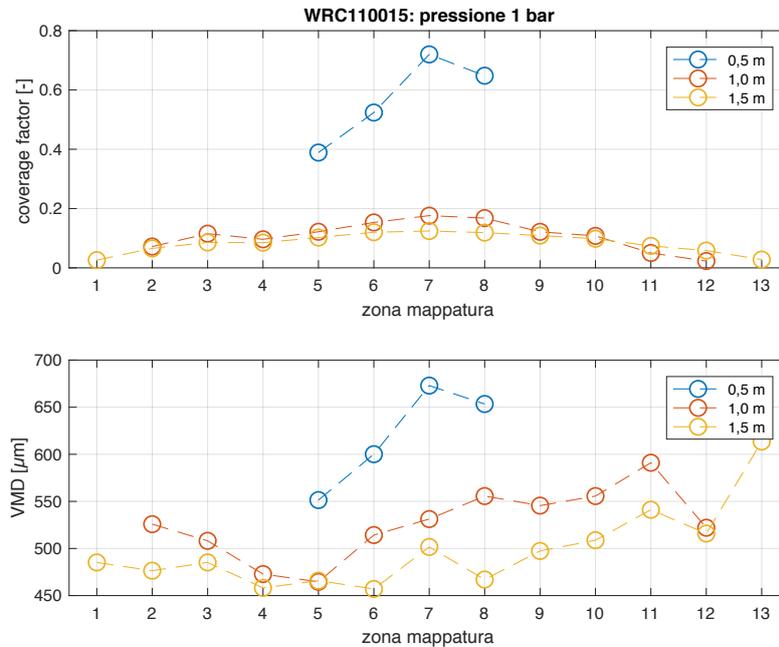


Figura 4-74 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, pressione fissa a 1,0 bar e altezza variabile

Nella figura 4-75, dal grafico del fattore di copertura si nota che, ad una pressione di 2 bar, il getto è ben distribuito nelle zone periferiche già ad un'altezza di 0,5 m. Passando poi ad un'altezza di 1,0 m la copertura diminuisce più o meno in tutte le zone mentre ad un'altezza di 1,5 m non si rilevano particolari differenze rispetto all'altezza considerata precedentemente. Osservando invece il grafico dei diametri VMD si nota che le dimensioni delle gocce diminuiscono passando da un'altezza di 0,5 m ad un'altezza di 1,0 m e aumentano passando da un'altezza di 1,0 m ad un'altezza di 1,5 m.

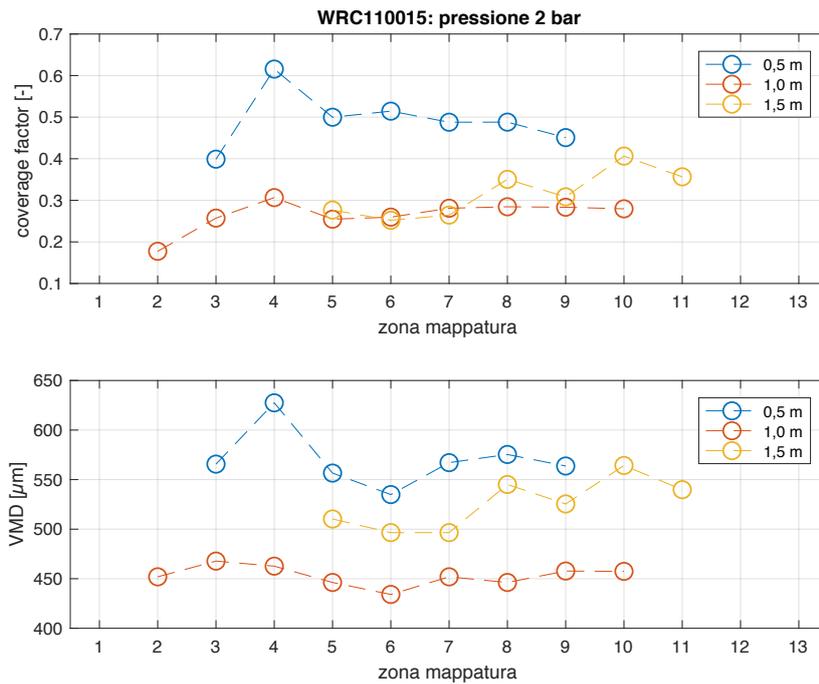


Figura 4-75 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, pressione fissa a 2,0 bar e altezza variabile

Fissata la pressione ad un valore pari a 3 bar, il fattore di copertura scende nelle zone centrali passando da un'altezza di 0,5 m ad un'altezza di 1,0 m e aumenta nelle zone periferiche. Aumentando ulteriormente l'altezza a 1,5 m l'andamento del fattore di copertura non presenta particolari differenze. Il diametro volumetrico medio VMD diminuisce nelle zone centrali all'aumentare dell'altezza. Nelle zone periferiche invece aumenta quando si passa da 0,5 m a 1,0 m e diminuisce quando si passa da 1,0 m a 1,5 m.

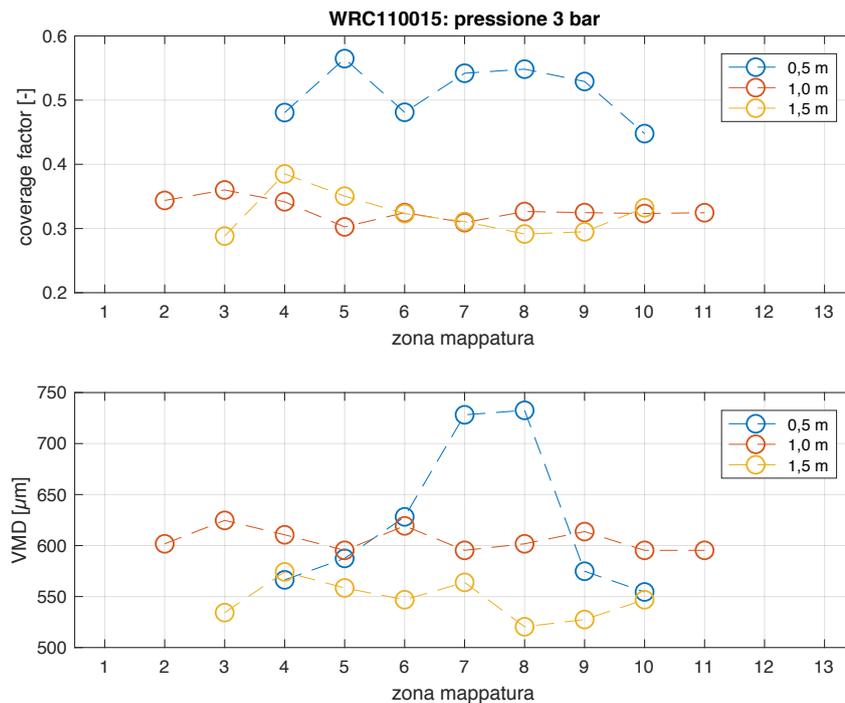


Figura 4-76 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, pressione fissa a 3,0 bar e altezza variabile

I risultati alla pressione fissata a 4 bar sono di difficile interpretazione, nella zona centrale si può dire che all'aumentare dell'altezza di irrorazione diminuiscono sia il fattore di copertura che il diametro VMD. Nelle zone periferiche si ha una situazione asimmetrica, le zone dalla 1 alla 6 ad esempio vedono un fattore di copertura che diminuisce all'aumentare dell'altezza di irrorazione mentre un diametro che cambia in modo non monotono.

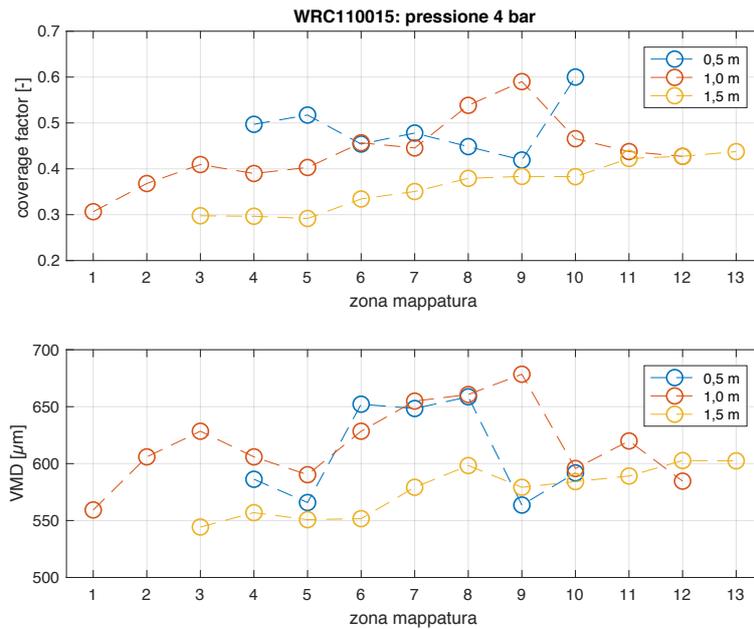


Figura 4-77 Coverage factor e VMD per singolo ugello WRC110015, pressione fissa a 4,0 bar e altezza variabile

4.6.4 CONFRONTO DEI VARI UGELLI PER UN SET DI ALTEZZA E PRESSIONE

La figura 4-78 rappresenta un confronto tra le tre tipologie di ugelli a ventaglio studiate: AFC11001, LDC11001 e WRC110015.

Per questa particolare combinazione di pressione e altezza di irrorazione (3 bar di pressione e 1 m di altezza) l'ugello che assicura una copertura migliore è il WRC110015 mentre il minor diametro delle gocce è assicurato dall'LDC11001. Un buon compromesso tra fattore di copertura e dimensioni delle gocce può essere l'ugello LDC11001.

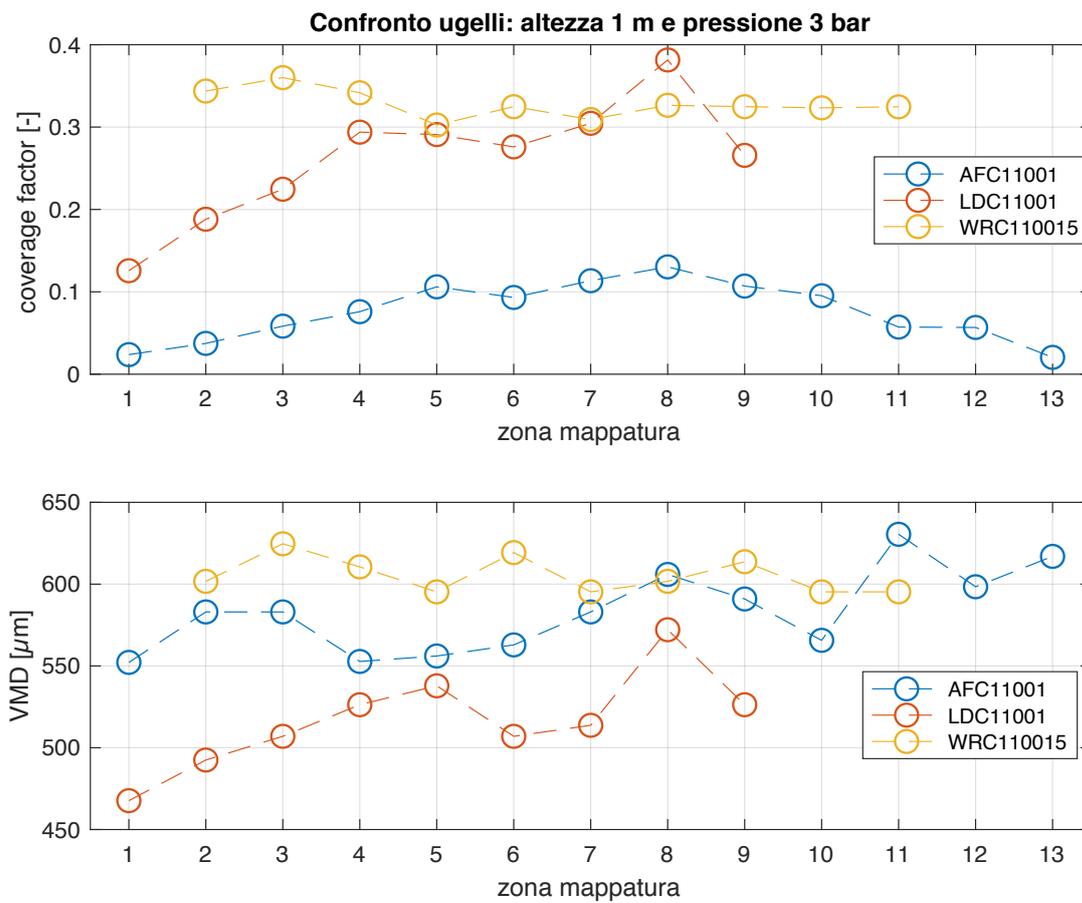


Figura 4-78 Coverage factor e VMD per una pressione fissa a 3,0 bar, altezza 1,0 m e tipologia di ugello variabile

5 IRRORAZIONE MEDIANTE CIRCUITO A TRE UGELLI

Si realizza un circuito che testi tre ugelli in contemporanea. Il banco prova, come nei casi visti in precedenza, è costituito in ordine da un serbatoio, una pompa e un by-pass. Rispetto ai casi precedenti il circuito continua con una diramazione dello stesso verso i tre ugelli, tra questa diramazione e l'ugello centrale è posizionato un manometro analogico, fondamentale per impostare la pressione manualmente attraverso il rubinetto posizionato nel by-pass. I tubi, i portageggi e il manometro sono alloggiati su una struttura rigida costituita da profili scanalati bullonati e/o legati con fascette di plastica tra loro e ad un traliccio dotato di ruote e che consente la movimentazione dell'intera struttura.



Figura 5-1 Circuito idraulico a tre ugelli

5.1 SCELTA DELL'UGELLO LATERALE

Prima di montare il circuito composto da più ugelli si effettuano delle prove a singolo ugello con carta fotografica posizionata verticalmente. Queste prove vengono effettuate con gli ugelli antideriva AFC11001 e LDC11001 per decidere quale delle due tipologie di ugelli usare per i getti laterali in un sistema composto da tre ugelli. L'ugello WRC110015 viene escluso dalla scelta perché concentra le gocce in una porzione troppo limitata del foglio, quando l'obiettivo è invece quello di coprire il più possibile l'altezza del vigneto.

Le prove sono effettuate entrambe ad un'angolazione dell'ugello rispetto alla verticale di 45°, ad una pressione pari a 3 bar e ad una distanza dell'ugello dal foglio pari a 400mm misurati orizzontalmente.

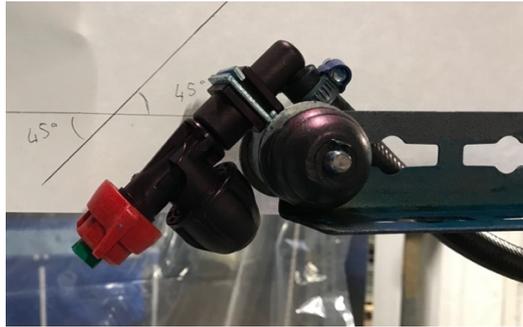


Figura 5-2 Ugello WRC110015 montato a 45° rispetto l'orizzontale e utilizzato per le prove laterali

La figura 5-3 mostra i risultati delle prove appena descritte: a sinistra quella ottenuta dall'utilizzo dell'ugello AFC11001 (altezza del getto pari a 70 cm circa) e a destra quella dal LDC11001 (altezza del getto pari a 60 cm circa).

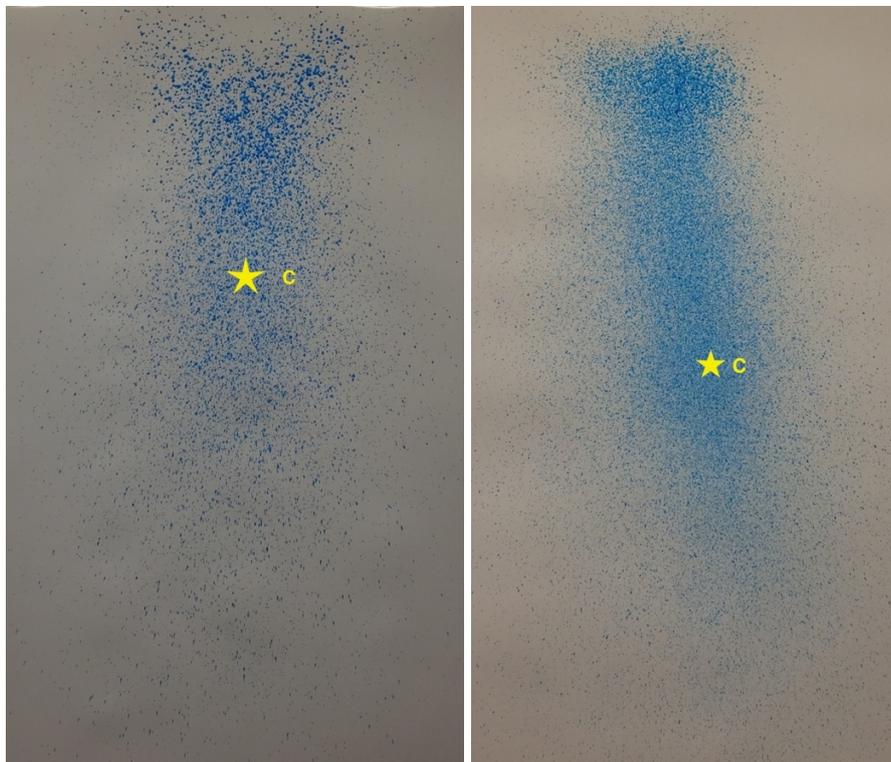


Figura 5-3 Sinistra) ugello AFC11001; Destra) ugello LDC11001;

Nella figura i centri delle prove sono identificati in giallo, essi sono ottenuti proiettando l'asse dell'ugello sulla carta fotografica secondo la direzione di inclinazione dell'ugello stesso.

Le prove sperimentali verticali risultano più asimmetriche di quelle orizzontali, questa considerazione, evidente già dalla figura 5-3, trova riscontro nella figura 5-4, che riporta i risultati in termini quantitativi. Questa asimmetria è dovuta alla combinazione di angolo di inclinazione ed effetto della gravità.

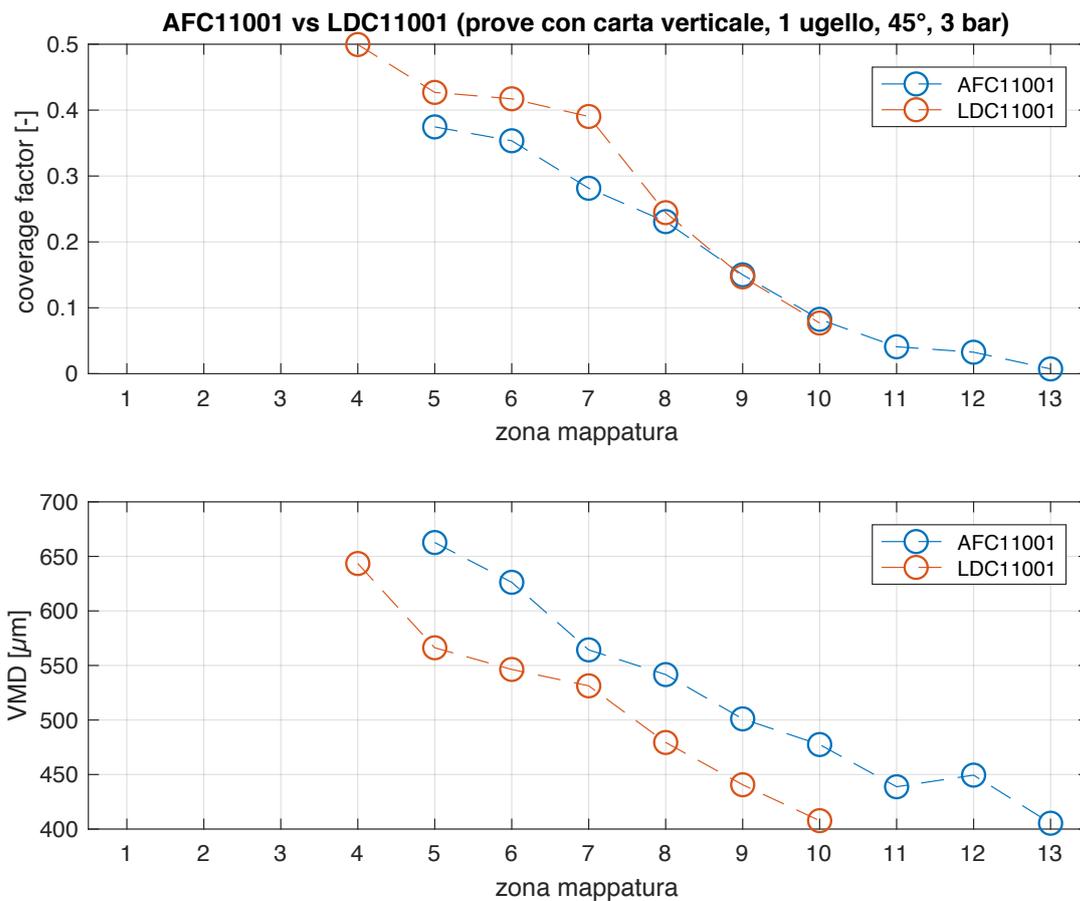


Figura 5-4 Prove verticali: coverage factor e VMD per due ugelli

Come anticipato in precedenza, la figura 5-4 conferma l'asimmetria delle due prove sperimentali rispetto alla zona 7 della mappatura a cui corrisponde il centro (proiettato) della prova. I risultati mostrano, per l'ugello LDC11001, delle gocce più piccole ed un coverage factor maggiore o uguale a quello ottenuto con l'ugello AFC11001.

Queste considerazioni portano alla decisione di montare due ugelli di tipo LDC11001 esternamente sul circuito a tre ugelli.

5.2 DESCRIZIONE PROVE SPERIMENTALI

Definito il circuito, si realizza una struttura in legno che possa simulare le dimensioni del vigneto visto nel capitolo introduttivo e che possa sostenere i fogli di carta fotografica impiegati nell'attività sperimentale.

L'irrorazione avviene su un foglio di carta fotografica posizionato orizzontalmente sotto l'ugello centrale e su un foglio di carta fotografica posizionato verticalmente a raccogliere il colorante irrorato da uno dei due ugelli laterali. Vengono studiati solo due dei tre ugelli per via della simmetria del sistema.

Nell'immagine 5-5 è possibile osservare il sistema appena descritto e definire la variabile h utilizzata per valutare la sovrapposizione del getto centrale e di quello laterale. Si definisce h come la distanza tra l'inizio dell'impronta prodotta dal getto laterale e l'intersezione del foglio orizzontale con il verticale; questa distanza è presa con segno positivo se il getto laterale rimane sul foglio verticale, altrimenti con segno negativo. Ogni prova sperimentale avrà un determinato valore di h che potrà dare un'idea all'agricoltore su come modificare i parametri geometrici del drone al fine di ottenere un'irrorazione più congeniale al trattamento da eseguire.

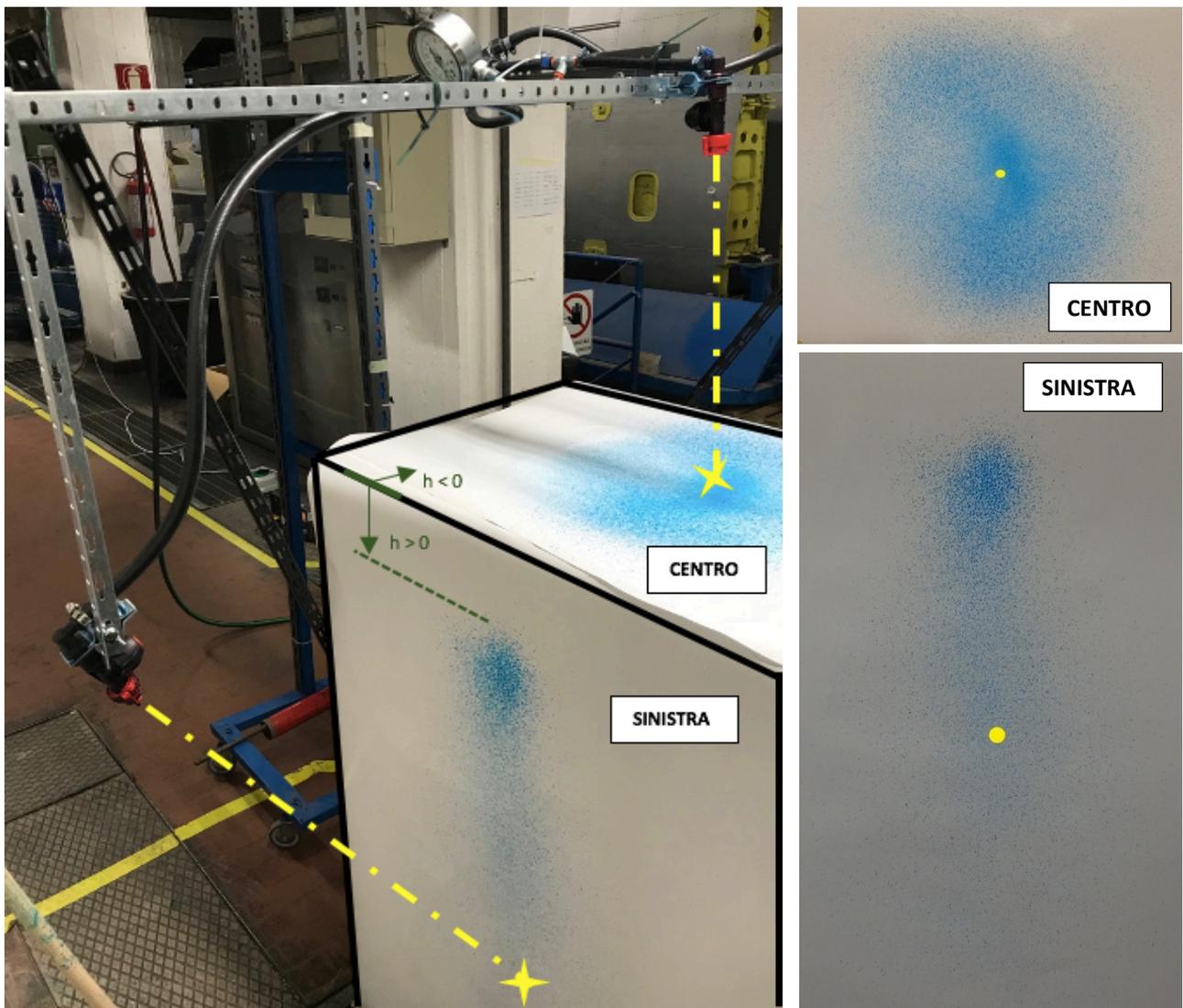


Figura 5-5 Sinistra) Circuito a tre ugelli e simulatore di vigneto; Destra-alto) risultato dell'irrorazione sul foglio orizzontale (in giallo il centro); Destra-basso) risultato dell'irrorazione sul foglio verticale (in giallo il centro)

Nella figura 5-6 è riportato un esempio di h negativo, a sinistra, e uno di h positivo, a destra. Dalla foto di sinistra si vede chiaramente come per valori di h negativi l'impronta del getto laterale vada a finire sulla carta fotografica posizionata orizzontalmente. Al contrario, quando h è positivo, come nella figura di destra, il getto laterale rimane sulla carta posizionata verticalmente.



Figura 5-6 Sinistra) esempio di prova con $h < 0$; Destra) esempio di prova con $h > 0$.

Le prove sperimentali descritte sono eseguite variando alcuni parametri geometrici del circuito e la tipologia di ugello usato centralmente: LDC11001 oppure HCF80015.

Facendo riferimento alla figura 5-7, i parametri geometrici su cui si opera sono:

- angolo A : angolo di inclinazione degli ugelli laterali rispetto all'orizzontale;
- distanza d : distanza tra gli ugelli laterali e la parete laterale del vigneto, questa distanza è limitata superiormente dalle dimensioni del drone.

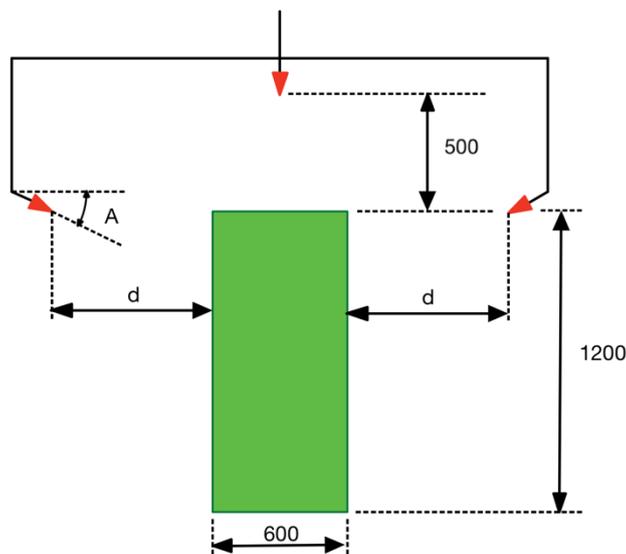
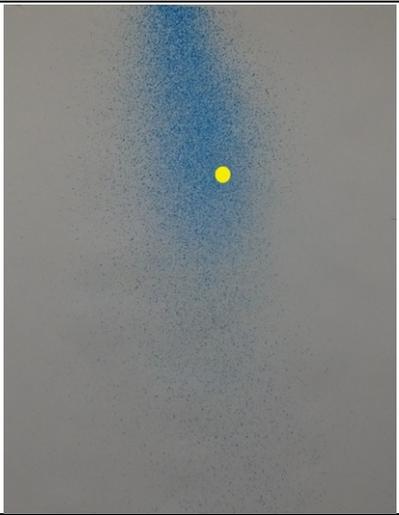
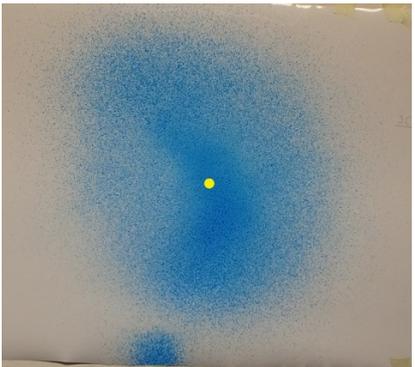
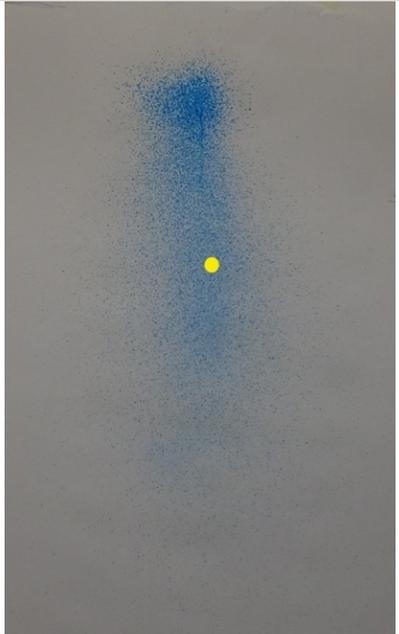
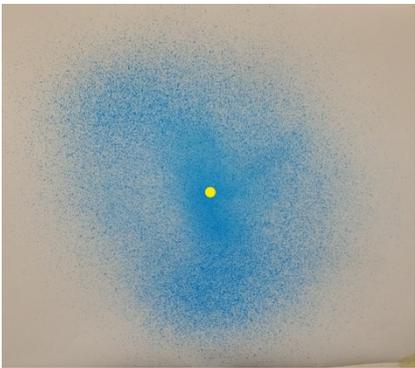


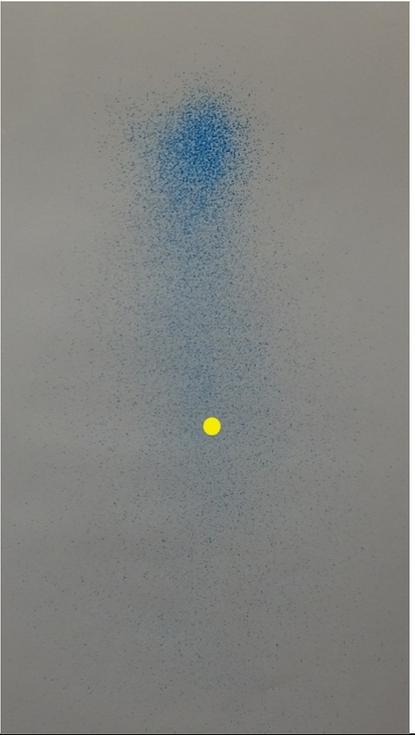
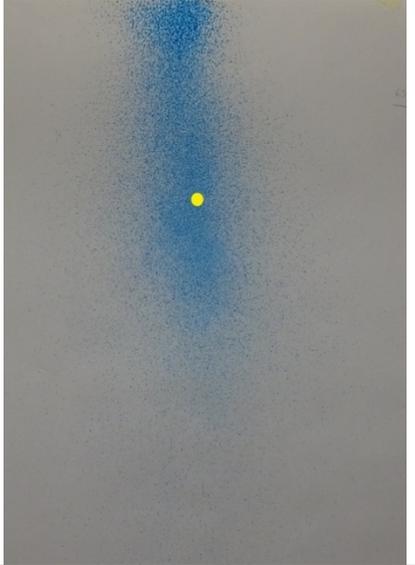
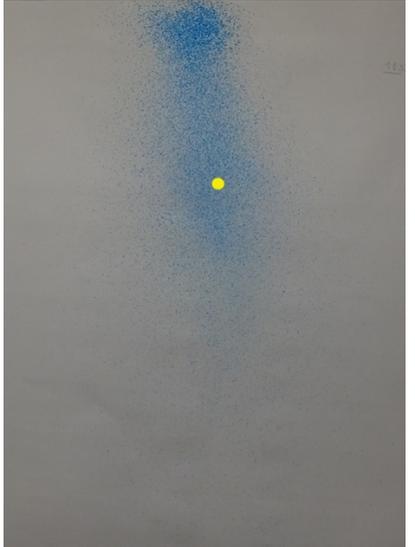
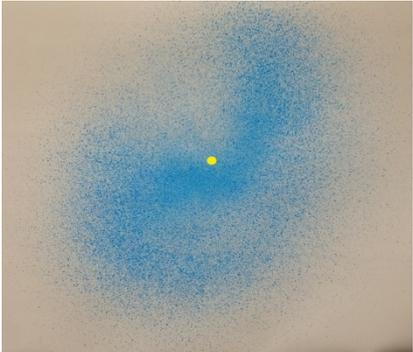
Figura 5-7 Schema della vista frontale del simulatore di vigneto e del circuito a tre ugelli.

5.3 RISULTATI DELL'ATTIVITA' SPERIMENTALE

Tutte le prove sono state eseguite ad una pressione di 3 bar, nella tabella 5-1 si riportano input e output delle varie prove.

Si ricorda che il modello di vigneto adottato è un parallelepipedo ma nella realtà le foglie non sono così folte da rendere il modello del tutto fedele. Questo significa che il getto superiore non rimarrà confinato alle foglie superiori ma avrà un certo grado di penetrazione, per cui si ritengono migliori le prove che mostrano un valore di h positivo: ovvero le prove in cui gli ugelli laterali privilegiano l'irrorazione della parte bassa della vite, lasciando all'ugello centrale il compito di irrorare la parte alta della pianta.

UGELLO SINISTRO	UGELLO CENTRALE	DATI PROVA INPUT	DATI PROVA OUTPUT	ugelli
		<p>d [mm]:350</p> <p>A [°]: 45</p> <p>t [s]: 0.7</p> <p>numero prova: 3</p>	<p>h [mm]: -62.7</p>	<p>Sinistra: LDC11001</p> <p>Centro: HCF80015</p> <p>Destra: LDC11001</p>
		<p>d [mm]:350</p> <p>A [°]: 60</p> <p>t [s]: 0.6</p> <p>numero prova: 4</p>	<p>h [mm]: 73.9</p>	<p>Sinistra: LDC11001</p> <p>Centro: HCF80015</p> <p>Destra: LDC11001</p>

		<p>d [mm]:450</p> <p>A [°]: 60</p> <p>t [s]: 0.45</p> <p>numero prova: 5</p>	<p>h [mm]: 104.2</p>	<p>Sinistra: LDC11001</p> <p>Centro: HCF80015</p> <p>Destra: LDC11001</p>
		<p>d [mm]:450</p> <p>A [°]: 45</p> <p>t [s]: 0.65</p> <p>numero prova: 6</p>	<p>h [mm]: -32.2</p>	<p>Sinistra: LDC11001</p> <p>Centro: HCF80015</p> <p>Destra: LDC11001</p>
		<p>d [mm]:450</p> <p>A [°]: 53</p> <p>t [s]: 0.6</p> <p>numero prova: 11</p>	<p>h [mm]: -12.4</p>	<p>Sinistra: LDC11001</p> <p>Centro: HCF80015</p> <p>Destra: LDC11001</p>

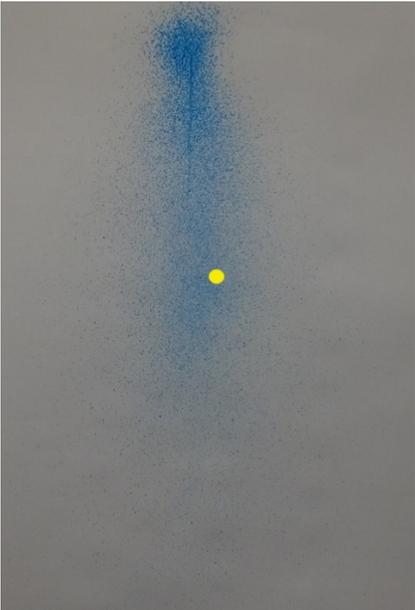
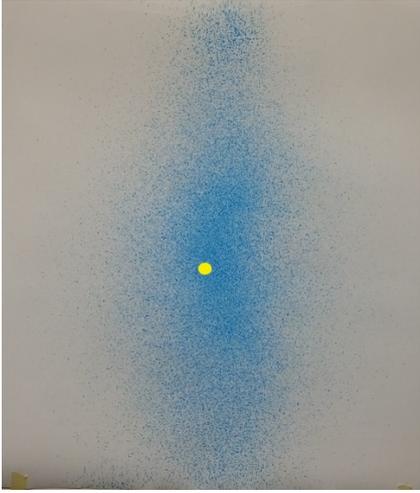
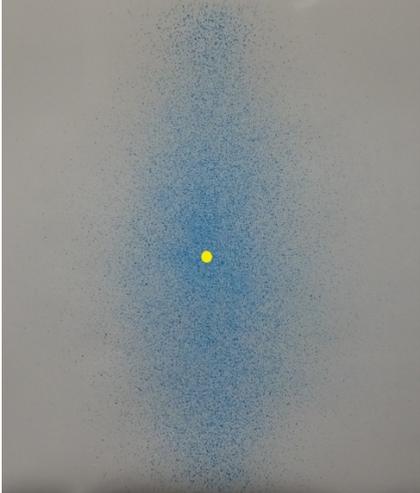
		d [mm]:450 A [°]: 45 t [s]: 0.36 numero prova: 8	h [mm]: 6.1	Sinistra: LDC11001 Centro: LDC11001 Destra: LDC11001
		d [mm]:450 A [°]: 60 t [s]: 0.39 numero prova: 9	h [mm]: 130.5	Sinistra: LDC11001 Centro: LDC11001 Destra: LDC11001

Tabella 5-1 Panoramica sulle prove con circuito a tre ugelli

Come prevedibile, quando si aumenta la distanza d dei droni laterali dalla superficie laterale del simulatore di vigneto e quando si aumenta l'angolo di inclinazione A dell'ugello rispetto all'orizzontale la distanza h aumenta e il getto laterale si disaccoppia dal getto centrale.

Le tipologie di trattamenti della pianta di vite sono tante e possono avere esigenze diverse, tuttavia, volendo scegliere un setup ideale del drone si ritiene opportuno quindi usare una distanza d pari a 450 mm e un angolo A pari a 60° per massimizzare l'altezza della vite coperta dall'irrorazione tenendo conto dell'irrorazione diretta degli ugelli laterali e della parte di fluido che penetra dal getto dell'ugello centrale.

6 CIRCUITO CON VASO DI ESPANSIONE

In questa sezione si propone una modifica al circuito studiato fino ad ora al fine di aumentare la stabilità del drone a fronte dei moti di sloshing del liquido che avvengono nel serbatoio ed anche al fine di aumentare l'autonomia del drone o di usare un drone meno prestante e quindi più economico. La modifica consiste nell'eliminare il peso della pompa, della relativa batteria e del serbatoio e sostituire tutti questi componenti con un vaso di espansione caricato quando il drone è a terra.

Il vaso di espansione non è altro che un involucro separato in due parti da una membrana espandibile, una di queste due parti è precaricata con aria compressa ad una pressione pari a 2 bar, l'altra è riempita con il prodotto fitosanitario quando il drone è a terra. La pressione dell'aria compressa blocca i moti del fluido che renderebbero instabile il drone e sostituisce la pompa in fase di irrorazione.

Mentre la pressione dell'aria compressa deve essere ripristinata solo quando ci sono delle leggere perdite di pressione, il prodotto fitosanitario deve essere ricaricato ad ogni volo del drone mediante una pompa.

Inoltre, per garantire una pressione costante a monte dell'ugello e per poter scegliere tale pressione, è montato un riduttore di pressione a valle del vaso di espansione e a monte degli ugelli.

Nella foto 6-1 è possibile osservare il primo circuito messo a punto per la sperimentazione e alcuni suoi dettagli, questo circuito non è quello che andrebbe posizionato sul drone, ma il circuito completo anche della parte di ricarica del prodotto fitosanitario.

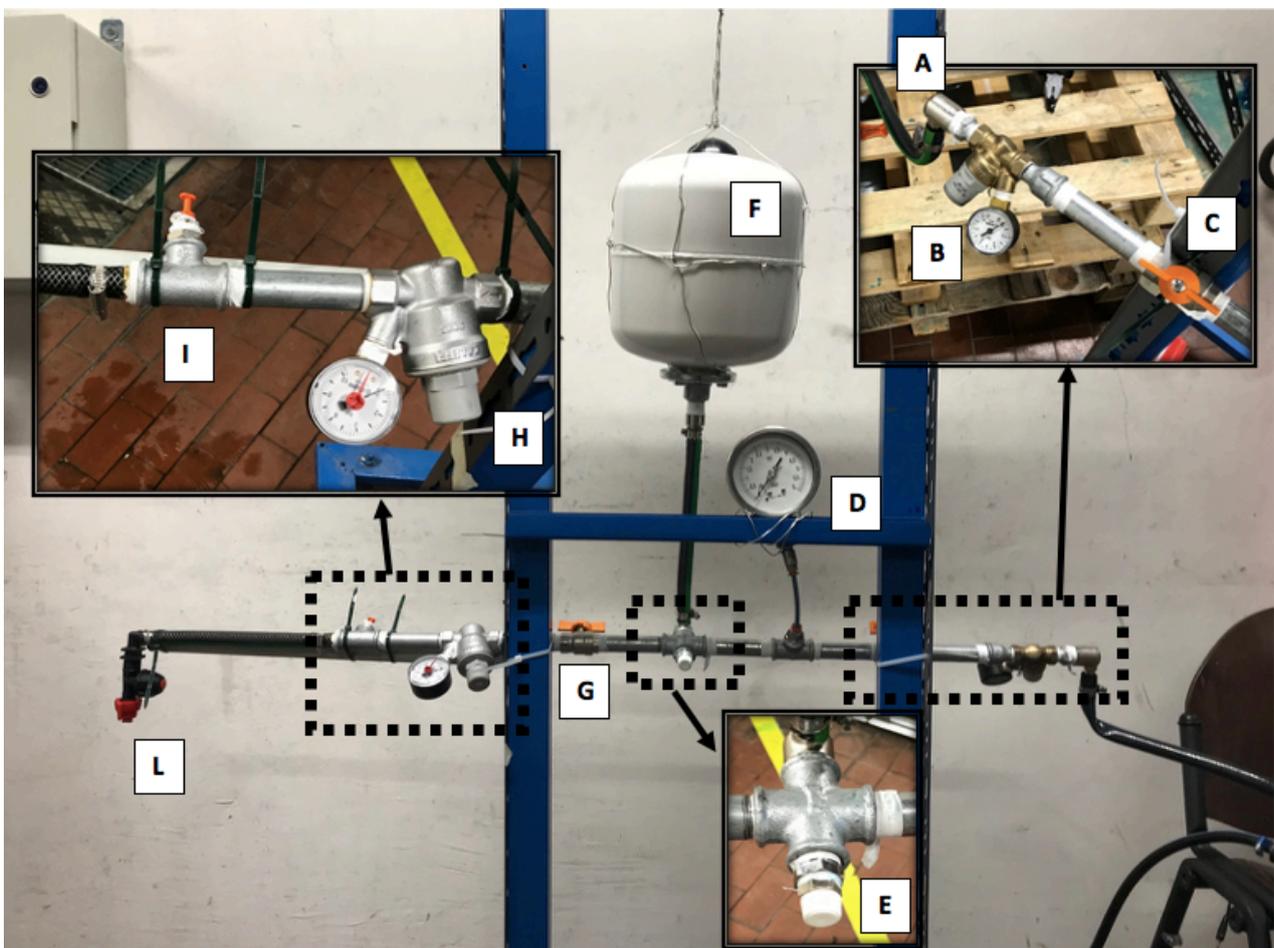
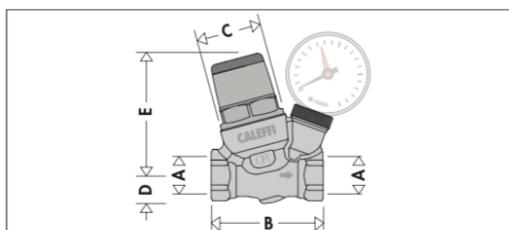


Figura 6-1 Circuito con vaso di espansione

Attraverso la foto 6-1 si procede alla descrizione del circuito, partendo da destra si trovano i seguenti componenti:

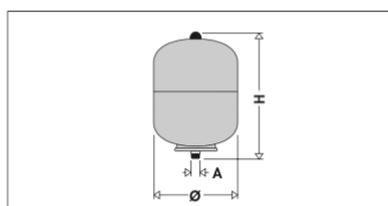
- A. Raccordo che permette di agganciare il circuito alla mandata della pompa;
- B. Riduttore di pressione I: consente di caricare il vaso di espansione ad una pressione inferiore rispetto a quella della pompa; il riduttore usato è della Caleffi® ed appartiene alla serie 5332 (modello 533230H): riduttore di pressione inclinato con manometro. Il campo di taratura della pressione a valle è 0,8 bar – 4 bar.



Codice	DN	A	B	C	D	E	Massa (Kg)
533430H	8	3/8"	52	Ø32	14	57,5	0,19
533230H	8	3/8"	52	Ø32	14	57,5	0,24

Figura 6-2 Riduttore di pressione 533230H, Caleffi

- C. Rubinetto: consente di disaccoppiare la parte di ricarica del serbatoio, descritta nei punti precedenti e che rimarrebbe a terra, dalla parte che andrebbe effettivamente sul drone nel progetto finale. Su un drone questo rubinetto sarebbe preceduto da un raccordo rapido che consentirebbe l'attacco e il distacco rapido dal circuito di ricarica del prodotto fitosanitario;
- D. Manometro analogico: consente di leggere la pressione del liquido sia in fase di ricarica del vaso di espansione che in fase operativa;
- E. Valvola di sfiato: come accade per un termosifone, potrebbe essere necessario eliminare delle bolle d'aria dal vaso di espansione quando il vaso viene riempito di liquido;
- F. Vaso di espansione: 'dispositivo atto alla compensazione dell'aumento di volume dell'acqua dovuto all'innalzamento della temperatura della stessa, sia negli impianti di riscaldamento che in quelli di produzione di acqua calda sanitaria. Essi vengono utilizzati anche come autoclavi negli impianti di distribuzione idrosanitari' (cit. Caleffi catalogo). Il vaso di espansione utilizzato è della Caleffi® ed è della serie 5557: vaso d'espansione saldato per impianti idrosanitari certificato CE. Ha un volume di 8 litri, per cui è identificabile dal numero 555708. Nelle figure che seguono si riportano alcune delle caratteristiche tecniche.



Codice	Litri	A	Ø	H	Massa (kg)
555702	2	1/2"	120	240	1,0
555705	5	3/4"	175	275	1,5
555708	8	3/4"	230	305	2,1



Figura 6-3 Vaso di espansione 555708, Caleffi

Caratteristiche tecniche

serie	556	568	5557
Materiali:			
Corpo:	acciaio	acciaio	acciaio
Membrana:	SBR	8÷33 l, butile 50÷500 l, EPDM	2÷8 l, butile
Tipo di membrana:	a diaframma	a vescica (sostituibile per volumi da 60 a 500 l)	a vescica
Attacco alla tubazione:	acciaio zincato	acciaio zincato	acciaio zincato
Protezione attacco alla tubazione:	-	8÷33 l, inserto in materiale plastico 50÷500 l, rivestimento epossidico	inserto in materiale plastico
Colore:	grigio	blu	bianco
Prestazioni:			
Fluido d'impiego:	acqua, soluzioni glicolate	acqua	acqua
Max percentuale di glicole:	50%	non applicabile	non applicabile
Pressione max d'esercizio:	6 bar	10 bar	10 bar
Pressione di precarica:	1,5 bar	2,5 bar	2,5 bar
Campo di temperatura sistema:	-10÷120°C	-10÷70°C	-10÷100°C
Campo di temperatura membrana:	-10÷70°C	-10÷70°C	-10÷100°C
Costruzione:	conforme a DIN 4807-2 ed EN 13831	conforme a DIN 4807-2 ed EN 13831	conforme a EN 13831
Utilizzo:	riscaldamento	sanitario, autoclave conforme D.M. 6 Aprile 2004, n. 174	sanitario conforme D.M. 6 Aprile 2004, n. 174
Attacchi:			
Attacco alla tubazione:	8÷50 l; 3/4" M (EN 10226-1) 80÷600 l; 1" M (EN 10226-1)	8÷33 l; 3/4" M (ISO 228-1) 50÷100 l; 1" M (ISO 228-1) 200÷500 l; 1 1/4" M (ISO 228-1)	2 l; 1/2" M (ISO 228-1) 5 e 8 l; 3/4" M (ISO 228-1)

Figura 6-4 Scheda tecnica vaso di espansione 555708, Caleffi

- G. Rubinetto: chiuso nella fase di ricarica del serbatoio ed aperto quando bisogna irrorare il vigneto;
- H. Riduttore di pressione II: utilizzato per selezionare la pressione a cui irrorare il prodotto fitosanitario e per mantenerla costante almeno fino a quando la pressione del liquido nel vaso di espansione sarà superiore alla pressione impostata sullo stesso riduttore; il riduttore usato è della Caleffi® ed appartiene alla serie 5332 (modello 533241): riduttore di pressione inclinato con manometro. Il campo di pressione di taratura a valle è 1 bar – 6 bar.

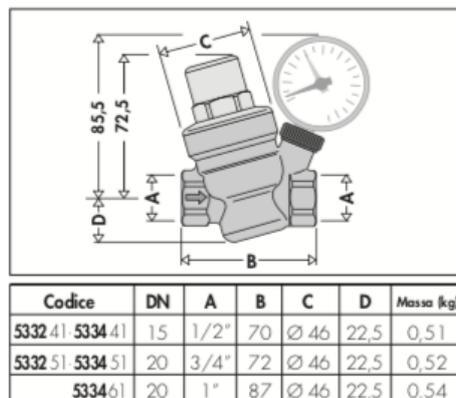


Figura 6-5 Riduttore di pressione 533241, Caleffi

- I. Tappo: da sostituire in futuro con trasduttore di pressione per monitorare l'andamento di pressione a monte dell'ugello, per ora letta attraverso il manometro analogico presente sul riduttore di pressione II in uscita dallo stesso;
- L. Ugello: per ora singolo, ma in futuro ampliabile alla casistica con tre ugelli agenti in contemporanea.

Per l'attività sperimentale si è deciso di riempire la parte liquida del vaso di espansione a 2,5 bar, e di lasciare la pressione dell'aria compressa a 2 bar, come già precaricato dal venditore del vaso di espansione. Inoltre, si è scelto di impostare la pressione di irrorazione dell'ugello, e quindi la pressione di uscita dal riduttore di pressione II, a 2 bar.

Durante la prova si è osservata una pressione a monte dell'ugello pari a 2 bar e costante fino a quando la pressione del serbatoio è rimasta sopra alla stessa pressione (2 bar). L'idea iniziale di sostituire pompa, batteria della pompa e serbatoio con vaso di espansione e riduttore di pressione risulta valida e perseguibile per uno sviluppo futuro.

Nella foto 6-6 si mostra la prova effettuata su carta fotografica con un ugello WRC110015 e ad una pressione pari a 2 bar. Si è scelto questo ugello perché la pressione di irrorazione, come suggerito dal catalogo del produttore (inserire citazione), ricade nell'intervallo di funzionamento ottimale dell'ugello.



Figura 6-6 Prova con circuito con vaso di espansione, pressione di irrorazione 2 bar, ugello WRC110015

Come per molte delle analisi precedentemente effettuate, la prova viene esaminata attraverso dei ritagli equidistanti e ordinati lungo la direzione del getto, come mostrato nella figura 6-7.

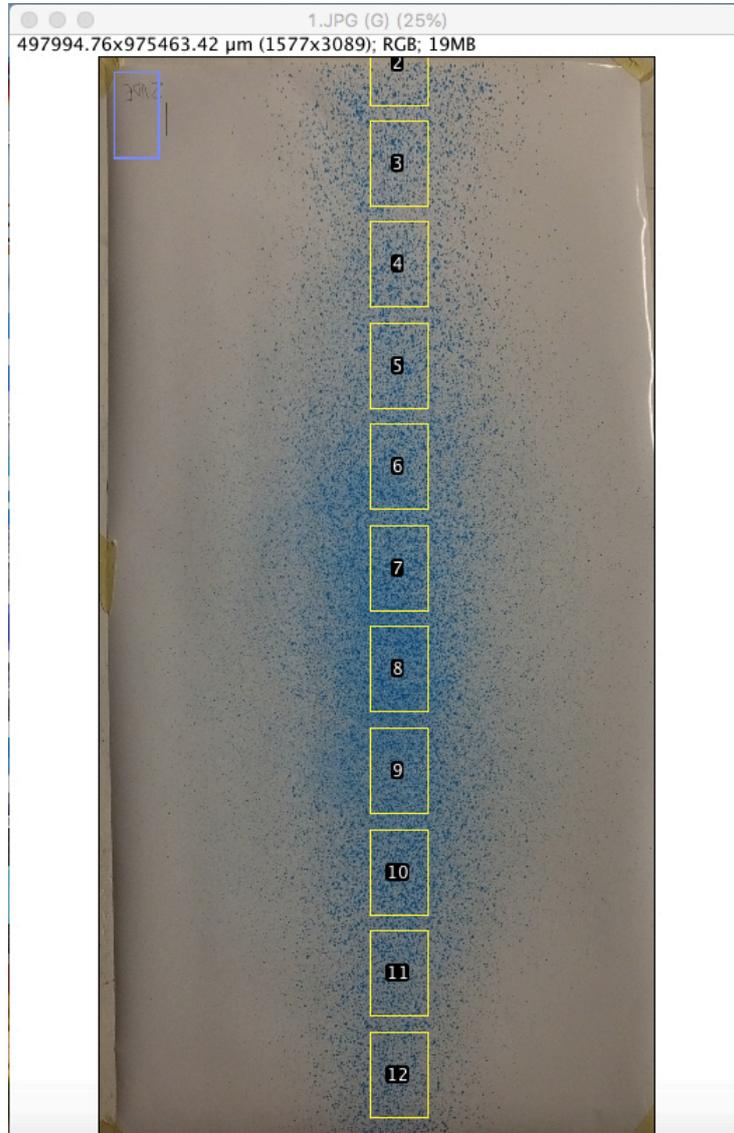


Figura 6-7 Prova con circuito con vaso di espansione, pressione di irrorazione 2 bar, ugello WRC110015: ritagli selezionati

I ritagli presi in considerazione per l'analisi vanno dal numero 3 al numero 12, ricordando, come per le analisi precedenti, che il numero 7 costituisce il ritaglio centrale. I risultati ottenuti sono mostrati nella figura 6-8.

Prova	ritaglio	VMD [μm]	coverage [-]	RS [-]	NMD [μm]	unit deposit [μL cm ⁻²]	droplet density [droplets cm ⁻²]
1	3	566.1741	0.24955	0.43613	497.0884	5.5345	8.0868e-08
1	4	588.9549	0.24879	0.41893	488.7754	5.2393	7.6183e-08
1	5	580.2955	0.28183	0.45292	460.5548	5.6955	9.2949e-08
1	6	598.3784	0.36702	0.44262	497.0884	6.6058	9.2949e-08
1	7	616.6321	0.42615	0.42329	504.9504	7.8092	1.0084e-07
1	8	602.1708	0.45228	0.42606	497.0884	7.259	1.0232e-07
1	9	580.2955	0.36936	0.43288	470.5772	8.1544	1.2845e-07
1	10	637.5096	0.35905	0.40498	488.7754	7.8577	1.0207e-07
1	11	577.1593	0.27974	0.45164	455.1779	6.5993	1.075e-07
1	12	561.1241	0.24566	0.46253	449.801	5.9723	1.0503e-07

Figura 6-8 Prova con circuito con vaso di espansione, pressione di irrorazione 2 bar, ugello WRC110015: risultati

Nella figura 6-9 è mostrato il confronto tra i risultati ottenuti con il circuito iniziale, dotato di pompa, e il nuovo circuito, in cui la pompa è sostituita dal drone. I risultati hanno stesso ordine di grandezza ma non del tutto simili. Queste differenze però potrebbero essere dovute al tempo di irrorazione differente e all'intrinseca variabilità del fenomeno fisico.

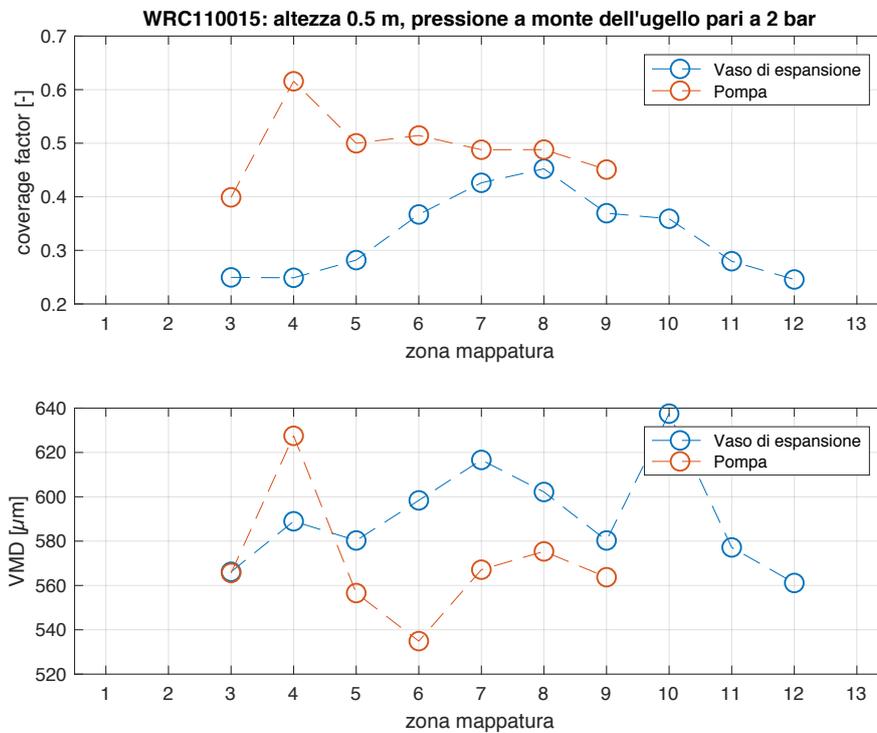


Figura 6-9 Prova con circuito con vaso di espansione, pressione di irrorazione 2 bar, ugello WRC110015: confronto con la relativa prova effettuata con il circuito con pompa

Come già detto in precedenza, uno dei vantaggi di questa soluzione circuitale è la limitazione totale dei moti di sloshing del fluido nel serbatoio che renderebbero instabile il volo del drone.

Un'altra soluzione atta a limitare questi moti del fluido potrebbe essere quella di adottare un serbatoio con paratie come quelli usati sulle autocisterne per il trasporto di liquidi, tuttavia, adottando quest'altra soluzione non si avrebbe l'altro vantaggio, ovvero quello di abbassare la massa del nuovo circuito rispetto a quello iniziale. Nella tabella 6-1 si esegue un bilancio delle masse risparmiate e di quelle aggiunte rispetto al circuito con la pompa.

RISPARMIATI		AGGIUNTI	
componente	massa [kg]	componente	massa [kg]
pompa	2,7	vaso di espansione	2,1
serbatoio	0,4	riduttore di pressione	0,51
batteria pompa	0,85		

Tabella 6-1 Stima masse risparmiate e aggiunte al circuito con vaso di espansione

Le masse di pompa, vaso di espansione e riduttore di pressione sono prese da catalogo. Già considerando solo questi componenti è chiaro che ci sia un risparmio di massa. In più vengono stimate le masse di serbatoio e batteria della pompa. Tra gli svantaggi della soluzione circuitale c'è sicuramente quello di dover utilizzare una pompa per caricare di prodotto fitosanitario il vaso di espansione. Inoltre, bisognerebbe trovare un raccordo rapido che consenta di attaccare velocemente la pompa al circuito del drone senza perdite.

In definitiva la soluzione circuitale dotata di vaso di espansione risulta perseguibile e degna di ulteriori approfondimenti.

7 GUIDA ALLA LETTURA DEI GRAFICI

Nell'arco dei vari capitoli della tesi sono stati riportati diversi risultati in forma grafica, si inizia con i risultati delle prove ad un ugello che irrorava un foglio di carta fotografica posizionato orizzontalmente. I risultati medi di VMD (*volumetric median diameter*), NMD (*numeric median diameter*), *coverage factor*, RS (*relative span*), *droplet density* e *unit deposit* sono stati ottenuti attraverso l'analisi di 20 ritagli presi in posizione casuale rispetto al centro della prova.

I primi quattro parametri (VMD, NMD, *coverage factor* e RS) sono graficati nelle figure 4-42, 4-46 e 4-50 quando si usano rispettivamente gli ugelli AFC11001, LDC11001 e WRC110015. In questi grafici le suddette grandezze sono rappresentate bloccando a volte la pressione e facendo variare l'altezza e a volte l'altezza facendo variare la pressione a seconda del titolo del subplot.

Invece, la *droplet density* è visibile nelle figure 4-43, 4-47 e 4-51 a seconda che l'ugello sia rispettivamente un AFC11001, un LDC11001 o un WRC110015. Questi grafici utilizzano mappe di colore per rappresentare i risultati in funzione di due variabili: pressione di irrorazione e altezza dell'ugello. Anche lo *unit deposit* è rappresentato con la stessa tipologia di grafico, per consultare lo *unit deposit* degli ugelli AFC11001, LDC11001 e WRC110015 si può fare riferimento rispettivamente alle figure 4-44, 4-48 e 4-52.

Si passa ai risultati delle stesse prove i cui ritagli analizzati sono però stati presi in posizione fissa rispetto al centro e non mediati ma confrontati zona per zona. Si riportano in seguito i numeri delle figure in cui si fissa l'altezza dell'ugello rispetto alla carta fotografica e si fa variare la pressione per ottenere VMD e *coverage factor*, i risultati sono riportati anche in funzione della posizione della zona selezionata (ascissa del grafico):

- per l'ugello AFC11001 sono consultabili le figure 4-59, 4-60 e 4-61 in cui l'altezza dell'ugello rispetto alla carta fotografica è bloccata rispettivamente a 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m;
- per l'ugello LDC11001 sono consultabili le figure 4-65, 4-66 e 4-67;
- per l'ugello WRC110015 sono consultabili le figure 4-71, 4-72 e 4-73.

Fissata invece la pressione, si fa variare l'altezza dell'ugello rispetto alla carta fotografica:

- per l'ugello AFC11001 sono consultabili le figure 4-62, 4-63 e 4-64 in cui la pressione di irrorazione dell'ugello è bloccata rispettivamente a 1,5 bar, 3 bar e 4 bar;
- per l'ugello LDC11001 sono consultabili le figure 4-68, 4-69 e 4-70 in cui la pressione di irrorazione dell'ugello è bloccata rispettivamente a 1 bar, 3 bar e 4 bar;
- per l'ugello WRC11001 sono consultabili le figure 4-74, 4-75, 4-76 e 4-77 in cui la pressione di irrorazione dell'ugello è bloccata rispettivamente a 1 bar, 2 bar, 3 bar e 4 bar.

Nella figura 4-78 è invece visibile un confronto tra i risultati di alcune prove a singolo ugello effettuate ad una pressione di irrorazione pari a 3 bar e ad una distanza ugello-foglio pari ad 1 m. Il foglio è posizionato orizzontalmente e nella figura appaiono i grafici di VMD e *coverage factor* in funzione della zona del ritaglio e della tipologia di ugello.

I risultati delle prove di irrorazione a singolo ugello e foglio di carta fotografica posizionato verticalmente sono riportati nella figura 5-4 in cui è possibile confrontare zona per zona (analisi di ritagli scelti in modo ordinato rispetto al centro della prova) i *coverage factor* e i VMD degli ugelli AFC11001 e LDC11001 per una prova con pressione di irrorazione a 3 bar, angolo dell'ugello rispetto all'orizzontale di 45° e distanza foglio ugello misurata orizzontalmente pari a 400 mm.

Le prove a tre ugelli possono essere consultabili dalla tabella 5-1, in cui si riportano le foto della parte superiore di un simulatore di vigneto costituito da carta fotografica e la foto di uno dei due lati dello

stesso simulatore. Nella stessa tabella si riportano i parametri geometrici di input come l'angolo dell'ugello laterale rispetto all'orizzontale e la distanza (misurata in orizzontale) dell'ugello dalla parete verticale del simulatore di vigneto. L'output è invece un parametro h che misura la distanza dell'inizio del getto provocato dall'ugello laterale dallo spigolo del simulatore di vigneto: questa grandezza è indice della sovrapposizione dei getti laterali e di quello superiore.

8 CONCLUSIONI

Nella prima parte dello studio è stata realizzata una mappatura dei risultati per prove di irrorazione statiche eseguite a singolo ugello e per diversi set di pressione a monte dell'ugello, altezza dell'ugello rispetto alla superficie da irrorare e di tipologia di ugello, scelto tra gli ugelli a ventaglio AFC11001, LDC11001 e WRC110015. Confrontando i diametri volumetrici mediani ottenuti (VMD) dall'attività sperimentale con quelli forniti da catalogo si è osservata una sovrastima dei primi rispetto ai secondi dovuta probabilmente sia al carattere statico dei test eseguiti in laboratorio che alla diversa rilevazione della grandezza delle gocce. Infatti, la normativa di riferimento prevede il riconoscimento delle particelle mediante tecniche di rilevazione mediante laser, mentre il metodo adottato consiste nell'analizzare le gocce sui fogli di carta fotografica irrorati da una soluzione di acqua e colorante. Questa seconda tipologia di analisi ha portato inevitabilmente alla sovrapposizione di gocce su carta, che talvolta sono state interpretate dal software di image processing come un'unica goccia dalle dimensioni più grandi. Inoltre, le irrorazioni non hanno avuto tutte la stessa durata, per cui, talvolta, la quantità di gocce irrorata sulla carta fotografica è stata maggiore. Per uniformare questo secondo aspetto si potrebbe pensare di eseguire delle prove dinamiche anziché statiche, in cui il circuito idraulico dovrebbe essere movimentato rispetto alla carta fotografica bersaglio dell'irrorazione alla stessa velocità con cui si sposterebbe il drone in vigneto.

I risultati dell'ugello AFC11001 cambiano poco aumentando la pressione di irrorazione da 3 a 4 bar, per cui si consiglia di lavorare ad una pressione di 3 bar per poter incrementare il tempo in cui il serbatoio si svuoterebbe e diminuire il peso della pompa da utilizzare e della relativa batteria. La stessa considerazione può essere fatta osservando i risultati dell'ugello LDC11001 e dell'ugello WRC110015. Confrontando i risultati dei vari ugelli ad una distanza media dall'ugello pari ad 1 m e ad una pressione intermedia tra quelle esaminate pari a 3 bar si evince che l'ugello che assicura migliore copertura è il WRC110015 mentre quello che assicura una dimensione minore delle gocce è l'ugello LDC10001. Un buon compromesso tra alto fattore di copertura e dimensione ridotta delle gocce può essere rappresentato proprio dall'utilizzo dell'ugello LDC11001 che ha un fattore di copertura lievemente inferiore rispetto all'ugello WRC110015 ma che garantisce una dimensione delle gocce nettamente inferiore rispetto alle altre due soluzioni.

L'analisi sulle varie prove è stata condotta seguendo due diversi approcci:

- selezionando 20 ritagli della prova originale. I ritagli, di forma fissata e posizione ogni volta casuale rispetto al centro della prova, sono stati studiati in termini di *coverage factor* e *volumetric median diameter* e i risultati ottenuti dai vari ritagli mediati per ottenere un confronto tra grandezze medie;
- selezionando 13 ritagli della stessa forma rispetto ai precedenti ma con una posizione fissa rispetto al centro della prova e tutti con centro sulla stessa retta immaginaria. I risultati ottenuti non sono stati mediati ma il confronto tra i risultati delle varie prove è avvenuto in ogni posizione precedentemente fissata rispetto al centro.

Il secondo approccio è quello da considerare più valido perché non riduce il confronto tra le prove al confronto di grandezze medie ma confronta le prove in varie posizioni così da considerare la non uniformità delle prove nello spazio.

Dunque, si è passati a studiare un circuito montante tre ugelli. Si sono ottimizzati i parametri geometrici del circuito al fine di ottenere un'irrorazione uniforme su tutto il simulatore di vigneto.

Gli ugelli ritenuti più adatti ad essere montati lateralmente sul circuito a tre ugelli sono gli LDC11001, che danno risultati migliori rispetto agli altri sia per valori di copertura che di dimensione delle gocce anche quando si effettuano prove di irrorazione su un foglio di carta fotografica posizionato verticalmente. Si ricorda che gocce troppo piccole sarebbero soggette alla deriva del vento, che le farebbe allontanare dal bersaglio del trattamento e creerebbe dei problemi di carattere ambientale. Inoltre, non potrebbero nemmeno essere troppo grosse, infatti scivolerebbero dalle foglie per finire sul terreno. In questo studio è stato trascurato l'effetto che la turbolenza creata dai rotori del drone produrrebbe sulla penetrazione delle gocce, da altri studi presenti in letteratura è noto che essa ha un effetto benefico sia perché facendo muovere le foglie della vite la penetrazione aumenterebbe e sia perché i getti laterali verrebbero soffiati verso le foglie della pianta, questo potrebbe compensare almeno parzialmente l'allargamento del getto che si osserva dai risultati ottenuti per i vari ugelli quando si passa da una distanza dall'ugello di irrorazione pari a 0,5 m ad una distanza pari ad 1,5 m. Come già detto nel capitolo 5.3 il setup consigliato per massimizzare la copertura di un vigneto da parte di un drone montante un circuito a tre ugelli è rappresentato da un angolo di 60° degli ugelli laterali rispetto all'orizzontale e da una distanza misurata orizzontalmente tra l'ugello laterale e la parete verticale del simulatore del vigneto pari a 450mm. Questa decisione è stata presa tenendo conto del fatto che una parte di fluido irrorata dall'ugello centrale penetrerebbe verticalmente andando a coprire la parte alta delle pareti verticali del vigneto.

Le prove con il circuito a tre ugelli sono state tutte eseguite ad una pressione di irrorazione pari a 3 bar, centralmente si ritiene opportuno l'utilizzo di un ugello a ventaglio LDC11001.

Come tutti i serbatoi contenenti liquidi e movimentati, anche in questo caso si manifesta il fenomeno dei moti di sloshing. Per evitare questo problema si potrebbero usare dei serbatoi divisi da paratie (anti-sloshing), tuttavia si è studiata la possibilità di usare un vaso di espansione in sostituzione del serbatoio. Il vaso di espansione, caricato da una parte di miscela fitoiatrica e dall'altra da aria compressa, dovrebbe limitare questi moti e mettere in pressione il fluido. Il circuito idraulico montato sul drone non avrebbe più bisogno della pompa visto che il fluido sarebbe messo in pressione dall'aria compressa. Si è osservato che con questa tipologia di circuito si riescono a ottenere pressioni a monte dell'ugello costanti per un buon intervallo di tempo quando l'uso del vaso di espansione è abbinato a quello di un riduttore di pressione posizionato a monte dell'ugello. La soluzione risulta quindi degna di ulteriore approfondimento visto che oltre a limitare i moti di sloshing del liquido nel vaso di espansione è possibile ridurre il carico sul drone e quindi aumentare l'autonomia dello stesso sostituendo pompa, relativa batteria e serbatoio con un vaso di espansione ed un riduttore di pressione.

9 Bibliografia

1. *Neurological effects of pesticide use among farmers in China*. **Li et al.** 2014, International Journal of Environmental Research and Public Health.
2. **Persico Marco, Raparelli Terenziano, Eula Gabriella, Pepe Giuseppe**. Studio e progetto di un banco prova per irrorazione di pesticidi in vigneto tramite droni. s.l. : Politecnico di Torino, Ottobre 2020.
3. **Filippi Nicolò, Raparelli Terenziano, Eula Gabriella, Pepe Giuseppe, Ivanov Alexandre**. Studio di sistemi di irrorazione di vitigni mediante droni con particolare riferimento al circuito idraulico/pneumatico utilizzato per la spruzzatura di prodotti fitosanitari. s.l. : Politecnico di Torino, Aprile 2021.
4. **ASJ spray-jet**. *CATALOGUE DC 6010a 2021*. Italia, 2021.
5. **Wilhelm Burger, Mark J.Burge**. *Principles of Digital Image Processing - Fundamental Techniques*. s.l. : Springer.
6. **Tiago Ferreira, Wayne Rasband**. *ImageJ User Guide*. 2012.
7. **Syngenta Crop Protection**. *Water-sensitive paper for monitoring spray distribution*. Basel, Switzerland : s.n.
8. *Comparison of three imaging systems for water-sensitive papers*. **W.C.Hoffmann, A.J.Hewitt**. 2005.
9. *Evaluation of droplet size spectra for agricultural pesticide application using water sensitive paper and image analysis techniques*. **Beyaz et al.** 12A, 2017, Fresenius Environmental Bulletin, Vol. 26, p. 7717-7723.
10. *A model to estimate the spray deposit by simulated water sensitive papers*. **Cerruto et al.** 2019, elsevier.
11. **Conte Antonio, Raparelli Terenziano, Eula Gabriella, Ivanov Alexandre**. Studio ed ottimizzazione di un circuito irroratore di pesticidi in vigneto tramite droni. s.l. : Politecnico di Torino, 7 Aprile 2022.