

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle
Infrastrutture

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il
Territorio**

Progetto di Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi comparativa tra algoritmi per la stima
della velocità del flusso idrico da rilevamenti
fotografici.**



Relatori

Pierluigi Claps

Salvatore Manfreda

Candidato

Matteo Colombaroli

a.a. 2019 - 2020

Indice

Indice delle Tabelle	5
Indice delle Figure	5
Sommario	7
1 Introduzione alle misure di velocità idrauliche indirette	8
1.1 Potenzialità dei metodi ottici	9
1.2 Applicazioni dei metodi ottici.....	10
1.3 Il problema dell'accessibilità in sicurezza.....	13
1.4 UAV.....	14
2 Quadro concettuale	16
2.1 Misure di velocità tramite Fotogrammi	16
2.1.1 Teoria del metodo, PIV e PTV.....	17
2.2 Considerazioni sulla misura delle portate.....	20
2.2.1 Misura delle portate in condizioni di flussi ordinari	20
2.2.2 Misura delle portate in condizioni di flusso intenso	21
2.2.3 Coefficiente di correlazione tra la velocità superficiale e la portata	21
2.3 Uso degli UAV nelle attività di monitoraggio	22
2.3.1 Confronto con altri mezzi di acquisizione di immagini	22
2.3.2 UAV: condizioni vantaggiose di monitoraggio	25
2.3.3 UAV: limiti del metodo.....	25
3 Obiettivi.....	26
4 Metodi.....	27
4.1 Acquisizione in campo del video	27
4.2 Linee guida per l'esecuzione del volo dell'UAV	29
4.3 Pre elaborazione	30
4.3.1 Stabilizzazione	31

4.3.2	Trasformazione in bianco e nero	31
4.3.3	Ricampionamento	33
4.4	Programmi di elaborazione	34
4.4.1	Regione di interesse	35
4.5	PIV_lab	35
4.5.1	Misura della velocità superficiale.....	35
4.6	Fudaa	39
4.6.1	Misura della velocità superficiale.....	39
4.6.2	Ricostruzione della portate	44
4.7	PTV_lab.....	45
4.7.1	Misura della velocità superficiale.....	45
5	Casi studio: Basento e Noce	48
5.1	Basento.....	48
5.1.1	Strumentazione utilizzata nel video del Basento	49
5.1.2	Pre-elaborazioni eseguite sul video	50
5.2	Noce	50
5.2.1	Strumentazione utilizzata nel video del Noce.....	51
5.2.2	Pre-elaborazioni eseguite sul video	52
5.3	Numero di frame e densità di tracciante dei casi studio	52
5.4	Schede Fiumi	53
6	Risultati.....	56
6.1	Valutazione dell'errore.....	56
6.2	Post elaborazione.....	58
6.3	Considerazioni sulle Pre elaborazioni	59
6.4	Parametrazioni nelle analisi	64
6.4.1	Confronto sulla calibrazione dei video casi studio.....	64

6.4.2	Studio della parametrizzazione in PIV_lab	64
6.4.3	Studio della parametrizzazione in Fudaa	67
6.4.1	Analisi con PTV_lab	74
6.4.2	Confronto tra le analisi.....	75
6.5	Risultati delle analisi delle Portate.....	76
7	Discussione.....	78
7.1	Acquisizione dei video in campo	78
7.2	Pre elaborazioni	80
7.3	Considerazioni sui programmi di analisi	81
7.4	Portate.....	82
8	Conclusioni	84
9	Bibliografia	86
9.1	Sitografia	88
A.	Appendice	90
9.2	Stato dell'arte: misura delle portate in un corso d'acqua.....	90
A.1.1	Mulinello	90
A.1.2	Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)	91
A.1.3	Scale di Deflusso.....	92
A.1.4	Radar fisso.....	93
9.3	Stato dell'arte: misura delle velocità superficiali	94
A.1.5	Mulinello ad elica	94
9.3.1	Misura radar per la velocità superficiale (Surface Velocity Radar)	94
9.4	Confronto tra il metodo video rispetto alle altre tipologie.....	95
A.1.6	Mulinello	95
A.1.7	Acoustic Doppler Current Profilers	96
A.1.8	Radar fisso.....	96

A.1.9	Radar “Spalleggiabile”	97
9.5	Schede fiumi Basento e Noce.....	99
9.6	Grafici dei risultati delle analisi	105
A.1.10	Basento:	105
A.1.11	Noce	110

Indice delle Tabelle

2-1 Caratteristiche delle tecniche LSPIV e PTV	19
3-1 Chek list pre volo	30
4-1 Dati d'analisi per il numero di frame minimo dei video casi studio	53
5-1 Coefficienti di calibrazione.....	64
5-2 PIV FTT RMSE	66
5-3 PIV DCC RMSE	66
5-4 Normalizzazione della SA.....	69
5-6Basento: portate calcolate con Fudaa	77
5-6 Noce: portate calcolate con Fudaa	77
A-1 Tabella di confronto tra i metodi.....	98

Indice delle Figure

3-1 Immagine originale in bianco e nero	32
3-2 Immagine dopo la trasformazione.....	32
3-3 Diagramma di flusso dei programmi	35
3-4 finestra di input dei parametri IA e SA in Fudaa.....	43
4-1 Curve interpolati per la stima del numero di frame ottimale per l'analisi PTV in funzone della densità delle particelle	52
5-1 Campo di moto prima della validazione	58
5-2 Campo di moto dopo la validazione	59
5-3 Velocità misurate con Fudaa per il Basento con frame in scala di grigi e bianco e nero	60
5-4 Velocità misurate con PIV_lab per il Basento con frame in scala di grigi e bianco e nero	61
5-5 Errori ottenuti con Fudaa per il basento con frame in scala di grigio e bianco e nero.	61
5-6 Errori ottenuti con PIV_lab per il basento con frame in scala di grigio e bianco e nero	62
5-7 PIV_lab Basento approccio DCC.....	66
5-8 PIV_lab Basento approccio FFT.....	66
5-9 Basento: errore %, IA ; SA<Dx.....	71
5-10 Noce: errore %, IA ; SA<Dx.....	71

5-11 5 7 Basento: errore %, IA ; $Dx < SA < 3Dx$	71
5-12 Noce: errore %, IA ; $Dx < SA < 3Dx$	72
5-13 Basento: errore %, IA ; $3Dx < SA$	72
5-14 Noce: errore %, IA ; $3Dx < SA$	72
5-15 Casi studio: errore %, IA ; $SA < Dx$	73
5-16 Casi studio: errore % variando IA con $Dx < SA < 3Dx$	73
5-17 Casi studio errore %, IA ; $3Dx < SA$	73
5-18 Basento: Errore Percentuale PTV	74
5-19 Noce: Errore Percentuale PTV	74
5-20 Basento: errori percentuali delle analisi.....	75
5-21 Noce: errori percentuali delle analisi.....	75
A-1 Basento IA=100, Errore Percentuale	105
A-2 Basento IA=50, Errore Percentuale	105
A-3 Basento IA=30, Errore Percentuale	106
A-4 Basento IA=20, Errore Percentuale	106
A-5 Basento SA=2, Errore Percentuale	107
A-6 Basento SA=4, Errore Percentuale	107
A-7 Basento SA=4, Errore Percentuale	108
A-8 Basento SA=8, Errore Percentuale	108
A-9 Basento SA=10, Errore Percentuale	109
A-10 Basento SA=12, Errore Percentuale	109
A-11 Noce IA=100, Errore Percentuale	110
A-12 Noce IA=50, Errore Percentuale	110
A-13 Noce IA=30, Errore Percentuale	111
A-14 Noce IA=20, Errore Percentuale	111
A-15 Noce SA=2, Errore Percentuale	112
A-16 Noce SA=4, Errore Percentuale	112
A-17 Noce SA=6, Errore Percentuale	113
A-18 Noce SA=8, Errore Percentuale	113
A-19 Noce SA=10, Errore Percentuale	114
A-20 Noce SA=12, Errore Percentuale	114
A-21 Noce SA=12, Errore Percentuale	115

Sommario

Il monitoraggio dei corsi idrici è estremamente importante per lo studio delle caratteristiche idrologiche del territorio.

Le tecniche ottiche di analisi delle immagini consentono di eseguire una vasta tipologia di misurazioni con elevate risoluzioni spaziali a costi relativamente contenuti.

Le tecniche ottiche di analisi delle immagini per la misura della velocità superficiale di un corso d'acqua eseguono le misure identificando il moto delle particelle di tracciante naturale o artificiale nelle immagini. Si distinguono due possibili algoritmi: le tecniche Particle Image Velocity (PIV) e Particle Tracer Velocity (PTV).

Da queste immagini, attraverso delle correlazioni tra la velocità superficiale e la velocità media nel profilo, si può ricavare la portata.

Le immagini per le analisi vengono estratte da video la cui acquisizione può essere eseguita con telecamere fisse, spalleggiate o Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Ricorrendo ad UAV è possibile acquisire video rapidamente, da punti di vista privilegiati, con un costo relativamente basso ed in sicurezza anche in condizioni di flussi intensi.

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono i seguenti: Valutare la necessità delle pre elaborazioni di stabilizzazione e trasformazione dei frame; Indagare le parametrizzazioni dei programmi PIV_lab e Fudaa ricercando la relazione tra le parametrizzazioni e le caratteristiche dei casi studio; Confrontare i risultati dei differenti programmi (PIV_lab, Fudaa, PTV_lab); Verificare i risultati ottenuti con il calcolo delle portate eseguito attraverso Fudaa.

Per queste elaborazioni sono stati utilizzati due video di due corsi d'acqua differenti. Tali video sono stati effettuati utilizzando un quadricottero ed una camera ottica che ha registrato in scala di grigi.

I risultati delle misure di velocità sono stati soddisfacenti nella maggior parte dei punti della sezione ad eccezione delle sponde e di alcune zone non interessate dal passaggio dei traccianti.

In conclusione si è quindi confermato che le tecniche ottiche di analisi video consentono di calcolare in modo soddisfacente le portate transienti, permettendo l'acquisizione di misure idrauliche in modo economico, rapido e sicuro.

1 Introduzione alle misure di velocità idrauliche indirette

Lo studio dei fenomeni ambientali è un campo in continua evoluzione, la cui importanza appare ancora più evidente di quanto non fosse in passato, soprattutto pensando alle nuove sfide che l'umanità dovrà affrontare nel prossimo futuro.

I corsi d'acqua rappresentano in campo ambientale sia una risorsa che un pericolo: fin dalle prime civiltà stanziali la capacità di controllare l'acqua, dirigendola e confinandola a seconda del bisogno, rappresenta fonte di prosperità e sicurezza. La conoscenza del comportamento dei fiumi e permette di sfruttarli per vari usi (quali: produzione di energia elettrica irrigazione, consumo umano, ecc...) ,non ultimo il potersi proteggere da essi durante i fenomeni alluvionali che, se non controllati, confinati e diretti, sono capaci di provocare distruzione e morte.

Lo studio dei corsi d'acqua si fonda sulla conoscenza delle portate che nei vari periodi dell'anno vi transitano. Tradizionalmente le misure idrauliche sono eseguite tramite misuratori di velocità, traccianti chimici, coloranti o strumenti acustici doppler. La misura idraulica eseguita tramite metodi ottici presenta nuove possibilità di misura grazie alla sua elevata risoluzione spaziale e temporale ed ai costi relativamente bassi.

La misura delle velocità superficiali è eseguita tramite tecniche ottiche basate sul confronto tra frame successivi appartenenti ad un video che riprende la sezione d'interesse del corso d'acqua, alla ricerca di particelle di tracciante o di "strutture o forme" che il tracciante genera nel suo moto trasportato dal flusso. Una volta riconosciute le particelle o le strutture tra i frame si potrà misurare il loro spostamento tra di essi e, conoscendo la velocità di acquisizione dei frame, risalire alla velocità superficiale.

1.1 Potenzialità dei metodi ottici

Data la natura dinamica e variabile dei sistemi ambientali nel loro studio, è di fondamentale importanza il loro monitoraggio. Questa affermazione è particolarmente vera parlando di fenomeni idrologici: in essi l'evoluzione della tecnica cerca continuamente di aumentare la risoluzione spaziale e temporale dei dati acquisiti.

I sistemi di monitoraggio in sito svolgono un ruolo di primo piano: le reti di monitoraggio, più o meno estese e diffuse, permettono un'acquisizione in continuo dei dati d'interesse nelle aree in cui sono installate. Queste reti sono sicuramente fondamentali ma non sempre sufficientemente estese sul territorio soprattutto a causa degli elevati costi per la loro realizzazione e manutenzione. Può capitare infatti che gli eventi d'interesse si verifichino dove le stazioni strumentate sono assenti o troppo disperse per acquisire dati dove più sarebbe importante ottenerli.

Le tecniche di monitoraggio ottico si sono evolute grazie allo sviluppo tecnologico che ha consentito la realizzazione di sensori miniaturizzati ad alta qualità e di telecamere a basso costo: proprio queste evoluzioni hanno permesso la nascita di nuove modalità di monitoraggio basate su sistemi ottici. Le tecniche ottiche possono fornire informazioni là dove le reti di monitoraggio non sono sufficientemente estese (o presenti) e dove i normali metodi di sorveglianza non riuscirebbero facilmente ad operare; i costi contenuti e le variabili risoluzioni spaziali e temporali consentono un loro impiego in molti ambiti e situazioni e luoghi.

La tecnologia di comunicazione ed archiviazione di una grande mole di dati, oltre allo sviluppo di nuove tecniche di alimentazione, hanno permesso la nascita di strumenti come satelliti ed droni (Unmanned Aerial Vehicle). Queste tecnologie, installando a bordo camere e sensori, permettono di eseguire analisi in situazioni e con caratteristiche non riscontrabili nelle tecniche precedenti basate su strumentazioni poste a terra. Il monitoraggio satellitare consente inoltre di eseguire acquisizioni di dati in grandi domini spaziali, mentre grazie all'uso di sensori su drone è possibile eseguire acquisizioni di dati con buone risoluzioni spaziali e temporali. Entrambi gli approcci hanno il vantaggio di agire in modo non invasivo [1].

I metodi ottici annoverano al loro interno una serie di strumenti che applicano la tecnologia del telerilevamento per la misura di informazioni ambientali. Siccome strumenti e

tecniche ottiche sono in continuo sviluppo, nelle righe sottostanti sono presentati alcuni degli strumenti principali disponibili per le analisi ambientali.

Radar

Sono noti i metodi radar che sfruttano il principio doppler per la misura di distanze e velocità consentendo di ottenere misure senza contatto. Per il monitoraggio idrologico i radar sono utilizzati sia in stazioni di monitoraggio fisse, sia in campo in sezioni non strumentate con apparecchi di dimensioni ridotte tali da consentire agli operatori di trasportarle agevolmente.

Light Detection And Ranging (LiDAR)

La tecnologia LiDAR “Light Detection And Ranging” può considerarsi come un’evoluzione dei sistemi radar che consente di operare misure sulle superfici inquadrature tramite l’emissione e la ricezione di un impulso laser: grazie ad esse è possibile misurare la distanza tra lo strumento e la superficie inquadrata (generando una nuvola di punti che ne descriverà la geometria spaziale), ma anche eseguire misure di alcune caratteristiche fisiche e chimiche del bersaglio. Un uso comune della tecnologia LiDAR consiste nell’eseguire acquisizioni aeree (tramite satellite, aerei o meno frequentemente con UAV) della superficie terrestre per generare DSM con elevate precisioni anche sulla verticale.

Camere

Le camere sono disponibili in svariate bande di acquisizione dello spettro della radiazione elettromagnetica e possono essere installate a bordo di satelliti, aerei e UAV, oppure essere utilizzate per riprese a terra da postazioni fisse o da operatori. L’acquisizione di immagini e video con telecamere permette una elevata flessibilità di indagine mentre dalle immagini campionate si potranno derivare misure spaziali, temporali (considerando delle sequenze di immagini successive), fisiche e chimiche a seconda delle caratteristiche della camera utilizzata, della frequenza di acquisizione del video e del fenomeno d’interesse.

1.2 Applicazioni dei metodi ottici

Grazie alle innovazioni introdotte nel tempo i metodi ottici hanno trovato molti campi di applicazione.

Analisi della vegetazione

Tramite tecniche ottiche si può valutare lo stato vegetativo della flora in ampie aree e misurarne la volumetria; è anche possibile studiare l'evapotraspirazione associata alle coperture vegetali ed inserire questo importante dato nei modelli idrologici con grande dettaglio spaziale.

Queste informazioni risultano spesso estremamente utili per valutare i modelli idrologici di un bacino fluviale e per valutare la condizione delle sponde di un corso d'acqua [2] [3].

Misura granulometrica

Tramite la combinazione delle tecniche di monitoraggio con UAV e l'analisi della granulometria con il metodo ottico digitale è possibile ricostruire le proprietà granulometriche di un sedimento alluvionale ed osservarne i cambiamenti nello spazio e nel tempo, eseguendo facilmente l'analisi ad intervalli temporali. Il metodo fornisce risultati paragonabili a quelli della granulometria ottica tradizionale secondo lo studio di: [4].

Studio della geomorfologia

La tecnica denominata "Structure-from-Motion" (letteralmente "strutture in movimento") è una tecnica fotogrammetrica che permette di ricostruire geometrie tridimensionali tramite l'elaborazione di immagini senza conoscere informazioni preliminari sulla posizione della camera che le ha acquisite; tutto ciò permette un'agile ricostruzione economica di modelli di elevazioni digitali (DEM) ad alta risoluzione.

Le capacità di analisi della tecnica sono stati accuratamente studiati nell'articolo di : [5].

I modelli 3D possono essere ottenuti da immagini elaborate tramite software commerciali o open source quali: Agisoft PhotoScan, Pix4D, nFramesSURE, VisualSFM, Micmac, PMVS / CMVS, Bundler, Apero / MicMac, ecc...

Le immagini utilizzate per la ricostruzione di modelli tridimensionali possono essere realizzate da satellite (ottenendo immagini con ampie scale spaziali) o da camere poste su aerei, elicotteri e UAV. Tramite queste differenti tecnologie è possibile applicare l'analisi ottica in ambiti molto differenti, variando il dominio spaziale e temporale e la risoluzione, sia spaziale che temporale, a seconda delle esigenze che il campo di applicazione richiede [6].

Misura della batimetria

La conoscenza della batimetria dei corpi idrici è di grande importanza in idrologia. Sono stati sviluppati nel tempo vari metodi di telerilevamento quali il LiDAR e la fotogrammetria in acqua. Queste strumentazioni sono però influenzate dalle condizioni di torbidità e dall'opacità dell'acqua a molte frequenze della radiazione elettromagnetica.

La tecnica ottica opera in modo ottimale nella ricostruzione della geometria delle superfici non sommerse (come già illustrato) ma necessita di acque limpide per eseguire misure ragionevolmente accurate dei letti dei canali. In condizioni di limpidezza la tecnica di ricostruzione delle superfici, ricorrendo agli algoritmi "Structure from Motion (SfM)" ed alla correzione della rifrazione consente di ottenere ottimi risultati [7].

Per ottenere comunque la batimetria dei corsi d'acqua non limpidi in modo efficiente, speditivo ed economico si sono sviluppate altre tecnologie. Per ovviare al problema della misura batimetrica in caso di torbidità si è fatto ricorso ai sonar batimetrici montandoli su supporti galleggianti o, recentemente, trasportandoli collegati ad un cavo a dei droni; questi ultimi operano volando sopra le aree di misura ad un'altezza pari alla lunghezza del cavo di collegamento, mantenendo così il sonar a contatto con la superficie [8].

Misura delle velocità

La conoscenza della velocità di flusso è un passo fondamentale per il calcolo delle portate in sezioni non regolari, in quanto per lo studio dell'idrologia fluviale essenziali sono le misure di velocità nei corsi d'acqua. Quest'ultime sono eseguite attraverso vari approcci e strumenti: il vantaggio delle tecniche ottiche consiste nella loro applicabilità anche in condizioni di eventi alluvionali, in quanto non richiedono il contatto con il corso d'acqua per eseguire le misure. Sarà possibile risalire alla velocità superficiale di un corso d'acqua tramite l'analisi per immagini o la strumentazione radar.

I radar forniranno una misura di velocità puntuale per ciascuna misura eseguita. La velocità puntuale misurata è derivata mediando la velocità sull'area inquadrata dal radar. Di ciascuna area inquadrata lo strumento fornirà un singolo vettore della velocità superficiale, quindi per conoscere le velocità superficiali in una sezione si dovrà procedere inquadrando con il radar le aree centrate nei punti dove si desidera ottenere la misura. I radar possono essere posti in stazioni fisse (su ponti o tralicci) o trasportati ed utilizzati da operatori a terra.

L'acquisizione delle immagini necessarie all'analisi potrà essere eseguita tramite camere poste in stazioni fisse, a bordo di UAV o puntate in direzione del corso d'acqua da un operatore. Le camere che acquisiranno le immagini della sezione d'interesse potranno essere poste in stazioni fisse così da ottenere analisi in continuo dei valori di velocità superficiale del corso d'acqua o trasportate da operatori che, giunti nel luogo della sezione d'interesse, eseguiranno la misura da terra o con l'ausilio di UAV. L'uso di UAV con a bordo camere per la ripresa delle immagini fornisce al metodo notevole flessibilità mantenendone l'economicità in confronto agli altri metodi alternativi. L'analisi di immagini fornirà come risultato la ricostruzione del campo di moto della sezione inquadrata.

1.3 Il problema dell'accessibilità in sicurezza

L'acquisizione di misure in sicurezza è una problematica di grande importanza per la conoscenza delle caratteristiche di un bacino idrografico.

In condizioni di flusso ordinario eseguire misure senza rischi per gli operatori e danno alla strumentazione. Assicurare la sicurezza delle operazioni diventa più complicato quando si devono eseguire misure durante degli eventi intensi a causa della pericolosità dei corsi d'acqua che impedisce le misure idrauliche che richiedono l'uso di strumenti a contatto con il flusso quali il mulinello o gli ADCP per il rischio di perdita o rottura dello strumento ma soprattutto per il rischio degli operatori di essere coinvolti, colpiti e trascinati dalla corrente.

Gli eventi intensi corrispondono spesso a tempi di ritorno elevati ed il loro studio è molto importante per conoscenza del rischio idraulico nel bacino e l'ottimizzazione delle azioni e dei piani di prevenzione.

Il problema di acquisire misure in sicurezza può essere risolto con il telerilevamento. Misure ottiche delle grandezze idrauliche consentono di mantenere gli operatori al sicuro, lontano dalle aree di rischio interessate dall'evento che si desidera indagare e garantiscono anche l'integrità degli strumenti in quanto anch'essi operano senza contatto con il corso d'acqua.

Il telerilevamento è possibile tramite radar o fotocamere. Nel caso in esame le misure sono ottenute da un video del corso d'acqua eseguito nella sezione d'interesse eseguito da una fotocamera. La fotocamera potrà essere: posta su una postazione sopraelevata fissa (condizione ideale per acquisizioni in continuo); spalleggiata da un operatore in una

posizione adeguata (un ponte o un edificio prossimo alla sezione); trasportata da un UAV sulla verticale della sezione.

Tra le varie possibilità a disposizione per il posizionamento della fotocamera l'impiego di UAV è ottimale per la misura in sezioni non strumentate di difficile avvicinamento in quanto può posizionarsi sulla verticale della sezione, fornendo così dei video da un ottimo punto di vista, senza rischi per lo strumento (che sarà a distanza dalla superficie) né per gli operatori che potranno trovarsi a una distanza di sicurezza e pilotare l'UAV da remoto.

1.4 UAV

La definizione di Unmanned Aerial Vehicle (UAV) comprende al suo interno una grande quantità di mezzi aerei pilotati a distanza.

L'uso degli UAV è cresciuto moltissimo nel tempo grazie all'evoluzione della tecnica costruttiva che ha proposto sul mercato droni sempre più potenti, con maggiore autonomia e stabilità. Il miglioramento tecnico ha permesso e stimolato l'adozione degli UAV in molti differenti campi di applicazione.

Nel tempo è aumentata la diffusione degli UAV ma è cambiato ed aumentato anche il quadro normativo che ne regola le operazioni: ognuna di esse, qualora si avvalga di UAV deve rispettare le normative nazionali che ne regolamentano le attività dei droni con l'obiettivo di garantire la sicurezza delle persone. Nelle righe sottostanti si è cercato di riassumere l'approccio della normativa italiana ed europea.

ENAC

In Italia l'ente incaricato di normare l'uso di droni aerei è l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) nel cui regolamento i droni sono chiamati "Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR)", definizione originata da quella di "aeromobile", la cui dicitura recita "*ogni macchina destinata al trasporto per aria di persone o cose*" e "*sono altresì considerati aeromobili i mezzi aerei a pilotaggio remoto*" [9].

La necessità di regolamentare l'uso di UAV ha portato alla creazione di normative nazionali che ne normino l'uso per garantire la sicurezza degli operatori, di terzi e la privacy dei cittadini. Le priorità di sicurezza operativa che garantiscano la salute delle persone hanno condotto alla definizione di vari criteri che hanno come finalità di definire le categorie di UAV in funzione della loro inoffensività o pericolosità nel caso di urto con persone [].

La normativa Italiana prevede una classificazione in funzione dello scenario delle operazioni (critico e non critico), classificazione basata sul luogo in cui le attività saranno svolte (nelle sue caratteristiche di densità di popolazione e densità di traffico) e sull'energia cinetica degli UAV.

EASA

L'EASA (Agenzia Europea per la Sicurezza Aerea) nell'ultimo regolamento rilasciato [11] suddivide le categorie di operazione degli UAV in "aperta", "specificata" e "certificata". Per ciascuna delle tre categorie cambieranno le regole riguardo alle autorizzazioni necessarie:

a) le operazioni UAS nella categoria «aperta» non sono soggette ad autorizzazione operativa preventiva né ad una dichiarazione operativa da parte dell'operatore UAS prima che l'operazione abbia luogo;

b) le operazioni UAS nella categoria «specificata» necessitano di un'autorizzazione operativa rilasciata dall'autorità competente a norma dell'articolo 12 o di un'autorizzazione ricevuta conformemente all'articolo 16 o, nelle circostanze di cui all'articolo 5, paragrafo 5, di una dichiarazione che deve essere presentata da un operatore UAS;

c) le operazioni UAS nella categoria «certificata» necessitano della certificazione dell'UAS a norma del regolamento delegato (UE) 2019/945, della certificazione dell'operatore e, se del caso, della licenza del pilota remoto

La maggior parte delle acquisizioni video che facciano ricorso a UAV rientra nella categoria "non critica" italiana e "specificata" europea: è quindi possibile effettuarle dopo aver registrato il drone e l'operatore ed aver chiesto un'apposita autorizzazione operativa.

Gli UAV sono mezzi dalle grandi possibilità, ma nel contempo possono dimostrarsi pericolosi se manovrati incautamente: tutti gli operatori di UAV, soprattutto quelli che opereranno in condizioni critiche, dovrebbero prevedere attività di aggiornamento ed addestramento per evitare incidenti causati da eventi imprevedibili [10].

Privacy

Il rispetto della privacy risulta un campo estremamente complesso e di difficile attuazione. Al momento la normativa ENAC [9] prevede che il trattamento dei dati personali sia effettuato nel rispetto del "Codice in materia di protezione dei dati personali" e che ogni attività che possa comportare un trattamento dei dati personali debba menzionarlo nella documentazione sottoposta ai fini del rilascio della pertinente autorizzazione.

2 Quadro concettuale

2.1 Misure di velocità tramite Fotogrammi

Il profilo di velocità superficiale di un corso d'acqua può essere misurato in modo indiretto ricorrendo all'analisi di fotogrammi successivi che inquadrino la superficie in esame. Una singola camera può (spesso) acquisire il campo di moto di un'intera sezione di un corso d'acqua e permettere un'analisi complessiva della velocità superficiale tramite una sola acquisizione video.

Per eseguire l'analisi è necessario acquisire in campo un video che inquadri la sezione d'interesse. Non è necessaria l'ortogonalità della camera rispetto alla superficie, ma nel caso si acquisisca con una presa obliqua alla sezione in esame si dovrà eseguire una ortorettifica per compensare le distorsioni nell'immagine.

L'acquisizione dei video potrà essere compiuta da operatori a terra o droni; sarà anche possibile l'installazione di strumentazioni fisse, posizionate in modo tale che l'angolo di presa della camera possa inquadrare la sezione del corso d'acqua d'interesse.

I video ed i frame in analisi potranno essere o meno oggetto di una pre elaborazione: il video può infatti essere sottoposto ad una stabilizzazione che elimini le vibrazioni ed oscillazioni della camera durante l'acquisizione, i frame potranno invece essere trasformati in un formato bianco e nero, in funzione di un valore di soglia per aumentarne il contrasto.

I programmi procedono alla stima delle velocità identificando delle singole particelle di tracciante o le forme composte da queste nei fotogrammi. Le particelle esaminate possono essere elementi naturali trasportati sulla superficie dal moto del corso idrico o, più spesso, particelle sparse dagli operatori a monte della sezione acquisita dal video. Ciascuna comparazione eseguita dal programma avverrà tra due frame: tra il fotogramma preso in esame ed il fotogramma successivo. Una matrice di ricerca proverà ad identificare nel secondo fotogramma (nell'area indicata come d'interesse) gli elementi di tracciante o le forme assunte da più elementi di tracciante presenti nel primo fotogramma evidenziando gli elementi omologhi. Lo spostamento, di uno stesso elemento identificato, in due frame successivi corrisponde al movimento nello spazio che l'elemento in esame ha compiuto nel tempo intercorso tra i due frame, da questo in relazione all'intervallo temporale tra i frame (derivato dalla velocità di acquisizione del video) il programma riuscirà a determinare la

velocità dell'elemento in pixel al secondo. Attraverso una calibrazione metrica la velocità sarà convertita in metri al secondo. La ripetizione della ricerca su tutti i frame del video in analisi permetterà al programma di fornire campo di moto della velocità superficiale nell'area ripresa dai frame.

Il campo di moto preliminare ottenuto potrà essere filtrato per eliminare gli errori grossolani, dovuti ad errati riconoscimenti del tracciante (o delle forme), che porterebbero a errori gravi.

2.1.1 Teoria del metodo, PIV e PTV

Le tecniche si basano sull'analisi di immagini per la ricostruzione di velocità. La metodologia più applicata consiste nell'immissione di particelle di tracciante nel flusso, assumendo che questi si muova con la velocità locale del flusso. Nei casi studio oggetto della tesi il tracciante consiste in truciolo di legno. Il tracciante disperso è filmato con una camera che rende così disponibile il video del suo passaggio.

La velocità del tracciante si otterrà tramite la misura dei suoi spostamenti in due frame consecutivi noto l'intervallo temporale tra loro, ottenibile dalla frequenza del video.

I metodi di ricerca degli spostamenti sono il cuore del metodo e si distinguono in due tipologie:

- ~ Particle Image Velocity PIV
- ~ Particle Tracer Velocity PTV

Nella tecnica PIV lo spostamento delle particelle è determinato tramite un approccio di correlazione dell'area d'interrogazione (Interrogation Area) confrontata in due frame per volta tra loro successivi. Il confronto sarà ripetuto per ogni coppia di frame del video, consecutivi tra loro. Si paragonerà quindi la "struttura" formata dalle particelle di tracciante ricercandola tramite l'indice di correlazione delle matrici. Una volta determinata la posizione della struttura nei due frame si risalirà allo spostamento ed alla velocità. Il vettore di velocità così ottenuto sarà salvato nel baricentro della IA nel primo frame. IL campo di moto sarà prodotto da tutti i vettori definiti dalle correlazioni con un approccio Euleriano

Il metodo PTV considera sempre coppie di frame tra loro successivi e ricerca le particelle di tracciante nel primo frame nel frame successivo comparando forma e dimensione cercando di identificarla nuovamente. Trovata la particella sia nel primo frame sia nel

secondo se ne conoscerà la posizione da cui si otterrà lo spostamento compiuto da questa particella. Le velocità saranno ricavate in funzione dello spostamento di tutte le particelle e del frame rate. Il vettore di velocità così determinato sarà memorizzato nella posizione del baricentro dello spostamento tra i due frame della particella, il campo di moto sarà quindi generato con un metodo Lagrangiano [12].

Le principali differenze tra i due metodi sono riassunte nell'articolo [13] nella tabella (2.1) riportata tradotta fedelmente.

	LSPIV (PIV_lab)	PTV (PTV_lab)
Impostazioni	Installazione remota basata su telecamere economiche. Le telecamere sono angolate o ortogonali alla superficie dell'acqua. I laser possono essere utilizzati per la calibrazione remota dell'immagine.	Installazione remota basata su telecamere economiche. Le telecamere sono angolate o ortogonali alla superficie dell'acqua. I laser possono essere utilizzati per la calibrazione remota dell'immagine.
Surface appearance	Necessita di superfici con elevate densità di dispersione del tracciante. Potenzialmente applicabile con traccianti o pattern naturali.	Necessita di traccianti dalla forma ben definita.
Algoritmo	<p>Correlazione incrociata tra aree di interrogazione e ricerca tra coppie di frame.</p> <p>I vettori di velocità sono assegnati arbitrariamente al centro delle aree di interrogatorio.</p> <p>Produce un campo di velocità superficiali 2D discreto.</p> <p>Si presume che i traccianti all'interno delle finestre di interrogazione non cambino la loro posizione relativa tra coppie di frame</p> <p>Richiede un'elevata quantità di tracciante per l'analisi.</p> <p>Min. 2 parametri di input in PIVLab.</p> <p>Le dimensioni dell'interrogazione e delle aree di ricerca devono essere regolate in base alla dimensione e alla velocità del tracciante.</p>	<p>Individuazione e localizzazione di oggetti di forma e intensità note a priori. I vettori di velocità si trovano casualmente nel campo visivo.</p> <p>Fornisce le traiettorie delle particelle di tracciante e le interpola per fornire un campo di moto della velocità superficiale.</p> <p>Analizza bene i campi di flusso con moto vario.</p> <p>Riesce ad analizzare il flusso anche con basse densità di tracciante.</p> <p>Min. 6 parametri di input in PTVLab</p> <p>Le dimensioni del tracciante devono essere inferiori allo spostamento fotogramma per fotogramma per consentir e all'algoritmo di seguire al meglio il movimento del tracciante.</p>
Controlli	I traccianti devono essere distribuiti in modo omogeneo nel campo visivo durante l'intera sequenza di immagini analizzate.	Sono richiesti pochi traccianti.
	Impatto negativo dei riflessi della luce solare. Di solito si traduce in stime di velocità inferiori.	Impatto negativo dei riflessi della luce solare. Il filtro basato sulla traiettoria può essere d'aiuto.

2-1 Caratteristiche delle tecniche LSPIV e PTV

Risoluzione spaziale e temporale

La risoluzione spaziale e temporale del metodo sono definite dalle caratteristiche del video. La risoluzione spaziale sarà determinata dalla frequenza di acquisizione della camera mentre la frequenza temporale dipenderà dalla risoluzione della camera ossia dal numero di pixel del sensore.

Le misure di velocità ottenute tramite telerilevamento. Queste tecniche quindi saranno compiute senza che lo strumento sia a contatto e perturbi il flusso.

La misura della velocità sarà indiretta in quanto determinata in funzione degli spostamenti delle particelle del tracciante.

Tracciante

Gli spostamenti del tracciante dovranno corrispondere alle velocità del flusso quindi si dovrà ricorrere ad un materiale con scarsa inerzia e bassa sommergenza adatto a essere trasportato dal fluido [14].

La dimensione del tracciante deve essere coerente con le caratteristiche del moto in modo tale da permettere di indagare correttamente le linee di flusso. Traccianti di dimensioni eccessive non consentiranno di rilevare variazioni locali delle linee di flusso aventi grandezza caratteristica inferiore, portando ad una perdita di informazione; allo stesso tempo un'eccessiva dimensione dei traccianti porterà ad una maggior difficoltà da parte del programma nel riconoscere le strutture turbolente; infine se la dimensione sarà troppo ridotta rispetto alla risoluzione della camera, la cross correlazione sarà difficoltosa.

Si dovrà dunque cercare un compromesso tra la risoluzione della camera, la dimensione del tracciante e le strutture create dal flusso.

2.2 Considerazioni sulla misura delle portate

2.2.1 Misura delle portate in condizioni di flussi ordinari

Conoscere le portate in condizioni di flusso ordinario non presenta particolari problemi né con le tecniche tradizionali né con le tecniche ottiche.

Se il corso d'acqua è già stato oggetto di studio ed è stata già sviluppata una curva di deflusso questa fornirà dei dati di portata soddisfacenti. Se per il corso d'acqua non è stata ricavata una curva di deflusso si possono eseguire senza difficoltà misure di velocità, e da queste, nota la geometria della sezione d'interesse ricavare i valori di portata, tenendo presente il tempo e le condizioni al contorno che ciascuna di esse richiederà per essere applicata.

Le misure di velocità possono essere sia dirette che indirette e non c'è nessuna particolare difficoltà nell'applicare metodi che richiedano il contatto con il corso d'acqua

2.2.2 Misura delle portate in condizioni di flusso intenso

Nel caso il corso d'acqua sia interessato da portate di particolare intensità la loro definizione diverrà difficoltosa.

Il mulinello ed il radar "Acoustic Doppler Current Profilers" sono difficilmente applicabili in condizioni di piena per questioni di sicurezza degli operatori e degli strumenti.

I metodi indiretti con radar fissi senza contatto non sono facilmente calibrabili in quanto lo strumento è in grado di misurare la velocità superficiale solo di una porzione della sezione e la relazione tra la velocità superficiale misurata dal radar in una parte della sezione e la velocità media nella sezione richiede una conoscenza pregressa delle caratteristiche del sito, che non è facilmente ottenibile in assenza di misure precedenti di eventi simili.

Risulta quindi chiaro come le portate elevate siano difficili da definire. Le portate con flussi ingenti sono anche quelle che maggiormente si desidera conoscere per la protezione del territorio essendo quelle che causano più danni.

Si presenta quindi il problema: le portate meno facili da misurare sono, in genere, anche quelle con i danni più elevati.

Metodi di misura che esplorino la possibilità di compiere stime delle portate per eventi intensi sono estremamente importanti, soprattutto dove la conoscenza di eventi pregressi non è sufficientemente sviluppata.

2.2.3 Coefficiente di correlazione tra la velocità superficiale e la portata

Esistono vari metodi per il calcolo della velocità del pelo libero di un corso d'acqua senza contatto diretto con il flusso. Alcuni metodi sono presentati nelle sezioni allegate.

Il calcolo della portata nota le velocità superficiali " $V_{s,i}$ " richiede il calcolo delle velocità medie sulle verticali corrispondenti " V_i ". Il calcolo avverrà tramite il coefficiente di correlazione " α ":

$$\alpha = \frac{V_i}{V_{s,i}};$$

La scelta del valore del coefficiente di correlazione è il cuore delle tecniche per il telerilevamento delle portate.

Il valore di “ α ” può essere scelto tramite vari percorsi:

- ~ Può essere assunto tramite una ricerca in letteratura;
- ~ Stimato in sito tramite una calibrazione validata con misure di profilo a contatto;
- ~ Ottenuto tramite la relazione tra misure di velocità con contatto e telerilevate eseguite simultaneamente;
- ~ Ricavata tramite le formule che descrivono i comportamenti dei canali a superficie libera.

Un valore di partenza “ $\alpha = 0.85$ ” è comunemente considerato valido in letteratura. Per maggiori precisioni è opportuno eseguire una calibrazione per il sito specifico. [15]

2.3 Uso degli UAV nelle attività di monitoraggio

L’acquisizione di immagini tramite camere trasportate con UAV offre un’alternativa valida alle altre tecniche grazie ai relativamente bassi costi d’investimento ed all’elevata flessibilità operativa.

2.3.1 Confronto con altri mezzi di acquisizione di immagini

Il telerilevamento aereo può essere eseguito scegliendo tra tre possibili alternative: Satelliti; Aeromobili; UAV. Ciascuna delle tre opzioni ha differenti pregi e difetti che, a seconda del campo di applicazione desiderato, rendono preferibile uno delle tre possibilità rispetto alle altre.

Una approfondita revisione sull’uso degli UAV nel monitoraggio ambientale è raccolta nell’articolo: [6], mentre un confronto dei costi di acquisizione delle tre differenti opzioni è fornita nell’articolo: [16] ed in [17].

Gli articoli sopracitati illustrano come gli UAV siano capaci di eseguire monitoraggi ambientali con alta risoluzione spaziale e una risoluzione temporale limitata solo dal numero di voli che si eseguiranno. Questa caratteristica permette di eseguire monitoraggi di fenomeni dinamici con una grande abbondanza di dati temporali che potranno essere molto ravvicinati tra loro.

Capacità di acquisizione delle immagini

Nell’articolo del Matese si analizza quale sia la probabilità, nelle regione piovose, di acquisire con satellite e con UAV un’immagine adatta per considerazioni di supporto

all'agricoltura di precisione: viene esposto come un satellite abbia circa il 20% i possibilità di produrre un'immagine adeguata; le probabilità aumentano al 45% ricorrendo ad un drone ordinario, fino ad arrivare al 70% utilizzando un UAV adatto alle intemperie.

Un UAV quindi, nonostante le eventuali coperture nuvolose o condizioni meteo avverse, potrà integrare e migliorare le prestazioni di qualsiasi servizio di telerilevamento satellitare.

Si consideri inoltre come il drone non sarà vincolato a orari fissi di passaggio come i satelliti e potrà consentire all'operatore di eseguire l'acquisizione delle immagini in modo diretto e rapido, senza attendere le procedure necessarie per consentire la realizzazione di un volo fotogrammetrico con un velivolo con pilota a bordo.

Paragone tra i costi

Una attenta valutazione dei costi, riferita al mercato Statunitense, è fornita nell'articolo [16] in cui si effettua un'analisi sull'uso di UAV per il monitoraggio dei parchi confrontandolo con delle alternative.

Nel documento si paragonano i costi di immagini acquisite da satellite, fotogrammetria, aerea tradizionale e UAV in vari contesti, quali il monitoraggio di un rifugio faunistico, di una cava di ghiaia, di una discarica o coltivazioni.

Nella tabella sottostante sono riportati alcuni valori esemplificativi citati nell'articolo.

	Immagini aeree		Immagini satellitari		Immagini acquisite da UAV	
Rifugio faunistico	Aeromobili	4300	X		Affitto di un drone fornito dall'esercito USA	2600 \$/volo
	Governativi:	\$/volo				
	Aereo con equipaggio	35000 \$/volo				
Discarica			X		Singola acquisizione con UAV	300 \$/volo
Cava di Ghiaia	Aereo con equipaggio	10000 \$/volo	X		Singola acquisizione con UAV	120 \$/volo
Analisi agricole	Immagini aeree tradizionali	3.50 \$/acro	dati satellitari provenienti dall'indagine geologica degli Stati Uniti	0.30 \$/acro	Costo per l'intero sistema di monitoraggio con UAV	5000/7000 \$
	(11000 acri)	38000 \$/immagine		33000 \$/immagine		
<i>Informazioni tratte dall'articolo [16]"</i>						
				(1000 acri = 4.04 km ²)		

Occorre precisare che i prezzi dei vari sistemi varieranno sempre in funzione del lavoro e delle risoluzioni desiderate, inoltre i valori riportati nella tabella soprastante sono da considerarsi solo a titolo di esempio in quanto riferiti al mercato Statunitense.

In termini generali il costo per l'acquisizioni di immagini da aereo è dell'ordine delle decine di migliaia di dollari; il satellite risulta molto conveniente ma per i casi studio è applicato solo per l'acquisizione in campo agricolo e viene segnalato come l'intervallo temporale tra due acquisizioni sia elevato, rendendo il suo uso non adatto. Infine l'UAV fornisce delle immagini utili all'analisi, con intervalli temporali personalizzabili a seconda delle necessità e costi mediamente inferiori.

Un confronto tra le tre piattaforme per la ricostruzione di immagini secondo l'indice NDVI è stato eseguito su due vigneti italiani nell'articolo [17] dove un'analisi eseguita sui costi in funzione della scala di applicazione.

Nell'articolo si afferma che i tre mezzi d'acquisizione delle immagini (satellite, aereo UAV) forniscono risultati complessivamente comparabili: l'adozione della piattaforma UAV risulta vantaggiosa per piccole aree e si osserva un punto di pareggio tra i costi delle tecniche sopra i 5 ettari; al di sopra di tale soglia, per questo caso applicativo, le altre strumentazioni hanno costi di immagine inferiori.

Negli anni vi è stata un'evoluzione tecnica degli UAV e si può affermare che oggi esista allo stato attuale dell'evoluzione tecnica una coerenza generale nella letteratura che identifica il limite inferiore per l'economicità dell'uso di UAV tra i 10 ed i 20 ha [6]

2.3.2 UAV: condizioni vantaggiose di monitoraggio

La mera valutazione economica delle piattaforme non può ritenersi esaustiva, in quanto si limita a confrontare il costo per immagine: i punti di forza degli UAV possono portare a superare le semplici considerazioni economiche rispetto agli altri metodi di acquisizione, grazie ad alcune caratteristiche proprie che li rendono molto competitivi:

- a) Possiedono la capacità di eseguire acquisizioni di immagini con elevate risoluzioni spaziali e temporali;
- b) Possono ottenere una rapida acquisizione dei dati ambientali (rendendoli rapidamente disponibili);
- c) Soddisfano i requisiti di sicurezza e di accessibilità nel monitorare siti altrimenti inaccessibili;
- d) Hanno la possibilità di operare in condizioni di cielo coperto (situazione che impedisce l'acquisizione di immagini RGB satellitari).

2.3.3 UAV: limiti del metodo

Gli UAV possono essere impiegati in molte situazioni, effettuando operazioni di monitoraggio in molti campi differenti. Come tutti gli strumenti esistono però dei limiti operativi all'interno dei quali un UAV dovrà operare. Questi limiti dipenderanno dal tipo di UAV e dallo scenario operativo, ma è possibile identificarne un elenco valido per la maggior parte degli UAV in commercio.

Un UAV non potrà operare:

- a. In condizioni di forte vento che possa compromettere la manovrabilità dell'UAV;
- b. Durante precipitazioni: la maggior parte degli UAV non sono impermeabili e non è garantito il loro volo in condizioni di pioggia;
- c. In condizioni di scarsa visibilità, per questioni di sicurezza nei confronti di terzi, dell'operatore e del drone stesso;
- d. Nei pressi di folle senza particolari precauzioni, sempre per questioni sicurezza come disposto da limiti normativi;

3 Obiettivi

Gli obiettivi di questo lavoro di tesi sono i seguenti:

- Valutare la necessità delle pre elaborazioni di stabilizzazione e trasformazione dei frame;
- Indagare le parametrizzazioni dei programmi PIV_lab e Fudaa ricercando la relazione tra le parametrizzazioni e le caratteristiche dei casi studio;
- Confrontare i risultati dei differenti programmi (PIV_lab, Fudaa, PTV_lab);
- Verificare i risultati ottenuti con il calcolo delle portate eseguito attraverso Fudaa.

4 Metodi

Sono state eseguite delle analisi di velocità, con tecniche ottiche, su alcuni video scelti come casi studio: questi sono stati eseguiti tenendo conto di alcune necessità di analisi; le caratteristiche richieste ai video sono riportate nei capitoli successivi.

L'acquisizione dei video oggetto di studio è avvenuta mettendo in atto una sequenza di operazioni che hanno consentito l'ottimale campionamento dei dati d'interesse.

Si è desiderato ottenere durante l'acquisizione in campo di:

- ~ misure di velocità tradizionali (per poter eseguire le validazioni);
- ~ misure geometriche della sezione;
- ~ video "adeguati".

Le analisi sono state compiute eseguendo delle elaborazioni dei video tramite alcuni programmi sviluppati applicando le tecniche ottiche di misura delle velocità.

4.1 Acquisizione in campo del video

I video oggetto di analisi sono stati acquisiti ricorrendo ad una fotocamera posta su un UAV, così da poter ottenere dei video adatti alle successive analisi.

Durante un'uscita in campo per l'acquisizione di video è possibile suddividere le attività in tre distinte parti: le attività di caratterizzazione della sezione, le operazioni di misura tradizionale delle caratteristiche del flusso e le operazioni di acquisizione del video. La prima fase consiste nella scelta e localizzazione della sezione più idonea in base alla misura delle sue caratteristiche morfologiche; seguono le operazioni di misura delle caratteristiche idrauliche tramite tecniche tradizionali, così da ottenere dei dati di riferimento per il futuro confronto dei risultati; in ultimo si compirà l'acquisizione del video con il volo del UAV e lo spargimento a monte della sezione del tracciante.

La sequenza delle operazioni è organizzata in un chiaro ordine al fine di ottimizzare le operazioni in campo ed evitare errori.

Caratterizzazione della sezione
a. Pianificazione: scelta della sezione d'interesse e preparazione della missione; b. Localizzazione topografica in campo; c. Posa di elementi che consentiranno l'identificazione nel video della sezione; d. Misura della sezione; e. Posa dei riferimenti per la calibrazione e l'ortorettifica (che dovranno essere acquisiti dal video);
Misure tradizionali delle grandezze idrauliche
f. Misura della batimetria della sezione e misura delle velocità nella sezione;
Volo ed esecuzione del video
g. Preparazione pre volo del drone e della fotocamera; h. Volo del drone ed acquisizione del video durante il quale saranno sparsi (a monte del video) le particelle di tracciante.

Caratterizzazione della sezione

La prima operazione consiste nello scegliere la sezione utile allo studio, la quale idealmente deve essere accessibile da parte degli operatori per consentire le misure batimetriche della sezione; consentire il volo in sicurezza del drone (non dovranno quindi esserci alberi, rami o fronde che possano ostacolare il volo).

Nella sezione scelta si dovranno considerare anche le condizioni di illuminazione, le quali dovranno essere il più possibili omogenee, prive di riflessi ed ombre. Per ottenere condizioni di illuminazione omogenee potrebbe essere opportuno eseguire l'acquisizione del video in ore del giorno che, nella specifica sezione permettano le condizioni adatte di illuminazione.

Una volta decisa la sezione d'indagine si procede identificandola, ponendo due aste metriche verticali sulle opposte rive del corso d'acqua, così da renderla facilmente riconoscibile nel video, si procederà quindi e misurando la larghezza della sezione. Si posizionano nei pressi della sezione dei riferimenti utili alla calibrazione o ortorettifica delle immagini, i quali possono essere dei marker o una o più stadiie poste a terra come riferimento geometrico di dimensione nota. Il video deve essere eseguito in modo da acquisire i riferimenti di calibrazione e, se non nota in precedenza, si eseguirà una misura della batimetria nella sezione così da poter conoscere le caratteristiche geometriche.

Misure tradizionali delle grandezze idrauliche

Si misurano le velocità superficiali e verticali, per mezzo di strumenti quali il mulinello o l'ADCP, si può procedere anche alla misura con SVR ma è opportuno non utilizzare le velocità

così acquisite come riferimento per il confronto delle velocità se non si è certi della corretta acquisizione. Il video deve essere eseguito in un intervallo di tempo ridotto dall'acquisizione delle velocità di flusso, con strumenti tradizionali tali da consentire l'ipotesi che le condizioni idrauliche non siano variate e le misure siano quindi confrontabili.

Volo ed esecuzione del video

Le ultime operazioni consisteranno nelle verifiche pre volo, nel decollo, l'acquisizione del filmato, l'atterraggio ed il trasferimento dei dati dalla camera ad una memoria d'archiviazione.

4.2 Linee guida per l'esecuzione del volo dell'UAV

Il volo sarà possibile solo in condizioni di sicurezza e l'UAV potrà volare solo rispettando i limiti normativi e se le condizioni meteo rientreranno nei limiti operativi della macchina. In generale non sarà possibile operare voli nei pressi di persone estranee alle operazioni (salvo particolari accorgimenti) né durante precipitazioni o forti venti (come la maggior parte degli UAV commerciali).

Una volta rispettate le condizioni di sicurezza la fase di acquisizione del video inizierà con le operazioni di controllo pre volo dell'UAV per verificarne il corretto funzionamento. Oltre alle azioni di controllo presentate di seguito e riassunte nella lista è necessario verificare anche l'operatività della camera per evitare di eseguire voli a vuoto a causa di batterie scariche, obiettivi occlusi, memorie di archiviazione piene, ecc... situazioni più comuni di quanto si potrebbe supporre.

Si deve prestare particolare attenzione all'asse dell'obiettivo della camera: per un'acquisizione ottimale del video la camera deve essere posta con l'asse dell'obiettivo perpendicolare alla superficie del corso d'acqua, se necessario è possibile operare con un orientamento non nadirale ma questo assetto obliquo richiederà obbligatoriamente una ortorettifica dei frame. Kim ha riferito che 10 gradi è il limite accettabile per operazioni di ortorettifica della distorsione [18].

Elenco delle operazioni pre volo:

- [1]. Controllo del corretto collegamento dei cavi del drone;
- [2]. Verifica del collegamento della camera e del suo corretto orientamento;
- [3]. Verifica dell'integrità della struttura: assenza di crepe o parti rotte nella scocca e nei supporti;
- [4]. Verifica del corretto moto dei rotori senza attriti anomali e dell'integrità delle eliche;
- [5]. Collegamento della batteria;
- [6]. Se richiesto si procederà alla calibrazione del giroscopio del drone;
- [7]. Posa a terra dell'UAV in uno spazio sgombro;
- [8]. Creazione del data link;
- [9]. Verifica del "Cielo Libero": controllo per assicurare l'assenza di altri droni in volo o uccelli (soprattutto rapaci che potrebbero attaccare l'UAV);
- [10]. "Via dall'elica": verifica a terra nei pressi del drone per assicurarsi l'assenza di persone estranee alle operazioni nell'area;
- [11]. Decollo dell'UAV.

4-1 Chek list pre volo

Eseguiti i controlli pre volo è possibile far decollare il drone con a bordo la fotocamera. Durante il volo il drone deve porsi il più possibile centrale rispetto alla sezione oggetto d'analisi. Durante l'acquisizione del video gli operatori addetti alla dispersione del tracciante, a monte della sezione, devono operare in sincronia per spandere il materiale tracciante il più uniformemente possibile nella sezione così da ottimizzare l'acquisizione delle particelle nel filmato. Il tracciante utilizzato deve tener conto delle caratteristiche del letto del corso d'acqua e delle condizioni di illuminazione al momento della registrazione del video.

4.3 Pre elaborazione

Le operazioni di pre elaborazione dei video sono state compiute al fine di ottimizzare la capacità di analisi dei programmi. Si è cercato di riconoscere quali fossero le condizioni migliori per il riconoscimento da parte del programma della posizione esatta e del spostamento traccianti utilizzati.

4.3.1 Stabilizzazione

La stabilizzazione dei video è necessaria per correggere le oscillazioni del drone dovute sia al normale volo del quadricottero sia ai colpi di vento sia durante il video spostavano il drone dalla sua verticale di stazionamento.

I video sono stati corretti grazie ad uno script di stabilizzazione redatto da **Alonso Pizzarro**, all'epoca dottorando all'università della Basilicata.

Lo script operava riconoscendo nei frame dei video, partendo dal primo gli elementi omologhi e da questi elementi fissi provvedeva a traslare il riferimento geometrico dei frame che presentavano uno scostamento. Il risultato delle stabilizzazioni è consistito in video con alcune zone d'ombra ai bordi, molto lontano dalle zone d'interesse, ma in cui gli elementi "fissi" del paesaggio (sponde, letto del fiume, rocce e vegetazione) restavano immobili durante il passaggio del tracciante.

Questa operazione consente al programma di valutare gli spostamenti del tracciante rispetto ad un riferimento statico, corrispondente alla posizione di stazionamento del drone all'avvio del video, che rimarrà stabile per tutti i frame dall'analisi. Le velocità sarà quindi epurata da errori dovuti a casuali spostamenti del drone durante l'acquisizione.

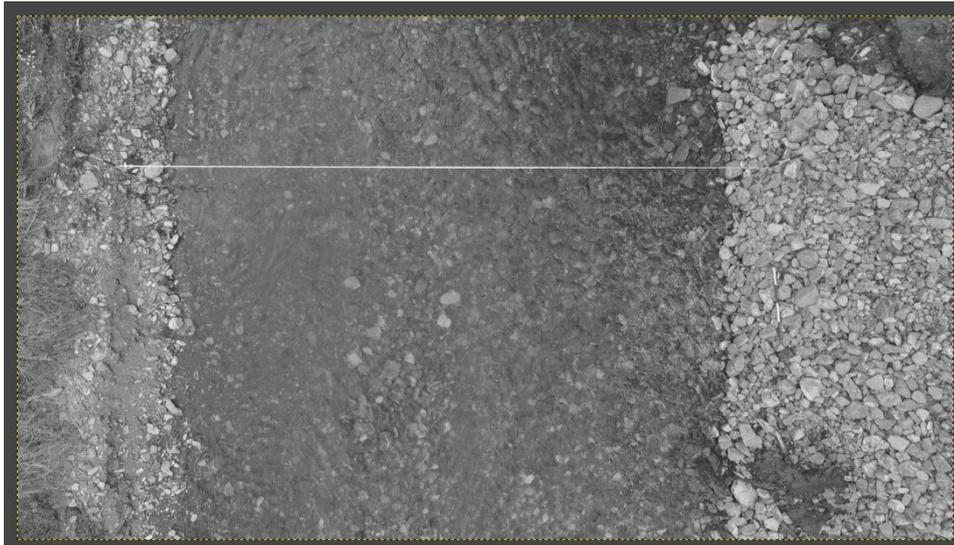
4.3.2 Trasformazione in bianco e nero

Nei video il tracciante non è sempre ben identificabile rispetto al letto del corso d'acqua. Il video è stato acquisito in scala di grigi ed il contrasto tra il tracciante ed il letto del corso d'acqua non è sempre ottimale.

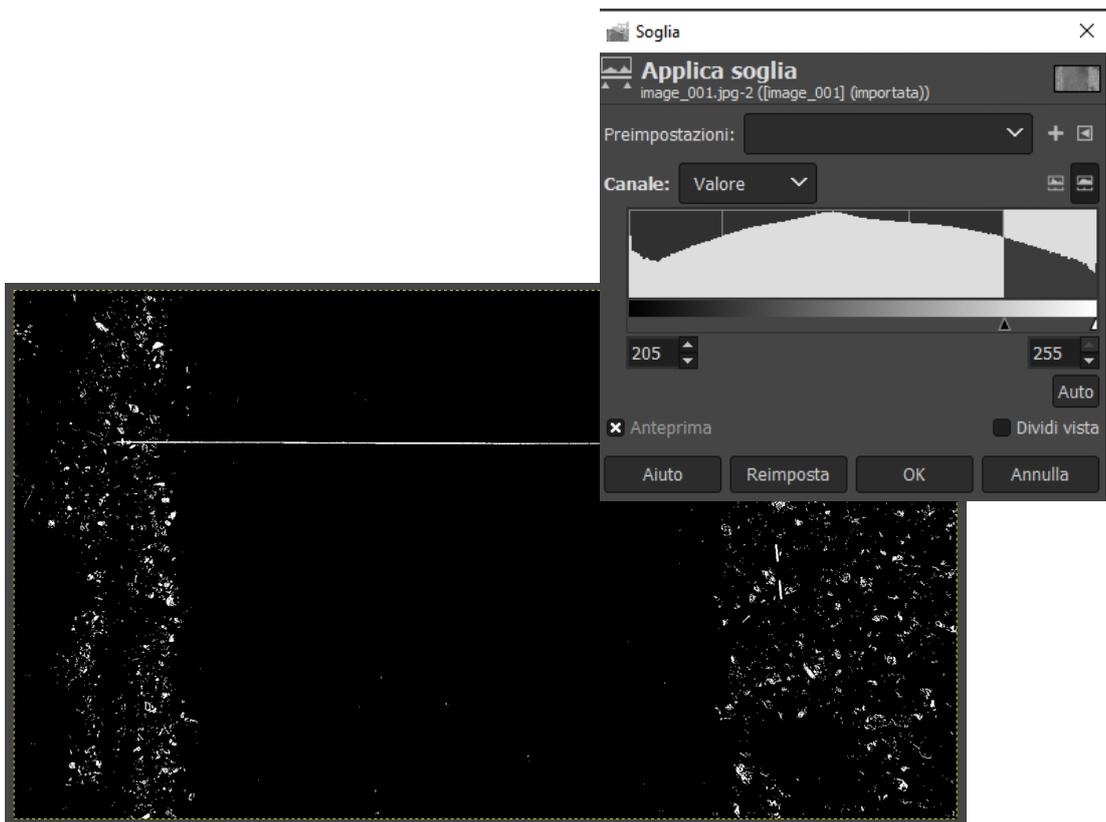
Per ottimizzare il contrasto tra il tracciante ed letto del corso d'acqua si è utilizzato un programma open source di modifica delle immagini di nome GIMP (GNU Image Manipulator Program) che, attraverso tecniche di equalizzazione dell'istogramma ha consentito di applicare una soglia rispetto alla radianza dei pixel che ha generato dei nuovi frame in bianco e nero portando ad un aumento netto del contrasto. (Figura (3-1) e Figura (3.2)).

Il programma visualizza l'istogramma (Figura (3.2) in alto a destra) e consente di indicare un intervallo di valori (nell'immagine pari a (205;255)) che trasformerà l'immagine.

La soglia è stata identificata dopo varie prove. Il risultato scelto è quello che ha permesso di visualizzare in bianco il tracciante, al contrario il fondo è stato restituito interamente in nero.



4-1 Immagine originale in bianco e nero



4-2 Immagine dopo la trasformazione

4.3.3 Ricampionamento

Nel caso in cui i video acquisiti riprendano corsi d'acqua con limitate velocità superficiali può essere opportuno diminuire il frame rate tramite un ricampionamento dei frame. Infatti un frame rate elevato rispetto alla bassa velocità del flusso può indurre una perdita di accuratezza della stima matematica (Gharahjeh e Aydın 2015).

Spostamenti molto piccoli tra frame successivi possono "confondere" il programma che faticherebbe a riconoscerli rischiando di sottostimare la velocità superficiale.

La diminuzione del frame rate compenserà la difficoltà nel riconoscimento del programma in quanto porterà ad aumentare in modulo gli spostamenti del tracciante tra frame consecutivi rendendo più facile il riconoscimento delle posizioni delle particelle che lo compongono e i loro spostamenti.

Il ricampionamento produrrà la riduzione del frame rate di un video già eseguito e si otterrà selezionando per l'analisi un frame ogni due così da aumentare l'intervallo temporale tra due frame consecutivi. Per esempio un video eseguito con un frame rate di 24 fps può passare così a 12 fps

In questo modo il programma può aumentare la sua risoluzione di analisi per velocità ridotte.

Il ricampionamento è stato utilizzato in uno dei casi studio. La decisione è stata presa considerando le informazioni disponibili in letteratura. Maggiori dettagli sono presenti al capitolo: [Numero di frame e densità di tracciante dei casi studio](#) a pagina 52.

4.4 Programmi di elaborazione

Le analisi sono state eseguite sui video scelti come casi studio tramite differenti programmi. Due programmi PIV_lab e Fudaa sono stati utilizzati nel lavoro di tesi e studiati nelle loro parametrizzazioni. Un terzo programma chiamato PTV_lab che è stato applicato ai frame dai ricercatori di Potenza che hanno contribuito in modo significativo con le loro conoscenze per la formazione iniziale necessaria per l'uso di questi programmi. PTV_lab ricorre alla tecnica di analisi PTV. I risultati delle analisi prodotte con PTV_lab sono state confrontate con quelle prodotte attraverso gli altri programmi.

I video prima di essere analizzati sono stati sottoposti a differenti operazioni di pretrattamento.

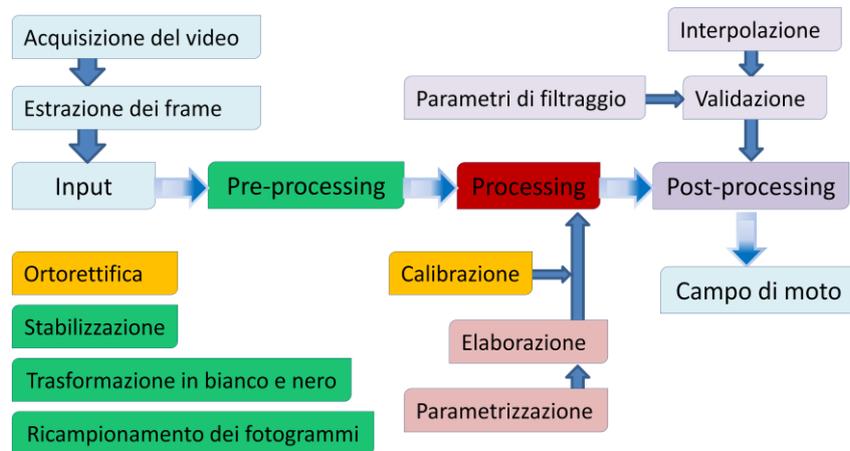
Le operazioni valutate per il pretrattamento sono state:

- una stabilizzazione dei video;
- un filtro per trasformare i frame in bianco e nero;
- un cambiamento della frequenza dei fotogrammi (scegliendo di non considerarne solo uno ogni due per aumentare l'intervallo temporale tra i frame restanti).

Per ciascuno dei due programmi utilizzati durante la tesi (PIV_lab e Fudaa) si sono provate diverse configurazioni di variando i parametri di input richiesti. Per ciascuna configurazione presa in esame per un programma è stata eseguita una differente analisi.

I due programmi utilizzati per le analisi sono stati sviluppati cercando la migliore applicazione della tecnica PIV. Ciascun programma opera secondo approcci differenti e richiede parametri differenti per definire l'analisi.

In generale il flusso di calcolo può essere rappresentato con un diagramma di flusso:



4-3 Diagramma di flusso dei programmi

4.4.1 Regione di interesse

Tutti i programmi hanno richiesto, prima dell’elaborazione, di indicare quale fosse la regione d’interesse da considerare durante la ricerca delle correlazioni. Per ogni analisi eseguita sulla stessa serie di frame, si è mantenuta la stessa regione d’interesse così da poter mantenere il più possibile uguali le aree considerate per la definizione del campo di moto da cui si è estratta la serie di dati del campione.

4.5 PIV_lab

PIV_lab è un tool di Matlab sviluppato da William Thielicke. Il programma applica il metodo di analisi PIV (Particle Image Velocimetry) per ricostruire la velocità di flusso nei fluidi.

Il programma consente di eseguire selezionare due tipologie di correlazione. La prima tipologia di correlazione possibile è la “Direct Cross Correlatio” (DCC) una correlazione incrociata diretta (correlazione nel dominio spaziale), la seconda correlazione (FTP) applica la trasformata di Fourier (correlazione nel dominio delle frequenze). Le velocità ottenute possono quindi essere validate, interpolate e filtrate [19].

4.5.1 Misura della velocità superficiale

IL programma richiederà una serie di passaggi.

Caricamento del video o dei frame

I frame saranno caricati tramite una finestra di input attraverso la quale si dovrà scegliere tra due tipologie di confronto tra i frame. La prima tipologia effettuerà la ricerca della correlazione per ogni coppia di frame forniti (1-2, 2-3, 3-4, ecc...) la seconda (che il programma considera come impostazione di base) effettuerà la correlazione per coppie separate ossia, il primo frame con il secondo, il terzo con il quarto e così via.

Regione d'interesse e Maschere

Il programma, una volta caricati i frame li mostrerà a video (verrà visualizzato il primo di essi ma sarà possibile scorrerli tramite una barra di scorrimento in fondo alla finestra). Tramite le opzioni di "Image setting" si indicherà la Regione d'Interesse (ROI) di forma rettangolare, all'interno della quale il programma eseguirà le analisi di correlazione, ed eventuali maschere che indichino al programma di ignorare parti del frame all'interno della ROI.

Le maschere serviranno per eliminare dalla regione di interesse gli elementi "statici" (quali le rive di un corso d'acqua, rami o altri elementi simili), che erroneamente potranno essere acquisiti per errore durante la realizzazione del video. Dove i frame presentassero elementi non appartenenti al flusso all'interno della ROI il programma assegnerebbe valori di velocità nulli a quei punti nella matrice. Queste velocità nulle non facendo parte del flusso in analisi comprometterebbero i risultati finali se non venissero escluse con le maschere.

Le maschere potranno essere realizzate su un frame ed estese a tutti gli altri caricati oppure indicate su ogni frame separatamente. Sarà anche possibile realizzare prima una o più maschere generali estese a tutti i frame e maschere successive adattate ai singoli frame. La scelta potrà adattarsi alle varie esigenze.

Analisi PIV

La finestra di analisi consentirà di indicare la tipologia di analisi ed i parametri desiderati.

La prima tipologia di analisi chiamata "single pass Direct Cross Correlation" (DCC) consisterà in una correlazione incrociata diretta per la valutazione delle strutture omologhe formate dal tracciante nei frame in esame. I parametri richiesti dall'analisi saranno l'"Interrogation Area" e lo "Step".

- ❑ "Interrogation Area (px)": dimensione dell'area di analisi.

La dimensione dell'area d'analisi è un input fondamentale e sarà definita in funzione della densità dei traccianti nell'immagine analizzata e della velocità superficiale del corso d'acqua. L'area dovrà essere sufficientemente grande da contenere elementi utili per l'elaborazione ma sufficientemente ridotta da consentire una corretta cross-correlazione tra i frame.

□ "Step (px)": passo tra le IA.

Questo valore rappresenta la traslazione dell'area d'analisi dopo ciascuna ricerca (passo). Sarà fornita anche la percentuale di ricoprimento tra due interrogazioni successive in funzione dell'area e del passo impostati.

La seconda tipologia di analisi proposta consiste nella "direct Fast-Fourier Transform Correlation direct fast-Fourier transform correlation with multiple passes and deforming windows" (FFTC). Scegliendo questa analisi sarà possibile migliorare la correlazione eseguendo analisi successive con aree via via più ridotte (e passi ridotti in proporzionalmente).

□ "Interrogation Area (px)": dimensione dell'area di analisi. numero dei passi successivi

Sarà possibile operare indicando nell'analisi da un fino a quattro differenti passaggi di analisi successivi. Sarà necessario indicare la dimensione delle aree di ciascun passaggio separatamente.

L'uso di un'area ampia per il primo passaggio dell'analisi consente di calcolare in modo affidabile lo spostamento nell'immagine dei pattern. Maggiore sarà l'area migliore sarà il rapporto segnale/rumore e quindi più robusta sarà la cross correlazione ma si otterranno risoluzioni vettoriali molto basse. Riducendo la dimensione delle finestre di interrogazione nei passaggi successivi si riuscirà a migliorare la risoluzione vettoriale e si utilizzeranno le informazioni di spostamento del passaggio precedente per compensare. Questa procedura fornirà una risoluzione vettoriale elevata, un elevato rapporto segnale/rumore e un intervallo di velocità dinamico elevato.

□ "Step (px)": passo tra le IA.

Il passo della traslazione dell'area di analisi dopo ciascuna ricerca (all'interno del medesimo passaggio di analisi) sarà indicato solo una volta riferito alla IA del primo passaggio. Nei Passaggi successivi il valore sarà definito in funzione del ricoprimento e dell'area d'analisi assegnata a quel determinato passaggio di analisi.

Calibrazione

I risultati dell'analisi dovranno essere riferiti all'intervallo tra i frame ed ad una dimensione geometrica al fine di ottenere la dimensione reale dei risultati delle analisi.

Senza effettuare la calibrazione le analisi saranno riferite dimensionalmente in pixel (px) e frame per secondo (fps), si desidera invece ottenere i risultati in dimensioni reali riferite in metri (m) e secondi (s).

Queste informazioni saranno inserite nella finestra di calibrazione. La dimensione spaziale sarà inserita indicando l'intervallo temporale tra due frame in millisecondi (ms). La dimensione geometrica identificando su uno dei frame due punti riconoscibili ed indicando la loro distanza in mm (sarà necessario misurare indicare i riferimenti e accertarsi della loro distanza al momento dell'acquisizione del video). Nel caso si ricorra a un pre processamento dell'immagine che non renda facilmente identificabili i riferimenti esiste l'opzione di caricare a video per la calibrazione un'immagine esterna al progetto (per esempio un frame del progetto in una versione non pre processata) su cui si possono indicare i due punti di riferimento e la loro distanza

Forniti i parametri si procede applicando la calibrazione all'analisi. Il programma procederà a calibrare i risultati e fornirà il parametro di conversione tra gli spostamenti tra i frame (px/imagepair) e gli spostamenti reali (m/s).

Validazione dei risultati

I risultati ottenuti dall'analisi potranno essere filtrati impostando i limiti di accettabilità nella direzione parallela e tangente al flusso. Il programma consente di visualizzare in uno scatterplot i risultati delle analisi di velocità. Nello scatterplot sono mostrate le componenti "u" e "v" delle velocità misurate nel frame visualizzato o, barando l'apposito riquadro, misurate nell'intero progetto. Nel grafico è possibile selezionare l'intervallo di accettabilità creando una maschera rettangolare che escluda i valori di velocità che si desidera filtrare.

Si può quindi procedere ad applicare l'intervallo di accettabilità al singolo frame in esame o ai frame nella loro interezza.

Oltre alla definizione di limiti è possibile indicare singolarmente dei vettori che si desidera vengano scartati.

Estrazione dei risultati

Tramite i comandi di estrazione del programma sarà visualizzato il campo di moto superficiale del flusso. L'informazione è ottenuta mediando le matrici di velocità generate dal programma (una matrice per ogni coppia di frame oggetto d'analisi).

Per estrarre i risultati è necessario salvarli nello spazio di lavoro di Matlab (MATLAB workspace) dove aprendo la matrice "v_original" dei risultati si otterrà la matrice delle velocità validate e mediate.

4.6 Fudaa

Fudaa è un software capace di ricostruire i campi di velocità superficiale e le portate transitanti in sezioni trasversali di corsi d'acqua partendo da video (o frame estratti da video) che riprendano il moto del flusso nella sezione d'interesse e nelle condizioni che si desiderano misurare. L'analisi si basa sulla metodologia LSPIV

Si è utilizzata la versione di Fudaa 1.6.4 sviluppata sul finire del 2018.

“Lo sviluppo di Fudaa - LSPIV è stato eseguito da DeltaCAD dall'agosto 2010 con finanziamenti e sotto la direzione di EDF e Irstea. Questo sviluppo fa parte del progetto di software libero Fudaa per applicazioni idrauliche. Le lingue supportate sono il francese e l'inglese e il software può essere utilizzato con i sistemi operativi Windows o Linux. Le condizioni di distribuzione sono quelle delle licenze GPL gratuite e il software è di proprietà intellettuale di EDF e Irstea” [20].

Il programma è liberamente scaricabile all'indirizzo riportato [Sitografia 1].

4.6.1 Misura della velocità superficiale

Come detto il programma esegue un'analisi basandosi sul metodo LSPIV. Per avviare l'analisi è necessario percorrere una serie di passaggi.

Caricamento del video o dei frame

Il video o i frame già estratti saranno caricati nel programma. Durante il caricamento si fornirà anche il frame rate del video. Il video ed i frame che si desidera caricare potranno essere sia in scala di grigi sia in bianco e nero. Nei video considerati come casi studio non sono state notate significative variazioni nella capacità di analisi del programma in funzione di questo pretrattamento.

Ortorettifica

È necessario indicare al programma la calibrazione geometrica dei frame. Sarà possibile fornire questa informazione scegliendo tra due metodi proposti: (Scaling) (Ortorectification mode).

Scegliendo l'opzione (Scaling) si procederà "riscaldando" l'immagine in funzione di un riferimento geometrico identificato nel frame stesso.

L'opzione (Ortorectification mode) consentirà di indicare dei punti di riferimento (come dei marker) nell'immagine fornendone le coordinate. In funzione delle coordinate immesse il programma opererà un'ortorettifica dell'immagine.

In entrambe le scelte di correzione geometrica si dovrà inserire l'altezza del tirante idraulico nella sezione.

Analisi LSPIV

Prima di avviare l'analisi è necessario inserire i parametri che definiscono i criteri di lavoro del programma.

Il tracciante è ricercato tramite alcuni parametri di interrogazione chiamati Interrogation Area e Search Area. Entrambi i parametri sono estremamente importanti e influiscono distintamente nelle operazioni di ricerca del programma stesso.

Il programma procede nella ricerca considerando un frame alla volta e, terminato una volta terminato, passa al successivo. Il programma cerca di identificare per ciascuna particella visibile nel frame di esame la posizione che avrà nel secondo frame ricavando così lo spostamento compiuto.

L'identificazione della posizione nel frame successivo delle particelle di tracciante è eseguita con la tecnica PIV. La ricerca della corrispondenza nel secondo frame avviene traslando la matrice di confronto (IA) all'interno di un'area (centrata nello stesso baricentro della IA nel primo frame) detta Search Area. Nella comparazione delle matrici sono calcolati dei coefficienti di correlazione. La posizione delle particelle nel secondo frame è definita da un coefficiente di correlazione maggiore.

Poiché il solo indice di correlazione non è garanzia del corretto riconoscimento della corrispondenza è indicato applicare ai risultati grezzi ottenuti un filtraggio, come già illustrato in precedenza.

Griglia di analisi

Per avviare l'analisi è necessario, tramite una differente finestra, indicare una griglia di punti in quali punti il programma dovrà derivare la velocità superficiale.

Dopo quest'ultima informazione al programma è possibile l'analisi che solitamente richiede dai dieci ai quaranta minuti. Tanto più sarà fitta la griglia di punti e tanto più grandi la IA e la SA, maggiore sarà il tempo necessario per l'analisi.

Questa analisi genera i primi campi di moto ricavati dal programma. I campi di moto generati sono tanti quante sono le coppie di frame analizzate e conterranno molti errori grossolani che saranno limati nei successivi filtraggi.. Solo dopo il processo di filtraggio e dopo aver effettuato la media dei valori sarà generato un campo di moto finale frutto dell'analisi di tutti i frame.

Considerazioni sui parametri di confronto (IA e SA)

Interrogation Area, IA: area di ricerca confrontata tra i frame.

La dimensione corretta è quella che meglio "comprende" nella sua area le forme del tracciante che deve essere individuato. Essa deve quindi essere superiore alla grandezza del singolo tracciante.

La sua dimensione deve essere sufficientemente grande da poter comprendere il tracciante e quindi riconoscerlo, ma anche sufficientemente piccola da rendere efficiente la comparazione.

Aree ridotte comportano matrici incapaci di considerare in modo significativo al loro interno le forme del tracciante e portando alla ricerca di corrispondenze prive di significato

Aree eccessive portano il programma a comparare matrici che considerano al loro interno strutture sempre formate dalle particelle di tracciante così grandi che per effetto della turbolenza, del profilo di velocità ed i altri fattori varieranno da un'immagine all'altra e potranno non essere riconosciute dal programma in due immagini successive proprio per la loro natura variabile. Il programma potrebbe riconoscere come corrispondenze, in due immagini, due strutture che nella realtà non sono composte dalle stesse particelle di tracciante.

Search Area, SA: Definisce la ricerca della posizione nel secondo frame della matrice (IA) identificata nel frame in esame. La dimensione dei quattro parametri che caratterizzano la

Search Area definiscono appunto l'area (centrata sull'Interrogation Area in esame nel primo frame) all'interno della quale il programma esegue i confronti per cercare il tracciante tramite le comparazioni.

La dimensione deve tenere conto della velocità (stimata) con il tracciante si sposta nell'intervallo di tempo intercorso tra due frame: la dimensione di quest'area corrisponde a quella degli spostamenti che prevediamo il tracciante compirà nel tempo intercorso tra due frame successivi. È possibile differenziare la dimensione dell'area in modo da farle assumere una forma non quadrata.

La Search Area è definita nel programma tramite quattro vettori perpendicolari che formano un riferimento cartesiano centrato nel baricentro dell'Interrogation Area. Quattro vettori sono: S_{ip} , S_{im} , S_{jm} , S_{jp} , l'indice "i" corrisponde ai vettori verticali, "j" ai vettori orizzontali, "p" ai vettori del primo quadrante e "m" ai vettori del terzo quadrante.

P Calculation parameters ×

Interrogation area

Area size (m): Area size (pix):

Center position J: I:

Search area

Sim (m/s):	<input type="text" value="1.714"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sim (pix):	<input type="text" value="8"/>
Sip (m/s):	<input type="text" value="1.714"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sip (pix):	<input type="text" value="8"/>
Sjm (m/s):	<input type="text" value="1.714"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sjm (pix):	<input type="text" value="8"/>
Sjp (m/s):	<input type="text" value="1.714"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Sjp (pix):	<input type="text" value="8"/>

4-4 finestra di input dei parametri IA e SA in Fudaa

Il modulo di questi vettori può essere indicato sia in pixel, in modo intuitivo corrispondenti alla dimensione della SA, o come una velocità equivalente in (m/s), corrispondente alla velocità necessaria ad una particella di tracciante di raggiungere, nel tempo intercorso tra due frame, la posizione indicata dal vettore partendo dal centro del riferimento.

Validazione dei risultati

Le operazioni di filtraggio consentono di ottimizzare i risultati. Il programma non sempre riesce ad identificare correttamente, tramite l'indice di correlazione, la posizione delle particelle di tracciante nel secondo fotogramma. È facile notare gli errori grossolani nella visualizzazione dei campi di moto non filtrati.

I vettori generati da un'errata correlazione mostrano spesso un verso discorde rispetto a quelli che li circondano e modulo molto elevato.

Tramite Fudaa è possibile eseguire un filtraggio ricorrendo a due differenti modalità. Si può eseguire un filtraggio per velocità oppure per correlazione.

Il filtraggio per intervalli di velocità confronta i vettori di velocità ottenuti dall'analisi con dei vettori forniti dall'operatore. I vettori forniti rappresentano degli intervalli di

accettabilità. Ogni vettore non compreso negli intervalli indicati viene scartato e non considerato nei passaggi successivi.

Gli intervalli da compilare sono tre:

Intervallo di Magnitudo di velocità “*Velocity magnitude thresholds (m/s)*”: questo intervallo si indicheranno i valori di massimo e minimo da considerare dei moduli dei vettori;

Intervallo del modulo orizzontale “*V_x component magnitude thresholds (m/s)*”: si questo intervallo indica l’intervallo orizzontale entro il quale dovranno essere compresi i valori delle componenti orizzontali dei vettori;

Intervallo del modulo verticale “*V_y component magnitude thresholds (m/s)*”: questo intervallo indica i vettori che dovranno avere componenti verticali comprese nei valori indicati per passare il filtro.

Le componenti verticali ed orizzontali saranno considerate dal programma in funzione di come verrà caricata l’immagine. Un errore grossolano potrà essere commesso non considerando la velocità di flusso in funzione del sistema relativo del programma.

Al termine delle operazioni di filtraggio si otterrà il campo di moto riconosciuto dal programma tramite i traccianti

File di output

Il campo di moto ottenuto è salvato dal programma in un file chiamato “average_vel.out” all’interno del progetto salvato in formato “.zip”. Per visualizzare i risultati è necessario rinominare il file in modo che la sua estensione diventi quella di un file di testo (si è scelto durante le operazioni di ricorrere all’estensione “.txt”). Il file così ridefinito conterrà al suo interno quattro colonne. Le prime due colonne del testo corrisponderanno, in ciascuna riga, alle coordinate X e Y nel sistema di riferimento dell’immagine mentre le ultime due colonne rappresenteranno le componenti di velocità (nel punto definito dalle coordinate della riga) nelle direzioni X e Y.

4.6.2 Ricostruzione della portate

Tramite Fudaa è possibile calcolare la portata transitante nella sezione d’interesse dopo avere calcolato il campo di moto delle velocità superficiali.

Il primo passo consiste nell'indicare la geometria della sezione. La sezione può essere indicata tracciando il transetto manualmente o compilando un foglio di calcolo esterno e caricandolo nel programma.

Una volta indicata la geometria il programma elabora sia i dati sul livello idraulico dati durante l'ortorettifica sia il profilo di velocità per misurare la portata.

È possibile indicare la posizione di più transetti. In questo modo il programma calcolerà la porta in ciascuno di essi e ne definirà anche la media. Tutte le portate calcolate nei transetti nonché la loro media sono riportate nel report finale che può essere chiesto al programma di generare al termine dell'analisi.

4.7 PTV_lab

PTC_lab è un tool di Matlab sviluppato nei suoi algoritmi matematici principalmente da Wernher Brevis durante il suo dottorato, nuovi algoritmi e correzioni di errori sono stati implementati dal dott. Brevis e dal suo gruppo di ricerca mentre l'adattamento . Lo script dell'interfaccia utente dal progetto open source PIV_lab e lo sviluppo di nuove funzionalità è stato frutto del lavoro di Antoine Patalano durante i suoi studi di dottorato.

Il programma esegue misure di velocità attraverso l'analisi di immagini attraverso l'applicazione della tecnica ad approccio Lagrangiano PTV ed è stato realizzato espressamente per l'analisi di immagini sperimentali di meccanica dei fluidi.

Il programma consente di eseguire selezionare due tipologie di correlazione. La prima tipologia di correlazione possibile è la "Direct Cross Correlatio" (DCC) una correlazione incrociata diretta (correlazione nel dominio spaziale), la seconda correlazione (FTP) applica la trasformata di Fourier (correlazione nel dominio delle frequenze). Le velocità ottenute possono quindi essere validate, interpolate e filtrate.

4.7.1 Misura della velocità superficiale

IL programma richiederà una serie di passaggi.

Caricamento del video o dei frame, Regione d'Interesse e Maschere

La procedura di caricamento delle immagini, di selezione della ROI e di creazione delle maschere è identica a quella presentata per il programma PIV_lab.

Analisi PTV

L'analisi utilizzata attraverso programma consente di individuare le differenti particelle nei frame, è necessario fornire al programma le caratteristiche della ricerca che definiranno l'identificazione delle particelle di tracciante.

I parametri richiesti dal programma sono:

- "Correlation Threshold": si potrà indicare il coefficiente di correlazione limite;
- "Sigma" (px): indica la minima dimensione in numero di pixel delle particelle di tracciante; non saranno considerate forme con dimensioni inferiori quindi il parametro dovrà essere impostato dopo aver considerato le dimensioni delle particelle nei frame;
- "Intensity Threshold": si indica in questa voce la soglia d'illuminazione (valore compreso tra (0;100)) che considereremo per le particelle di tracciante; elementi con illuminazione inferiore alla soglia non saranno considerati dal programma.

Una volta settati i parametri si dovrà considerare la bontà dei dati immessi avviando il comando "Preview current frame" per verificare nel frame visualizzato quali e quante particelle verranno considerate; i parametri di input saranno così verificati e variati in funzione della capacità di identificazione.

Sarà quindi necessario scegliere il tipo di algoritmo a cui si vorrà ricorrere. Nelle analisi considerate si è deciso di operare la cross correlazione per Interrogation Area ("Cross-correlation" "By interrogation area (px)").

- "Interrogation area (px)": che chiederà di indicare la dimensione dell'area di indagine, posta con baricentro nella posizione della particella di tracciante identificata nel primo frame, nella quale avverrà la ricerca per identificare la posizione della particella nel frame successivo. Il valore di questa IA è definito come il valore di massimo spostamento tra i frame della particella (nota la dimensione dei frame e stimata la velocità massima).

Si faccia riferimento per la stima del massimo valore di spostamento al foglio di calcolo dei parametri di volo che dai dati misurati in campo fornirà le informazioni utili

Attenzione: l'IA in questo approccio ha lo stesso nome del parametro IA usato in Fudaa ma il suo significato è differente. Si può trovare invece una corrispondenza tra la SA di Fudaa e l'IA di PIT_lab.

Calibrazione

La calibrazione avverrà in modo simile a come già descritto per PIV_lab.

Validazione

Tramite i comandi di analisi statistica del programma sarà possibile visualizzare l'istogramma di una variabile scelta, lo scatter plot delle componenti orizzontali e verticali della velocità, le traiettorie di tutte le particelle identificate dal programma e derivare da queste il campo di moto superficiale del flusso. L'informazione è ottenuta mediando le matrici di velocità generate dal programma (una matrice per ogni coppia di frame oggetto d'analisi).

Estrazione dei risultati

Per estrarre i risultati è necessario salvarli nello spazio di lavoro di Matlab (MATLAB workspace), fatto ciò si eseguirà lo script "postanalysis.m". che richiederà di inserire nel file dello script il valore del parametro di conversione nella variabile `calib` ed il nome del file elaborato nel valore di `load('nome_file_elaborato')` rispettivamente nella 5° e 6° riga del codice.

Il file elaborato dovrà però trovarsi salvato nella stessa si "postanalysis.m" affinché venga trovato dallo script.

Fatto ciò si potrà eseguire lo script che visualizzerà un grafico rappresentante il campo di moto nella ROI. Nel workspace di matlab si troveranno tutti i dati ottenuti dall'elaborazione.

5 Casi studio: Basento e Noce

Per le analisi sono stati presi in considerazione due video. I due video includono una ripresa realizzata sul fiume Basento, alla cui esecuzione e preparazione ho avuto la possibilità di contribuire attivamente, e due video forniti dal gruppo di lavoro del Professor Manfreda eseguiti in precedenza sul fiume Bradano e sul fiume Noce.

5.1 Basento

Il Basento è il fiume più lungo della Basilicata: nasce nell'Appennino Lucano settentrionale e scorre da nord-ovest a sud-est attraversando le province di Potenza e Matera e sfociando nel Golfo di Taranto. "Il bacino è caratterizzato da una scarsa percentuale di superficie permeabile, intorno al 20%, scarse precipitazioni nella parte bassa del bacino e piuttosto copiose nella parte più alta dove si riscontra anche una discreta presenza di emergenze sorgentizie." [Sitografia 2]

Il caso studio riguardante il fiume Basento è stato eseguito durante un'acquisizione in campo in data 13/06/2018, la sezione in esame si trova all'interno del Comune di Potenza.

Si è scelto di prendere in esame una sezione del fiume facilmente raggiungibile dagli operatori, poco profonda e con una certa regolarità del letto, dove flusso è rettilineo e senza canali secondari.

Durante la mattinata sono state eseguite le misure di velocità superficiale con strumento radar e misure di velocità nella sezione con mulinello. In seguito alle misurazioni "convenzionali" si è compiuta l'acquisizione di due video tramite una telecamera montata su un drone quadricottero posto sulla verticale del centro della sezione; in ciascun video si è fatto ricorso ad un differente tracciante: nel primo si è disperso nel flusso d'acqua un truciolato di legno grossolano; mentre nel secondo si è provato a acquisire del carbone di legno preventivamente frantumato in elementi il più possibile omogenei.

Problematiche del video acquisito

~ Stabilità del drone

Durante l'acquisizione dei video il drone non è riuscito a mantenersi stabile a causa di un vento incostante; dopo le prime analisi si è deciso di procedere ad una stabilizzazione delle immagini; al fine di migliorare il confronto attuato dai programmi tra i vari frame.

~ Dispersione del tracciante (densità del tracciante nell'immagine)

Data la natura turbolenta del fiume non si è rivelato facile eseguire correttamente la dispersione dei traccianti. La diffusione omogenea dei traccianti non è stata completamente raggiunta poiché i traccianti sparsi hanno avuto la tendenza ad aggregarsi in alcune parti della sezione lasciandone scoperte altre.

~ Contrasto del tracciante

I due video sono stati eseguiti con differenti traccianti per verificare quale dei due ottenesse un contrasto migliore, ossia quale risultasse maggiormente visibile rispetto alle caratteristiche del fondo e facilitasse per questo le analisi successive. Il video acquisito durante la dispersione del carbone presenta un contrasto molto ridotto rispetto alle ombre sul fondo del fiume ed è per questo stato scartato nelle analisi. Il truciolato di legno ha invece delle caratteristiche tali da essere facilmente riconoscibile e consente anche un ottimo preprocessing che trasformi i frame dalla scala di grigio al bianco ed nero.

5.1.1 Strumentazione utilizzata nel video del Basento

Mulinello

Il mulinello è il SEBA F1 è utilizzato per misurare la velocità dell'acqua in fiumi, torrenti e canali in un intervallo compreso tra 0.025 m/s e 10 m/s. Il contatto per la misura dei giri al secondo è eseguito tramite un magnete per evitare attrito. [Sitografia 4]

Radar

Il radar utilizzato è un SVR della Viatronics del modello "SVR-3 Pro. Questo modello consente la misura senza contatto delle velocità superficiali dei corsi d'acqua; fornendo a schermo in tempo reale il valore della misura eseguita: l'azienda infatti dichiara un intervallo di misura tra i valori di 0.1 m/s e 80 m/s. Lo strumento possiede inoltre un sistema di compensazione dell'angolo verticale tramite un sensore incorporato. [Sitografia 5]

Le misure ottenute tramite il radar non sono state utilizzate poiché si scostavano dalle misure eseguite con il mulinello e si è deciso di ritenere quest'ultimo strumento come maggiormente affidabile per fornire i dati di confronto.

Camera

La camera utilizzata nel video e montata sul drone è il modello FC6310 con risoluzione 5472*3648, focale di 8.8 mm, dimensione del pixel di 2.41*2.41 μm e campo visivo (FOV) di 94°.

Drone

Il phantom è il 3pro della ditta dji. Il drone pesa 1236 g, ha degli stabilizzatori nei tre assi ed può ricorrere per il posizionamento satellitare (Satelite Positioning Sistem) ai sistemi GPS e GLONAS. [Sitografia 6]

5.1.2 Pre-elaborazioni eseguite sul video

IL video è stato oggetto di una stabilizzazione e di una trasformazione dei frame dalla scala di grigio attraverso tecniche di equalizzazione dell'istogramma in nuovi frame in Bianco e Nero.

Sono stati quindi testate tre serie di frame

- I. Frame non stabilizzati in Bianco e Nero;
- II. Frame stabilizzati in scala di grigio;
- III. Frame stabilizzati in Bianco e Nero

5.2 Noce

Il fiume Noce è il più importante corso d'acqua che attraversa il sistema montuoso Sirino Papa. Scaturisce dalle Murge del Principe (1398) e sfocia nel mar Tirreno, nella piana di Castrocuco dopo aver percorso circa 50 km. Il fiume è caratterizzato da portate molto variabili dovute alla scarsa estensione del suo bacino idrografico e alle elevate pendenze che lo caratterizzano. [Sitografia 3]

L'acquisizione del video ha avuto luogo nel comune di Castrocuco dove il Noce presenta basse pendenze; la sezione è in prossimità di un ponte che ha permesso un buon punto di acquisizione per il radar.

Nel video del fiume Noce il tracciante ha una distribuzione spaziale omogenea con pezzatura degli elementi abbastanza uniforme, la densità di tracciante è pari a $3.40\text{E}-04$ - $1.63\text{E}-04$ (particelle/n pixel)

Problematiche del video acquisito

~ Ricampionamento

Si è deciso di ricampionare il video del Noce portandolo da 24 fps a 12 fps: la decisione è stata presa per aumentare gli spostamenti delle particelle di tracciante tra i frame.

Durante la calibrazione delle immagini si è osservato come confrontando il parametro di risoluzione spaziale dei frame del Noce pari a (1 px = 0.009 m) con quello dei frame del Basento di valore (1 px = 0.005 m) si nota che la dimensione in pixel delle particelle di tracciante sia quasi dimezzata (le particelle utilizzate hanno dimensione centimetrica). Questa differenza è dovuta alla differente quota stazionamento dell'UAV (Per il Basento a 10 m, per il noce a 15 m).

Il sottocampionamento ha portato i frame per secondo da 24 a 12, così da accentuare gli spostamenti in relazione alle dimensioni delle particelle.

~ Contrasto del tracciante

I frame sono stati forniti già trasformati in bianco e nero per ovviare al basso contrasto tra il tracciante ed il letto del fiume.

5.2.1 Strumentazione utilizzata nel video del Noce

Mulinello

Il mulinello è il SEBA F1 è utilizzato per misurare la velocità dell'acqua in fiumi, torrenti e canali in un intervallo compreso tra 0.025 m/s e 10 m/s. Il contatto per la misura dei giri al secondo è eseguito tramite un magnete per evitare attrito. [Sitografia 4]

Camera

La camera utilizzata nel video e montata sul drone è il modello FC6310 con risoluzione 5472*3648, focale di 8.8 mm, dimensione del pixel di 2.41*2.41 μm e campo visivo (FOV) di 94°.

Drone

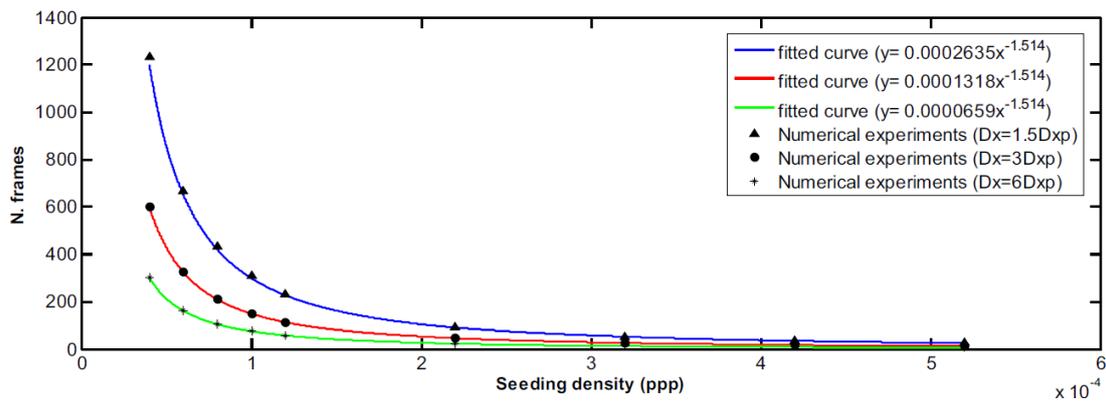
Il phantom è il 3pro della ditta dji. Il drone pesa 1236 g, ha degli stabilizzatori nei tre assi ed può ricorrere per il posizionamento satellitare (Satelite Positioning Sistem) ai sistemi GPS e GLONAS. [Sitografia 6]

5.2.2 Pre-elaborazioni eseguite sul video

IL video non è stato stabilizzato ma è invece stato sottoposto ad una trasformazione dei frame dalla scala di grigio attraverso tecniche di equalizzazione dell'istogramma in nuovi frame in Bianco e Nero. Dopo aver considerato la densità di tracciante nel video e lo spostamento delle particelle tra i frame è stato deciso di eseguire un ricampionamento dei frame. La scelta è stata esposta nel capitolo successivo.

5.3 Numero di frame e densità di tracciante dei casi studio

I programmi necessitano, per poter definire il campo di velocità in una sezione, di un certo numero di frame: il numero necessario all'analisi è in funzione della densità di dispersione del tracciante nei frame e dello spostamento in relazione alle dimensioni delle particelle. L'articolo [12] studia questa relazione per la tecnica PTV. Nel grafico (4-1), riportato nell'articolo citato, sono raffigurate le curve utili per definire il numero di frame necessari per l'analisi.



5-1 Curve interpolati per la stima del numero di frame ottimale

Considerando quanto detto nell'articolo si è proceduto a valutare la bontà delle analisi.

	Basento	Noce
Particelle per pixel	4.90E-04 ppp	3.40E-04 1.63E-04 ppp ppp
Dimensione media delle particelle	2 - 3 cm 4 - 6 px	2 - 3 cm 2.2 - 3.3 px
Velocità media	0.40 m/s 3 px/s	0.43 m/s 4 px/s
D/Dx (rapporto tra la dimensione della particella e il suo spostamento secondo la velocità di riferimento)	0.5	1.5
Numero di frame disponibili per l'analisi	350	70

5-1 Dati d'analisi per il numero di frame minimo dei video casi studio

Nella tabella (4-1) sono riportati i dati d'interesse per poter valutare il numero minimo di frame necessario per l'analisi. Per il fiume Noce si osserva che nel grafico, per una densità di tracciante compresa nell'intervallo ($3.40E-04$; $1.63E-04$) e rapporto DX/DXp di 1.5, il numero minimo di frame è di circa 50, numero soddisfatto durante l'analisi dalla disponibilità di 70 frame. Per il fiume Basento la densità è ottima ($4.90E-04$) ma il rapporto Dx/Dxp di 0.4 è ridotto: ci troviamo comunque in una condizione cautelativa poiché sono a disposizione 350 frame.

5.4 Schede Fiumi

I video ed i rispettivi frame sono fondamentali per l'analisi ma ciascun video acquisito dovrà essere accompagnato dalle informazioni contenenti i metadati riguardanti la sezione dove si esegue la misura, la data di acquisizione e le altre condizioni al contorno che caratterizzeranno la misura in campo.

Per riuscire a standardizzare la tipologia di dati che accompagneranno i video, si è realizzata una scheda che possa, il più facilmente possibile, raccogliere al suo interno tutte le informazioni utili e possa aiutare l'operatore come lista di controllo per assicurarsi di aver preso nota di tutti i dati.

La necessità di realizzare procedure operative e modalità di archiviazione dei dati con protocolli standardizzati al fine di aiutare a produrre studi i cui risultati siano utilizzabili, utili ed informativi è stato sottolineato nell'articolo [13]

La scheda è suddivisa in cinque parti principali con le informazioni caratterizzanti:

- a) La sezione;
- b) Il video;
- c) Il tracciante;
- d) Le misure di riferimento;
- e) L'analisi ottica

Caratteristiche della sezione

La prima sezione comprende al suo interno le informazioni relative all'indagine in campo: sono riportate la data di acquisizione, la posizione della sezione, alcune informazioni sulla sezione e sul fondale del corso d'acqua.

Caratteristiche del video

Questa parte della tabella contiene una descrizione sommaria delle condizioni di illuminazione, il tipo di drone, la quota di volo, il modello della fotocamera, la frequenza di campionamento e la durata del video acquisito.

Il tracciante utilizzato

Sono riportate la tipologia di tracciante, le sue dimensioni, il colore e la sua densità.

Le misure di riferimento

Nella tabella è indicata la strumentazione con cui sono state acquisite le misure di riferimento, la porta transitante nella sezione al momento del video calcolata in base alle velocità misurate, la profondità massima nella sezione, la larghezza della sezione, la velocità media e massima misurate ed infine le misure di riferimento acquisite (ed utilizzate per la portata indicata in questa sezione) accompagnate dalla posizione in cui sono state acquisite e la profondità nel punto.

Pre elaborazioni

Questa sezione della scheda raccoglie le operazioni di pre-elaborazione applicate sui frame del programma.

Analisi ottiche

Nell'ultima parte della scheda si espongono le informazioni relative alle analisi ottiche già eseguite sul video. Si indica il programma di calcolo adottato, le dimensioni della regione d'interesse, i parametri di calibrazione dei frame, l'intervallo di validazione ed infine le simulazioni numeriche eseguite con il programma esplicitando i parametri caratteristici ed il numero di frame considerati per ogni singola simulazione.

FIUME ____			
A) Caratteristiche della sezione			
Data ed ora di esecuzione del video			
Coordinate geografiche della sezione di misura			
Tipologia di sezione trasversale			
Pendenza del fondo (%)			
Materiale del fondo			
Trasporto solido al fondo			
Trasporto solido in sospensione			
B) Video			
Condizioni di illuminazione			
Tipologia SAPR			
Quota di volo (m)			
Inclinazione della camera (gradi)			
Modello della camera			
Frequenza di campionamento (Hz)			
Durata del video acquisito (s)			
C) Tracciante			
Tipologia			
Dimensione media del tracciante (m)			
Colore			
Densità (particelle/pixels)			
D) Misure di riferimento			
Tipologia di strumento			
Q (m ³)			
H max (m)			
Larghezza trasversale (m)			
U max (m/s)			
U media (m/s)			
Distanza dal bordo sinistro (px)		Velocità (m/s)	
E) Pre-elaborazioni			
Stabilizzazione		Ricampionamento	
Trasformazione in B/N			
E) Analisi Ottica			
Programma di calcolo adottato:			
Dimensione della regione d'interesse (mm)			
x		w	
y		h	
Calibrazione			
Elemento di riferimento			
Real distance (mm)			
1 (px) = (m)			
Validazione			
u		v	
-u		-v	
Simulazioni numeriche investigate			
Algoritmo di calcolo	Frame rate utilizzato	Finestra di analisi	Numero di frame

6 Risultati

Allo scopo di valutare l'efficacia delle varie parametrizzazioni adottabili nell'applicazione delle tecniche ottiche sono state compiute varie elaborazioni sulle varie serie di frame con i programmi PIV_lab e Fudaa

Per ciascuna parametrizzazione che si è deciso di indagare; si è eseguita un'analisi i cui risultati sono stati poi confrontati e discussi. Ciascuna analisi ha prodotto, nell'area di interesse indicata dal programma, un campo di moto, dal quale sono stati estratti dei valori in alcuni punti nella sezione, ad intervalli regolari, posti in posizioni specifiche ossia dove sono state eseguite misure di velocità superficiale per mezzo di strumenti tradizionali. Per ogni video caso studio esiste un campione di dati di confronto composto da 12 valori per il Basento e 13 per il Noce; da ogni analisi elaborata si è estratto un campione alle posizioni corrispondenti per quello specifico caso studio.

In ogni grafico in cui sono stati mostrati per esteso i valori di velocità o gli errori percentuali dei campioni sono state poste in ascissa le posizioni a cui corrisponde il dato del campione ed in ordinata la velocità superficiale o l'errore percentuale corrispondente. Non tutti i grafici sono stati inseriti in questo capitolo. I grafici esclusi sono stati inseriti in una sezione in allegato.

6.1 Valutazione dell'errore

Si è rivelato necessario trovare degli strumenti per valutare numericamente la bontà dei campioni di confronto generati dalle analisi; così da poterle confrontare tra loro, per riconoscere i programmi e le loro configurazioni migliori.

Per confrontare le analisi si è ricorso a due parametri: allo scarto quadratico medio (RMSE), per poter valutare la qualità del campione dell'analisi nel suo insieme, ed all'errore percentuale, per valutare ciascun valore del campione riferito alla velocità superficiale misurata con strumenti tradizionali nel medesimo punto. Lo scarto quadratico medio ci fornisce l'informazione di quanto quel dato campione corrisponda nel complesso alle misure di riferimento, mentre gli errori percentuali ci permettono di valutare dove le singole analisi hanno misurato meglio le velocità superficiali.

Misure di riferimento

Le misure di riferimento per il calcolo degli scarti utilizzati per il calcolo del RMSE e dell'errore percentuale derivano da misure di velocità con tecniche tradizionali eseguite durante la campagna di misure che ha portato all'acquisizione dei video.

Scarto quadratico medio RMSE

Lo scarto quadratico medio è stato calcolato su ciascun campione sommando lo scarto al quadrato tra i singoli valori che lo compongono e la misura di riferimento corrispondente acquisita con una metodologia tradizionale (nei casi studio considerati è stata eseguita con un mulinello idraulico), dividendo quindi la somma dei quadrati per il numero dei valori del campione e ponendo il tutto sotto radice quadrata.

$$RMSE = \sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}};$$

Dove:

- i : posizione della velocità nel campione e nella serie di misure di riferimento;
- x_i : velocità misurata nella posizione "i" appartenente al campione in esame;
- \bar{x} : velocità di riferimento nella posizione "i", ottenuta con misure tradizionali;
- N : numero di valori che compongono un campione.

Errore percentuale

Per ogni velocità del campione si è calcolato un rispettivo errore percentuale. L'errore percentuale si è facilmente calcolato dividendo lo scarto tra la velocità nella posizione "i-esima" e la velocità di riferimento "i-esima" per la velocità di riferimento e moltiplicando per cento:

$$Errore \% = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} * 100;$$

- i : posizione della velocità nel campione e nella serie di misure di riferimento;
- x_i : velocità misurata nella posizione "i" appartenente al campione in esame;
- \bar{x} : velocità di riferimento nella posizione "i", ottenuta con misure tradizionali;

6.2 Post elaborazione

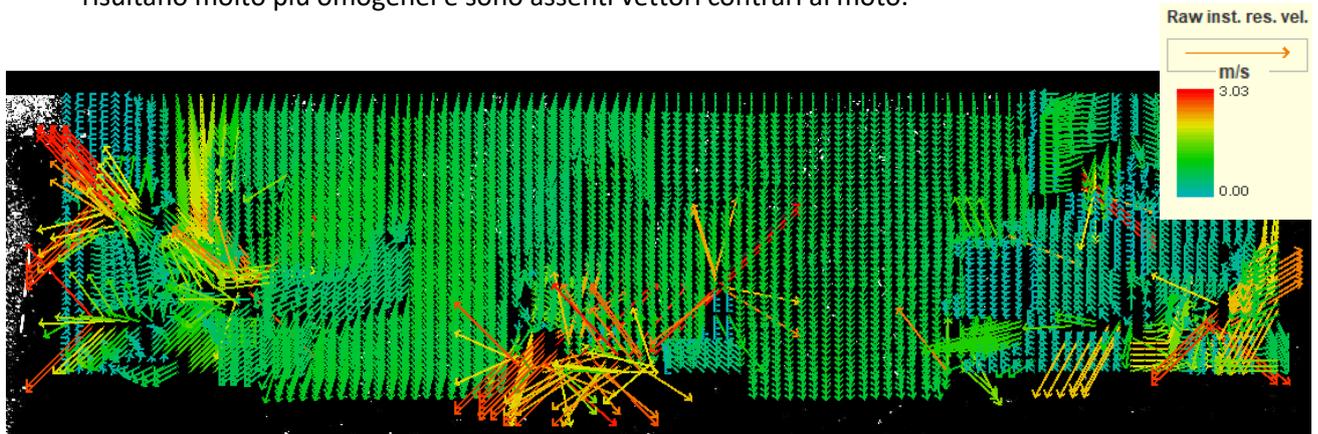
Al termine di ciascuna elaborazione di analisi si è proceduto alla validazione dei risultati applicando il filtraggio integrato nel programma utilizzato.

Il filtraggio è stato impostato in modo da scartare i vettori affetti da errore grossolano. Nella direzione verso monte si è applicato un filtro grossolano, sufficiente a scartare i vettori “controcorrente” e si è provveduto ad applicare anche un filtraggio laterale.

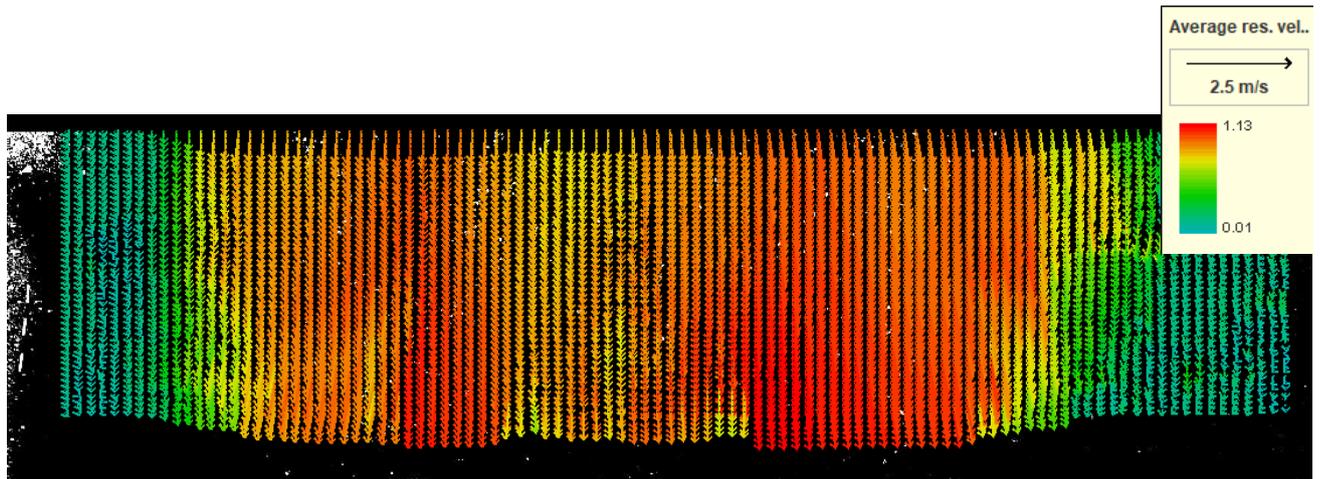
Si è osservato come il filtraggio sia sempre necessario per eliminare gli errori grossolani, i quali appaiono vistosamente nel primo campo di moto mediato tra i fotogrammi.

Nella figura (5-1) è riportato un campo di moto tipico prima della validazione: il campo di moto è diretto dall’alto verso il basso dell’immagine, i vettori rossi ed arancioni hanno direzione contraria o ortogonale al flusso e rappresentano chiaramente degli errori grossolani.

Nella figura (5-2) si può osservare lo stesso campo di moto dopo la validazione. I vettori risultano molto più omogenei e sono assenti vettori contrari al moto.



6-1 Campo di moto prima della validazione



6-2 Campo di moto dopo la validazione

Tutti i risultati presentati di seguito sono stati validati, ossia sottoposti ad un filtraggio per l'eliminazione degli errori grossolani prodotti da errate cross correlazioni.

6.3 Considerazioni sulle Pre elaborazioni

I frame del Noce sono stati forniti già ricampionati passando da 24 a 12 fps e trasformati in bianco e nero perché già estratti ed utilizzati in precedenza per delle analisi ottiche.

Il video del Bradano invece è stato reso disponibile subito dopo l'acquisizione eseguita in scala di grigi: osservando il video si è subito osservato come il vento abbia influenzato la stabilità del drone, compromettendo il suo stazionamento sulla verticale del centro della sezione; per ovviare a questo problema il video è stato sottoposto a stabilizzazione.

Una serie di analisi è stata eseguita analizzando i frame in scala di grigi. Successivamente si è poi eseguita una trasformazione in bianco e nero dei frame e su questa serie sono state elaborate ulteriori analisi. I risultati ottenuti con la serie di frame in scala di grigi e con i frame in bianco e nero sono stati confrontati per valutare se la pre-elaborazione fosse giustificata.

Confronto tra analisi di frame non stabilizzati e stabilizzati

Si sono svolte inizialmente alcune analisi con frame del caso studio Basento senza stabilizzazione. Le analisi presentavano elevati errori ed era possibile accorgersi visivamente che le sponde del fiume Basento subivano spostamenti tra i frame di svariati pixel per effetto dello spostamento del UAV dalla posizione di acquisizione scelta.

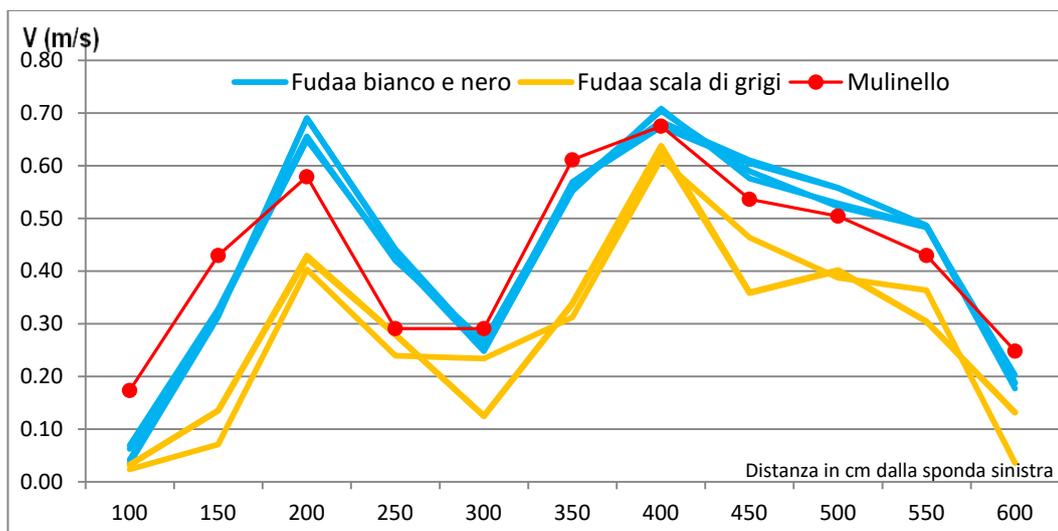
Si è subito deciso di procedere alla stabilizzazione del video e non si sono prodotti grafici dalle analisi errate poiché i campioni estratti erano privi di significato.

Confronto tra analisi di frame in scala di grigi ed in bianco e nero

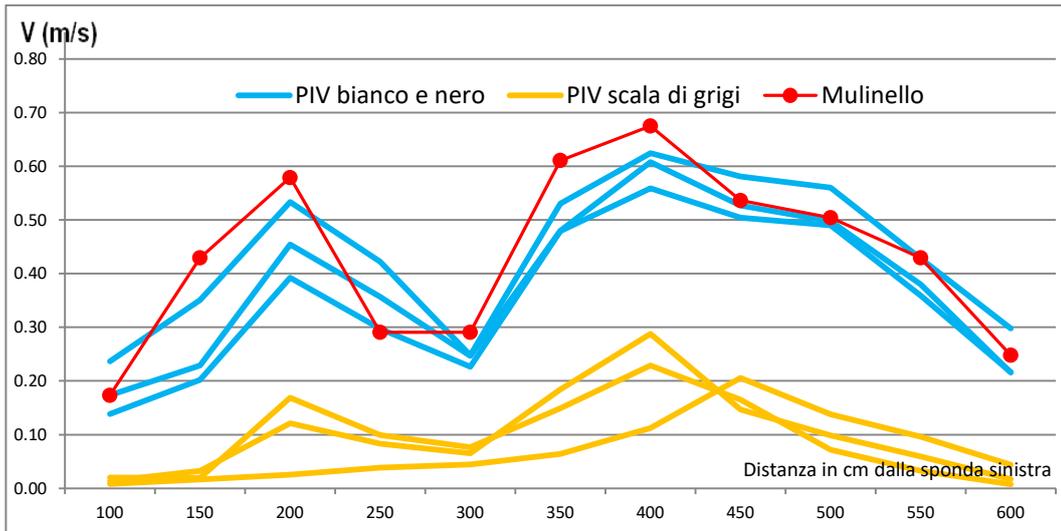
Si è proceduto ad un confronto tra le analisi ottenute, prendendo in esame due differenti serie di frame del fiume Basento: la serie dei frame in scala di grigi (estratti e stabilizzati) e quella dei frame trasformati in bianco e nero (estratti, stabilizzati e trasformati).

Si sono prodotti due coppie di grafici, una coppia per le analisi elaborate con Fudaa ed una per le analisi effettuate con PIV_lab. Per ogni valore di un campione di analisi estratto dal campo di moto di una singola analisi si è calcolato l' errore percentuale rispetto al valore di riferimento. Questo errore permette di valutare quanto i campioni siano prossimi alla misura di riferimento.

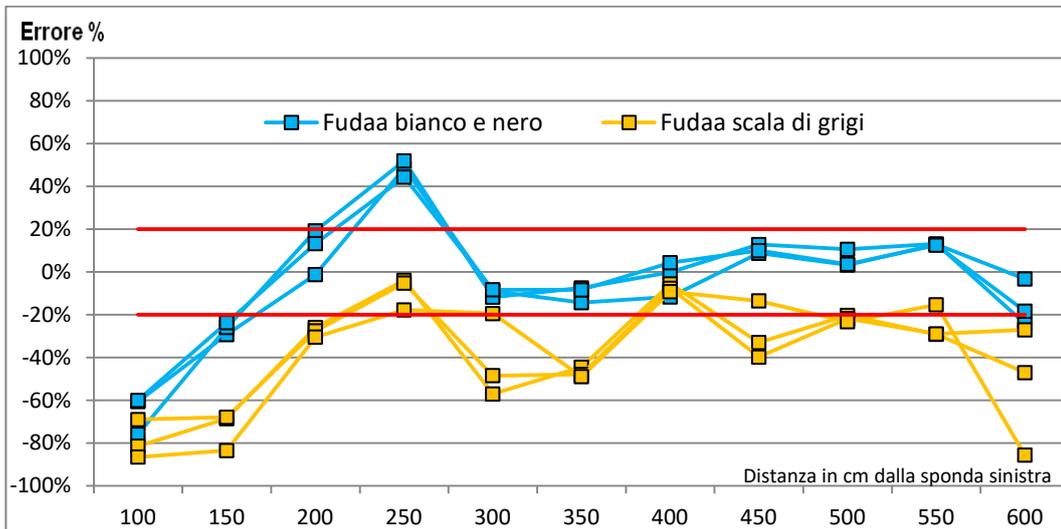
I quattro grafici sottostanti hanno sull'asse delle ascisse la posizione d'estrazione dei valori dei campione nella sezione lineare. I primi due grafici (5-3 e 5-4) mostrano in ordinata i valori delle velocità misurate, il primo con Fudaa ed il secondo con PIV_lab, delle due serie di frame. Il terzo e quarto grafico (5-5 e 5-6) riportano in gli errori percentuali dei valori dei campioni, misurati rispettivamente con Fudaa e con Piv_lab, rispetto ai valori di riferimento.



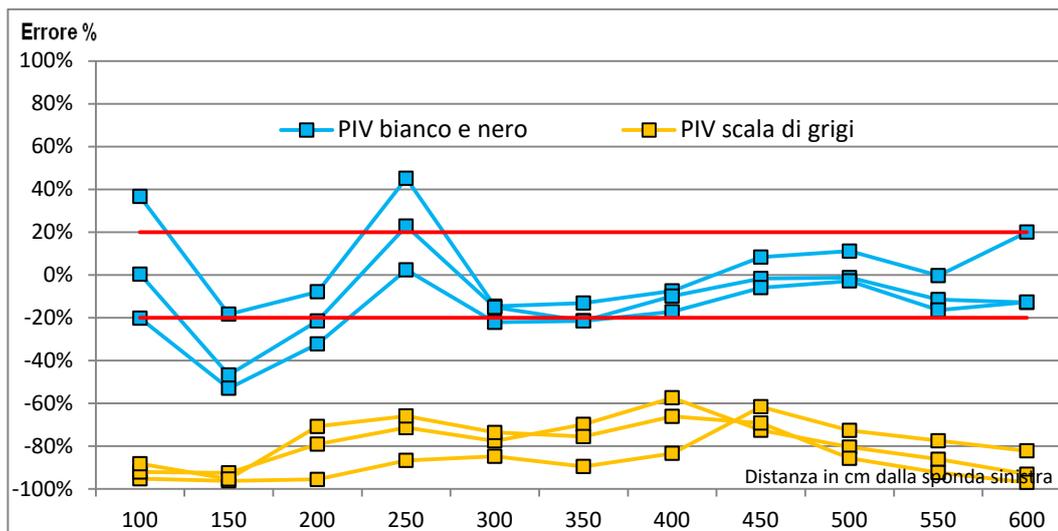
6-3 Velocità misurate con Fudaa per il Basento con frame in scala di grigi e bianco e nero



6-4 Velocità misurate con PIV lab per il Basento con frame in scala di grigi e bianco e nero



6-5 Errori ottenuti con Fudaa per il basento con frame in scala di grigio e bianco e nero



6-6 Errori ottenuti con PIV lab per il basento con frame in scala di grigio e bianco e nero

Come si può osservare dai grafici, l’elaborazione dei frame in scala di grigio ha sempre portato ad una sottostima rispetto alle analisi ottenute dai frame trasformati in bianco e nero: questo fatto probabilmente è dovuto allo scarso contrasto tra le particelle di tracciante ed il letto del corso d’acqua.

Le misure eseguite con le serie di frame in scala di grigio dal programma PIV_lab hanno prodotto errori relativi nell’intervallo compreso tra (-57%; -97%) se ne deduce che il programma non sia in grado di elaborare questi frame.

Le analisi compiute tramite Fudaa con i frame in scala di grigio hanno presentato un intervallo di errore più variabile (-89%; -4%), le velocità sono sempre sottostimate, ma in alcune posizioni il valore misurato con Fudaa ha un errore confrontabile con quello delle analisi eseguite con frame trasformati in bianco e nero. Gli errori maggiori si osservano ai bordi della sezione ed alla distanza di 250 cm, posizioni dove i programmi misurano risultati sistematicamente errati o comunque differenti dal resto del campione. Tali posizioni saranno collegate nelle analisi dei frame del Basento ad errori anche nei campioni presentati nei prossimi capitoli.

Queste osservazioni mostrano una capacità d’indagine per frame in scala di grigio con Fudaa in scala di grigio superiore a quella di PIV_lab considerazione avalorata considerando lo scarto quadratico medio (RMSE) dei campioni estratti. Gli scarti quadratici medi dei campioni misurati con PIV_lab rientrano nell’intervallo compreso tra (3.47;3.86 m/s), i valori degli RMSE dei campioni estratti dalle analisi di Fudaa rientrano nell’intervallo compreso tra

(1.62; 1.68 m/s); quest'ultimo intervallo è più prossimo (per quanto comunque non accettabile) all'intervallo di (0.71; 0.86 m/s) in cui troviamo i valori di RMSE delle analisi eseguite con Fudaa con risultati corretti.

6.4 Parametrazioni nelle analisi

I programmi considerati richiedono parametri di calcolo differenti, quindi per ciascuno si è proceduto alla scelta di una serie di parametri appropriata per valutarne l'influenza. Per ogni parametro presentato si è indagata la bontà dei campioni estratti dal campo di moto generato.

6.4.1 Confronto sulla calibrazione dei video casi studio

I due video casi studio hanno differenti parametri di calibrazione, dovuti alla differente quota di acquisizione del video ed al ricampionamento del video del Noce.

	Caratteristiche di acquisizione		Calibrazione	
	Quota di volo	frame/s	1 px = (m)	1 px/fr = (m/s)
Basento	10 m	24	0.005	0.150
Noce	15 m	24	0.009	0.216
ricampionato	15 m	12	0.009	0.108

6-1 Coefficienti di calibrazione

Come si può osservare nella tabella (5-1) i due video sono differenti. La calibrazione spaziale fa sì che una matrice di ricerca nel Basento, se mantenuta di pari dimensione in pixel, nel Noce corrisponderà ad una dimensione reale quasi doppia: si dovrà considerare questa osservazione quando si valuteranno le influenze nei dati di input in quanto, dimensionalmente, aree uguali in pixel corrisponderanno ad aree reali differenti nei due video.

Il parametro che metterà in relazione gli spostamenti tra frame e le velocità reali subirà l'influenza della differente calibrazione spaziale, ma anche della differente velocità di campionamento. A parità di spostamento in pixel tra due frame, nel Basento si osserverà una velocità reale nel Basento pari a una volta e mezza rispetto alla velocità reale nel Noce. Questa considerazione sulla misura delle velocità complicherà un po' l'analisi dei risultati, ma si cercherà di ovviare al problema tenendo presente le velocità reali nel commento dei parametri in pixel differenziandoli tra i due video.

6.4.2 Studio della parametrizzazione in PIV_lab

Per PIV_lab le informazioni che definiscono l'analisi sono la scelta dell'approccio di elaborazione (DCC o FFT), la dimensione in pixel dell'area di interrogazione (IA), il passo tra

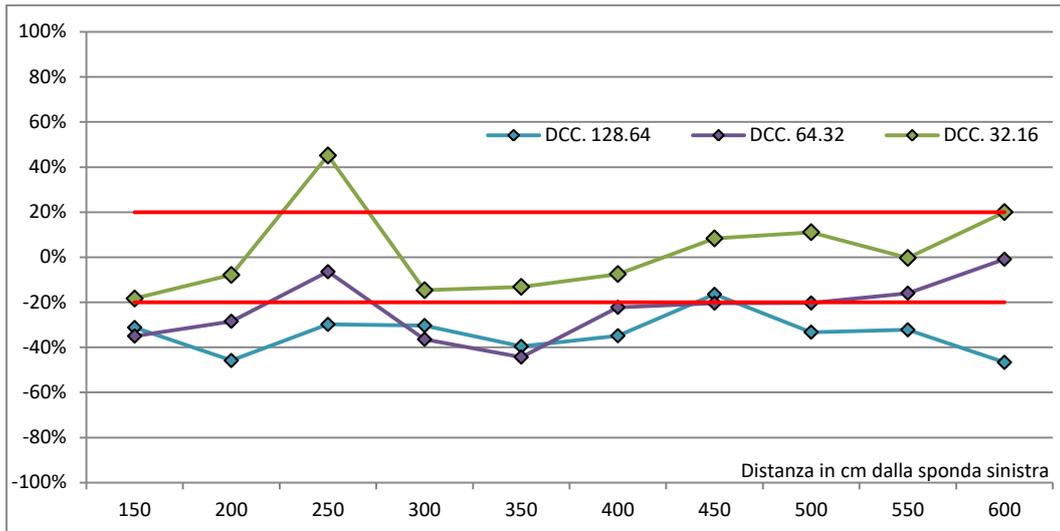
due matrici di interrogazioni successive espresso in pixel (e in percentuale di sovrapposizione) ed il numero di passi nel caso si scelga l'opzione FFT.

Facendo riferimento ad articoli di letteratura si è deciso di far elaborare al software tre possibili parametrizzazioni con la metodologia DCC e cinque con quella FFT; in tutte le analisi si è mantenuto costante il passo. Le parametrizzazioni scelte sono state:

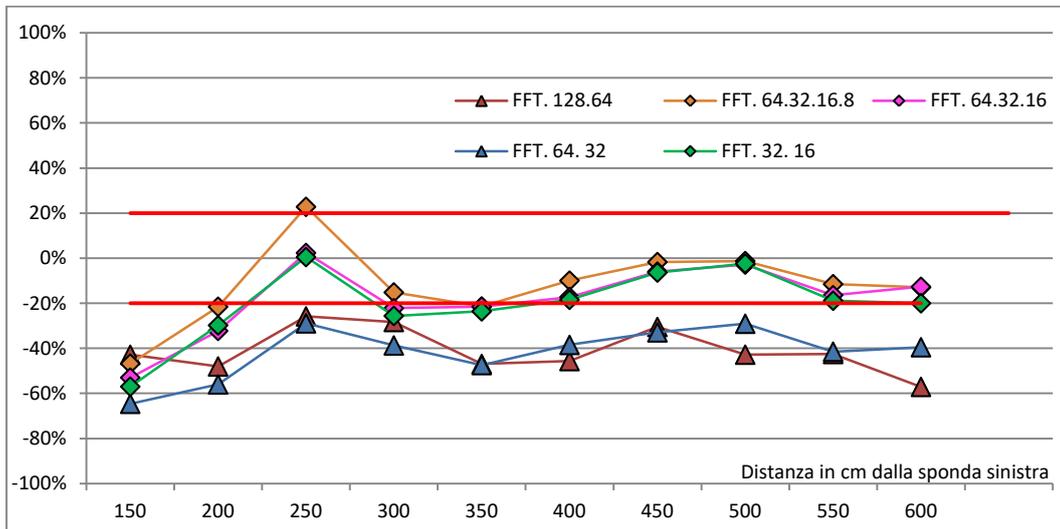
		IA	Step		1° IA	2° IA	3° IA	4° IA	Step	
1	DCC	128	50%	1	FFT	128	64		50%	
2	DCC	64	50%	2	FFT	64	32	16	8	50%
3	DCC	32	50%	3	FFT	64	32	16		50%
		pixel		4	FFT	64	32			50%
				5	FFT	32	16	pixel		50%

Queste 8 parametrizzazioni sono state utilizzate per l'analisi dei frame del Noce e dei frame del Basento sia in bianco e nero sia in scala di grigi.

Si è provveduto a mostrare a grafico gli errori percentuali relativi ai valori dei campioni estratti dalle analisi: i due grafici (5-7 5-8) riportano l'errore relativo dei valori estratti dai campi di moto delle analisi eseguite sui frame pre-elaborati del Basento. Il grafico (5-3) riporta le tre analisi eseguite con la tecnica DCC mentre il grafico (5-2) le cinque analisi compiute con la tecnica FFT.



6-7 PIV lab Basento approccio DCC



6-8 PIV lab Basento approccio FFT

Analisi	IA (px)	Step (px)	RMSE (m/s)
DCC	32	16	0.066
DCC	64	32	0.130
DCC	128	64	0.162

6-3 PIV DCC RMSE

Analisi	IA (px)	Ultimo Step (px)	RMSE (m/s)
FFT	64.32.16.8	8	0.089
FFT	64.32.16	16	0.109
FFT	32.16	16	0.115
FFT	128.64	64	0.200
FFT	64.32	32	0.204

6-2 PIV FFT RMSE

Le analisi compiute con la tecnica DCC riportate nel grafico (5-7) mostrano come due delle tre analisi (IA: 128 px, Step 64 px) e (IA: 64 px; Step 32 px) abbiano errori di sottostima. L'analisi (IA: 32 px, Step 16 px) presenta errori inferiori compresi (salvo che in una posizione) nell'intervallo (-18%; 20%) senza sistematiche sovra o sottostime. Osservando il valore di RMSE, riportato nella tabella (5-3), possiamo confermare l'impressione ottenuta dal grafico: il valore di errore minore corrisponde alla configurazione (IA: 32 px, Step 16 px).

Gli errori relativi dei valori dei campioni ottenuti tramite l'analisi con modalità FTT di PIV_lab sono mostrati nel grafico (5-8): gli errori riportati nel grafico mostrano una complessiva sottostima da parte di tutte le analisi. La maggior sottostima si osserva nelle analisi (IA: 128 px, Step 64 px) e (IA: 64 px, Step 32 px) mentre la migliore tra queste, nell'approssimare meglio le velocità di riferimento, è quella con parametrizzazione (IA: 64,32,16 px con 3° Step 8 px). Queste considerazioni sono avallate dagli RSME calcolati e riportati in tabella (5-2).

6.4.3 Studio della parametrizzazione in Fudaa

Il software Fudaa utilizza come parametri di input la definizione della Interrogation Area (IA) e della Search Area (SA). Come già detto l'IA è definita da un solo parametro mentre la SA può esprimersi con 4 parametri per variare nelle direzioni degli assi. Per semplicità d'analisi si è scelto di esprimere la SA in modo uguale nelle direzioni riassumendo quindi l'informazione in un solo parametro ripetuto nelle quattro direzioni.

Si è scelto di ricorrere a 4 valori per l'IA e 7 per la SA:

IA	SA											
(px):	(px/frame):											
<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="background-color: yellow;">100</td> <td style="background-color: lightgreen;">50</td> <td style="background-color: lightblue;">30</td> <td style="background-color: blue;">20</td> </tr> </table>	100	50	30	20	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="background-color: blue;">2</td> <td style="background-color: lightblue;">4</td> <td style="background-color: lightgreen;">6</td> <td style="background-color: green;">8</td> <td style="background-color: yellow;">10</td> <td style="background-color: yellow;">12</td> <td style="background-color: yellow;">20</td> </tr> </table>	2	4	6	8	10	12	20
100	50	30	20									
2	4	6	8	10	12	20						

La combinazione di questi valori porta a produrre per ogni serie di frame 28 differenti campioni.

Le analisi con le 28 parametrizzazioni scelte sono state applicate ai frame del Fiume Basento e del Fiume Noce opportunamente pre-elaborati. I campioni estratti dai campi di moto delle analisi sono stati valutati tramite lo scarto quadratico medio e l'errore percentuale. I grafici delle analisi sono stati riportati negli allegati.

Si è proceduto allo studio e confronto degli indici di errore e dei grafici, da cui è stato possibile trarre delle considerazioni.

Scelta di rappresentazione grafica

Una volta generate le analisi è nata la necessità di rappresentare al meglio le velocità e gli errori per poter riconoscere comportamenti e tendenze.

Inizialmente si sono create di seguito quattro tipologie di grafici differenziate in funzione delle scelte degli assi:

	1° Grafico	2° Grafico	3° Grafico	4° Grafico
Ascisse	Velocità	Errore %	Errore %	Errore %
Ordinata	Posizione della misura	Posizione della misura	Parametri di IA	Parametri di SA

Per ogni scelta erano creati due grafici distinti: uno per il Basento ed uno per il Noce. I grafici così generati sono presenti nella sezione (A.4).

Si sono subito scartati i grafici che riportavano le velocità misurate in quanto non riuscivano ad essere rappresentativi della bontà dei risultati. Si è quindi riportato a grafico l'errore percentuale, mantenendo in ascisse le posizioni corrispondenti alla misura lungo la sezione era possibile raffrontare le analisi ma senza caratterizzare appieno l'influenza dei due parametri d'analisi (la IA e la SA). Si è passato quindi a creare due nuove serie di grafici riportanti l'errore percentuale in ordinata ed in ascissa la variazione di uno dei due parametri mentre l'altro era mantenuto costante. In questo modo era possibile per un certo valore di SA osservare come l'errore variava al crescere in ascissa della IA (e viceversa). Il confronto però restava difficoltoso per un gran numero di campioni. Si è deciso quindi di passare all'ultima tipologia di grafico illustrata nel capitolo seguente.

I grafici principali delle quattro prime tipologie generati durante lo studio sono stati inseriti negli allegati. Alcuni grafici delle tre tipologie sono stati utilizzati nei capitoli seguenti per particolari commenti.

Rappresentazione grafica finale dei risultati

I grafici riportanti di seguito sono una parte di quelli prodotti e sono stati scelti per poter meglio eseguire dei confronti. Nei grafici è rappresentato in ordinata l'errore percentuale rispetto alle misure di confronto mentre in ascissa è riportato il valore di IA.

Ogni “linea spezzata” nei grafici è riferita all’errore percentuale in una certa posizione di una elaborazione caratterizzata da un certo valore di S al variare di IA. Le linee con medesimo valore di SA sono rappresentate con lo stesso colore.

Per confrontare i due differenti casi studio i valori di SA sono stati normalizzati rispetto allo spostamento di riferimento tra due frame successivi (Dx) nel rispettivo caso studio.

	Dx max (px)	SA (px/frame):	2	4	6	8	10	12	20
Basento	5.6	SA/Dx (/):	0.36	0.71	1.07	1.42	1.78	2.13	3.56
Noce	4.5		0.45	0.89	1.34	1.79	2.24	2.68	4.47

6-4 Normalizzazione della SA

In questo modo è stato possibile confrontare i campioni provenienti dai due casi studio in funzione di tre intervalli.

$$\begin{array}{ccc}
 \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{C} \\
 \frac{Sa}{Dx} < 1; & 1 < \frac{Sa}{Dx} < 3; & 3 < \frac{Sa}{Dx}
 \end{array}$$

Intervallo A

I due grafici (5-9 e 5-10) mostrano gli errori percentuali nei due casi studio di campioni eseguiti con un impostazione del parametro di SA inferiore allo spostamento in pixel delle particelle di tracciante tra due frame successivi corrispondente alle velocità osservabile nelle misure di riferimento (Dx).

Si osserva nei grafici come l’errore sia elevato risultati dell’analisi non sono soddisfacenti, per quanto l’errore percentuale tenda a diminuire all’aumentare della IA nel complesso.

Intervallo B

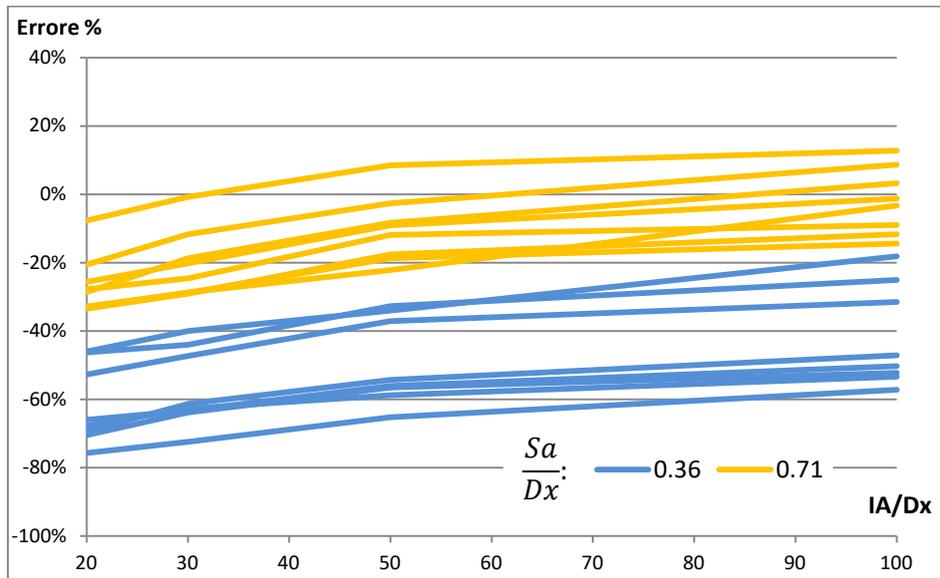
I grafici (5-11 e 5-12) riportano gli errori percentuali per campioni elaborati con valori di Sa tra una e tre volte la dimensione in pixel dello spostamento delle particelle tra due frame successivi considerando le velocità di riferimento.

Nei grafici gli errori tendono a ridursi all’aumentare di IA. Al crescere della IA nel Basento la sottostima diminuisce mentre nel Noce diminuisce sensibilmente l’intervallo di errore da (+10%;-60%) a (+0;+35%).

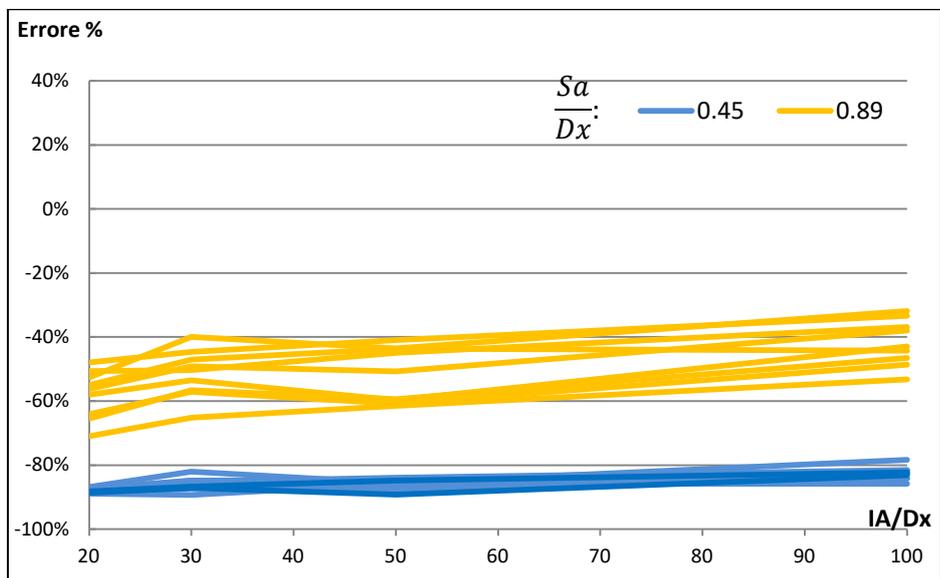
Intervallo C

Nei grafici (5-13 e 5-14) sono portati a grafico gli errori percentuali dei campioni con impostazione della Sa tripla rispetto allo spostamento in pixel compiuto dalle particelle tra due frame riferendosi alle velocità di riferimento.

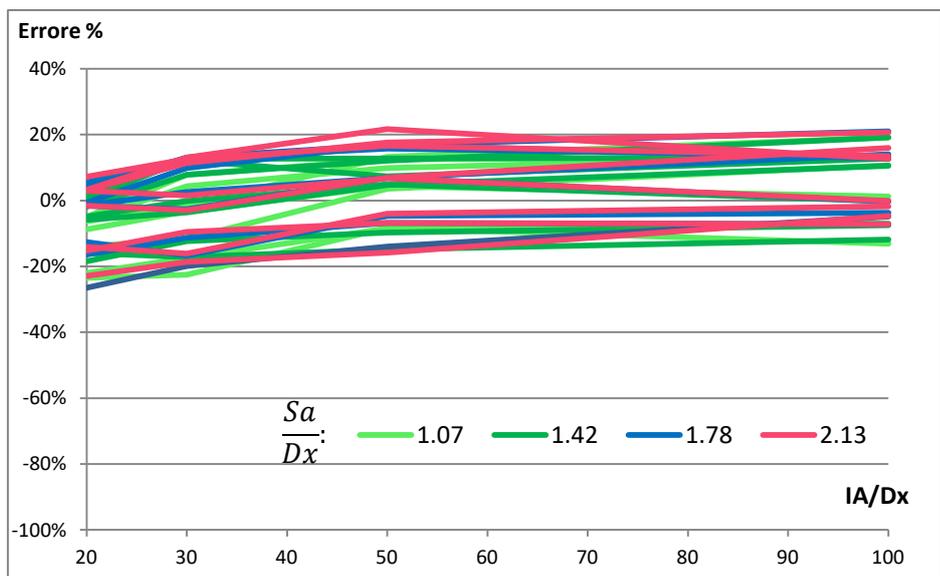
L'errore percentuale resta nel complesso stazionario. Nel caso del Noce in alcune posizioni l'errore aumenta la sua variabilità al crescere di IA



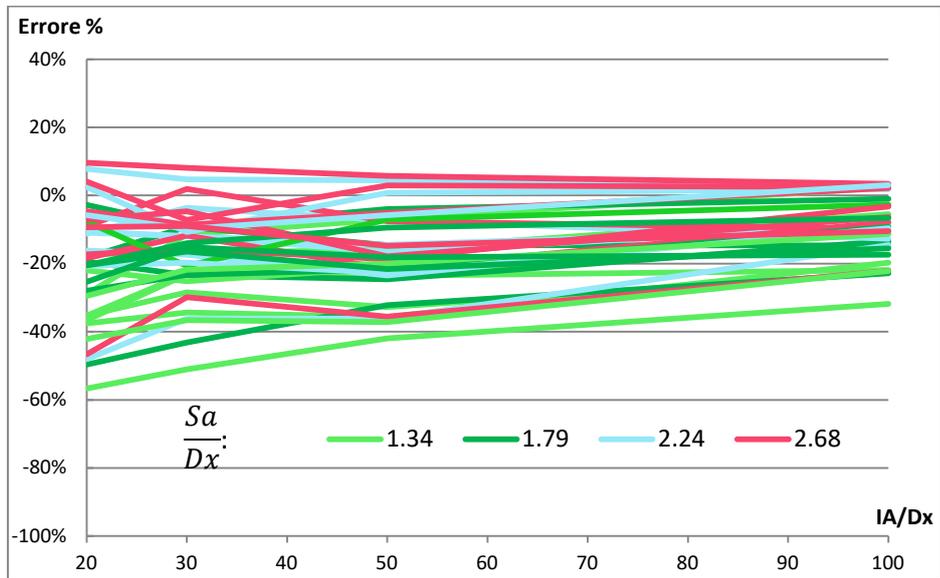
6-9 Basento: errore %, IA ; SA<Dx



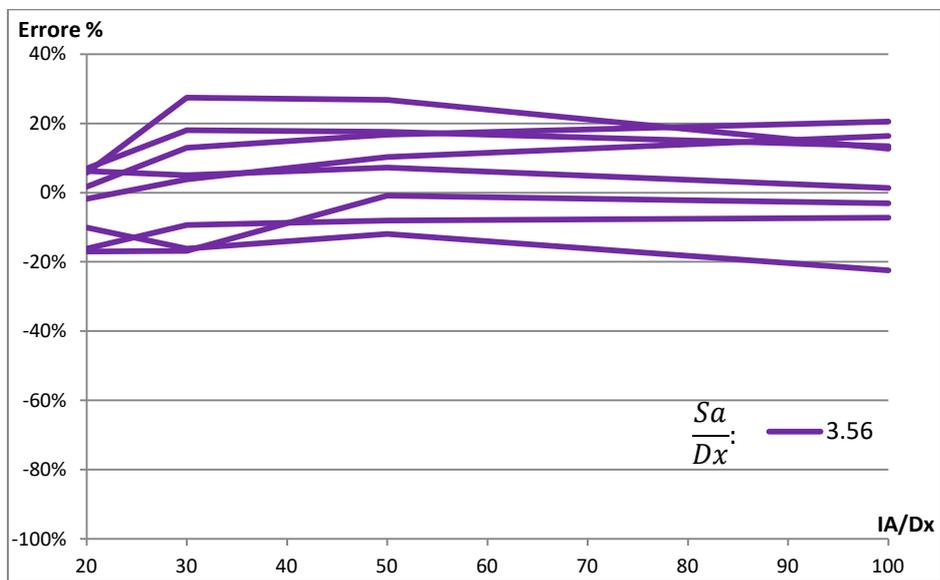
6-10 Noce: errore %, IA ; SA<Dx



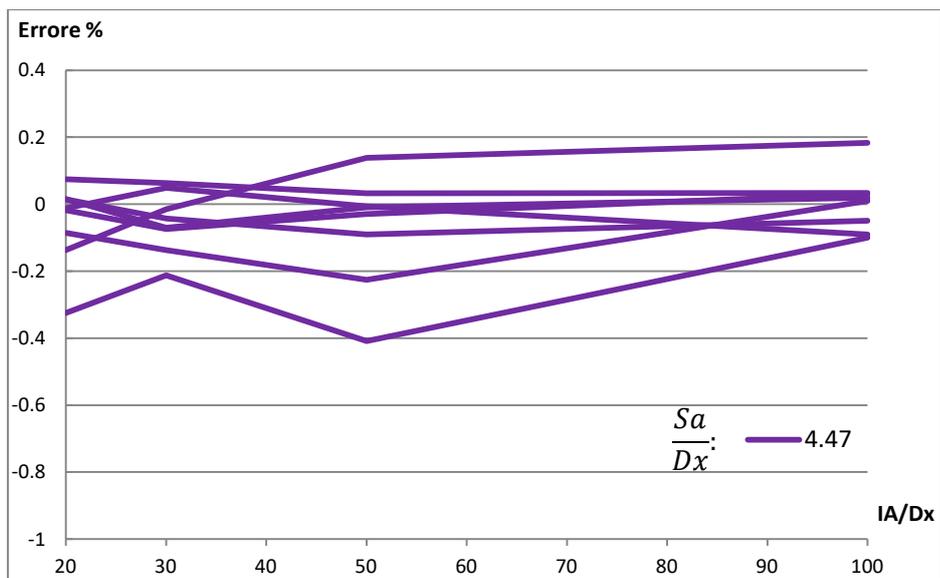
6-11 5 7 Basento: errore %, IA ; Dx<SA<3Dx



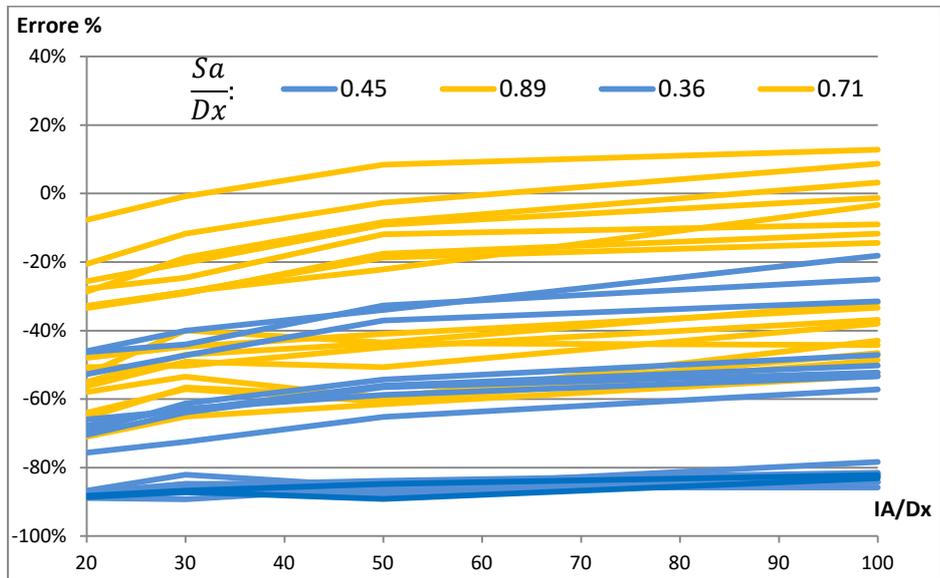
6-12 Noce: errore %, IA ; $Dx < SA < 3Dx$



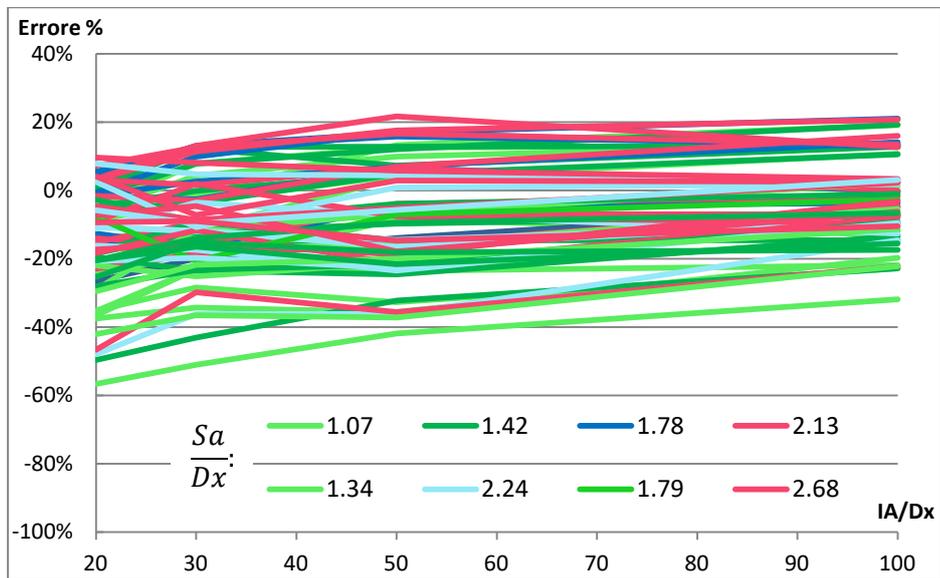
6-13 Basento: errore %, IA ; $3Dx < SA$



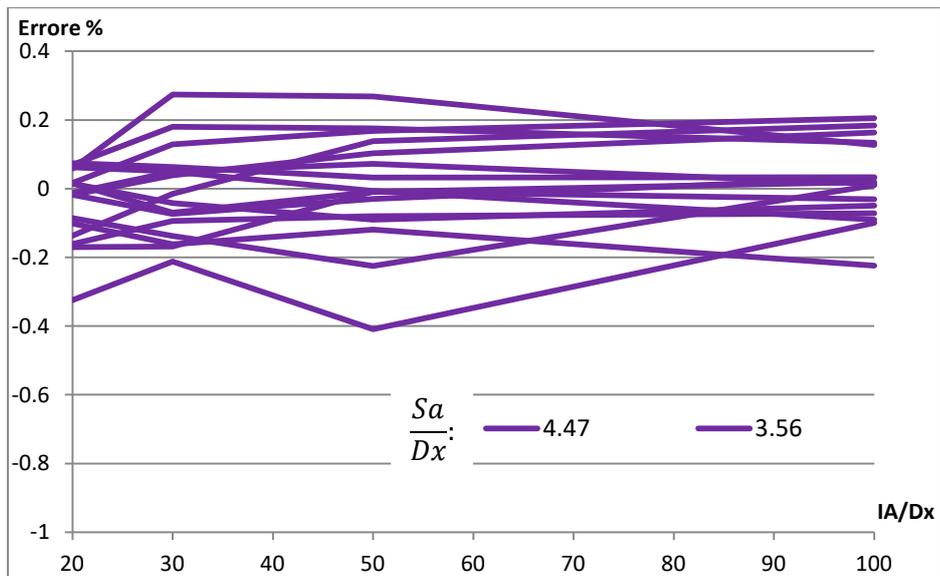
6-14 Noce: errore %, IA ; $3Dx < SA$



6-15 Casi studio: errore %, IA ; SA<Dx



6-16 Casi studio: errore % variando IA con Dx<SA<3Dx



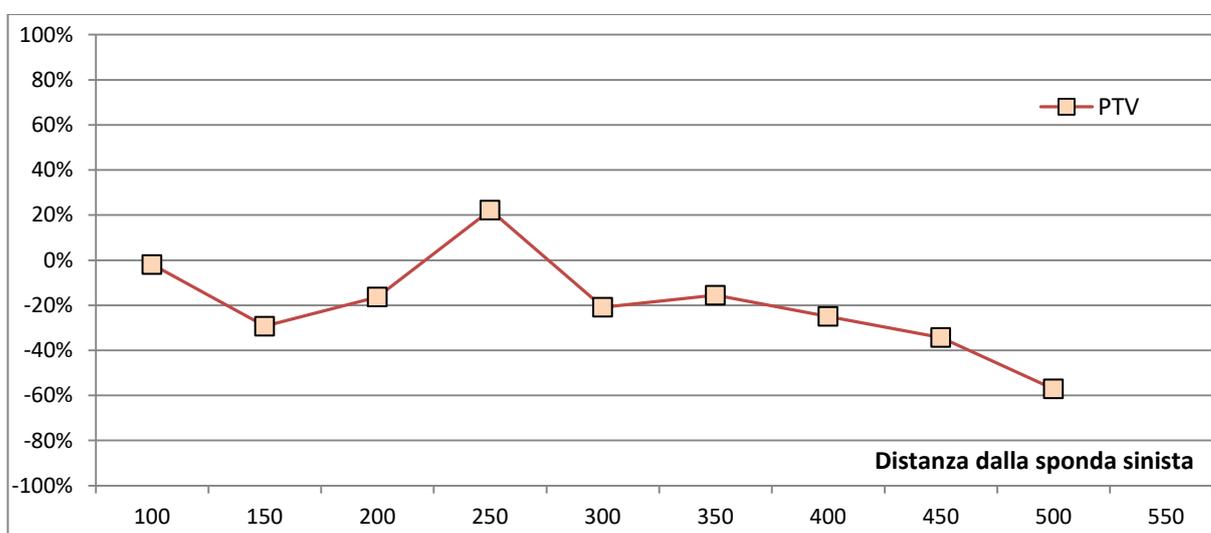
6-17 Casi studio errore %, IA ; 3Dx<SA

6.4.1 Analisi con PTV_lab

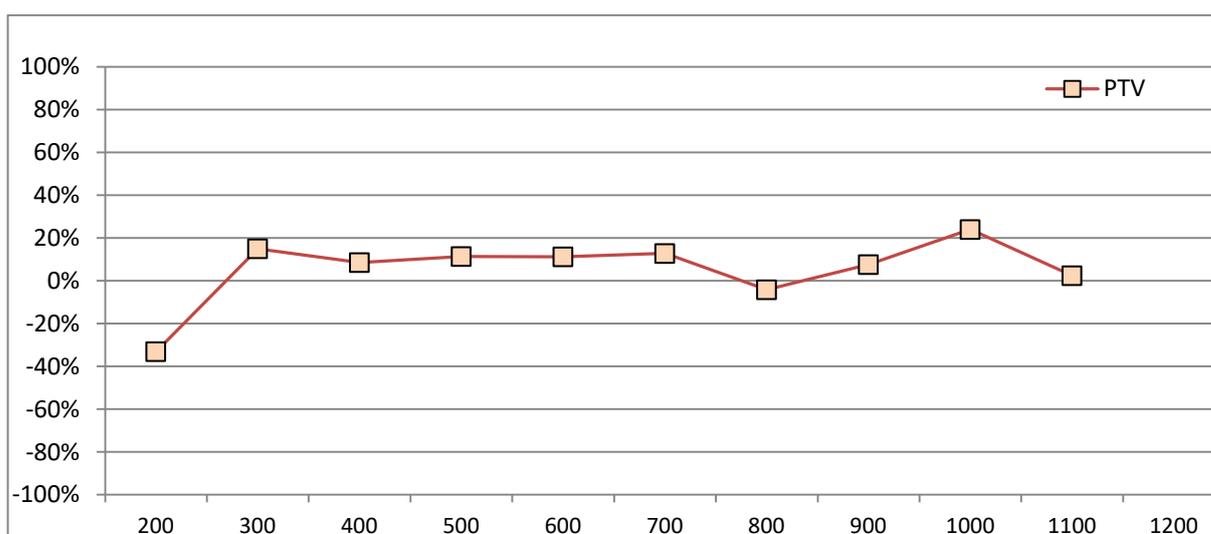
Le analisi attraverso la tecnica PTV sono state realizzate dal gruppo di ricerca di Potenza ricorrendo a PTV_lab (come già segnalato nei precedenti capitoli).

Le analisi sono state eseguite con le seguenti parametrizzazioni:

	Sigma	Intensity	Interrogation Area
Basento			
Noce	4px	70	25



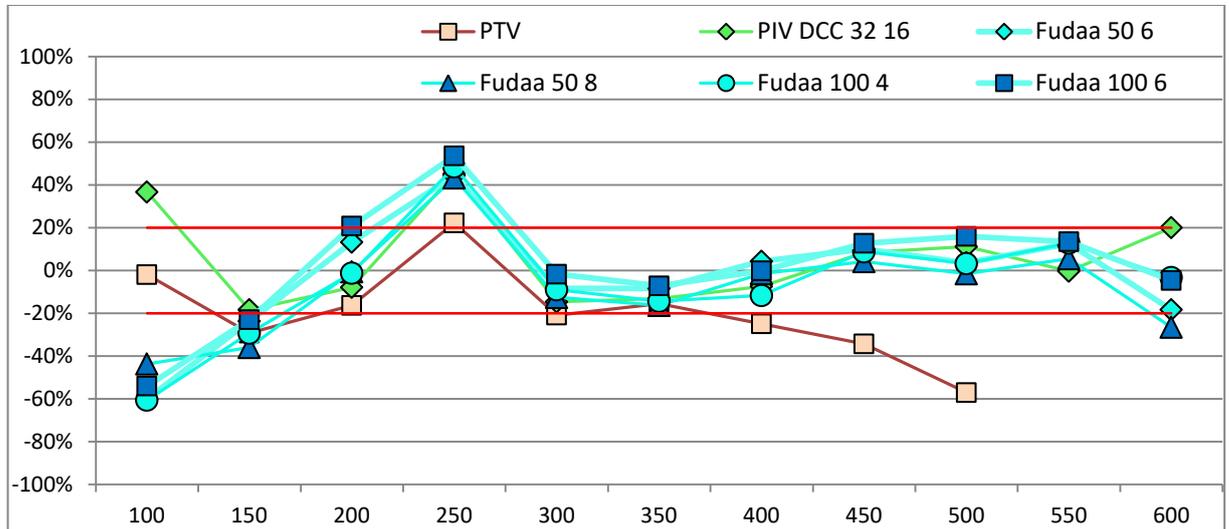
6-18 Basento: Errore Percentuale PTV



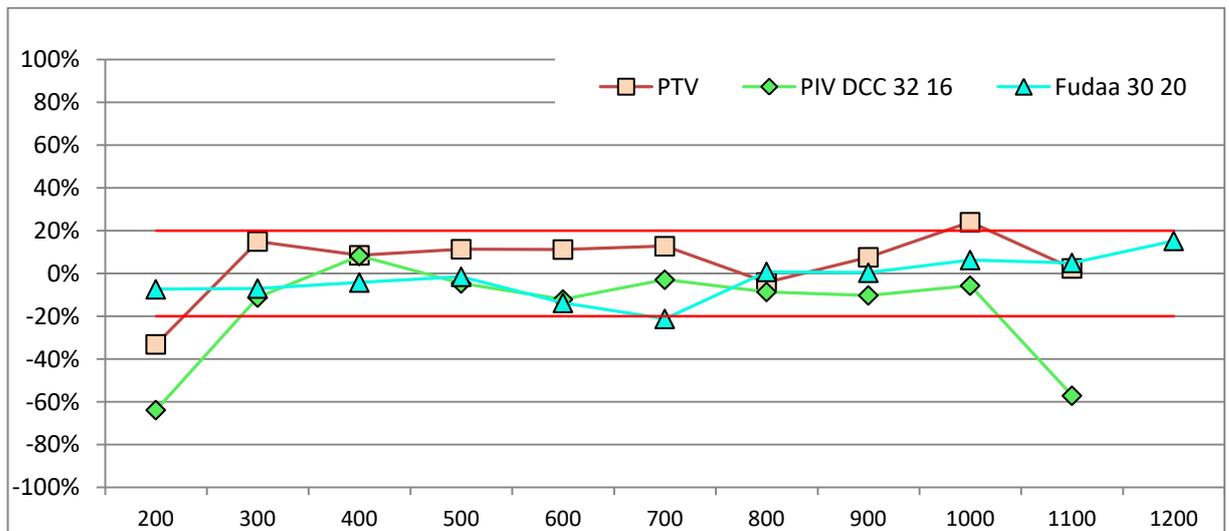
6-19 Noce: Errore Percentuale PTV

6.4.2 Confronto tra le analisi

Nei grafici sottostanti sono stati rappresentati gli errori percentuali nei due casi studio delle migliori analisi ottenute tramite i programmi



6-20 Basento: errori percentuali delle analisi



6-21Noce: errori percentuali delle analisi

6.5 Risultati delle analisi delle Portate

Le portate sono state misurate attraverso un'opzione di Fudaa. Il programma richiede di fornire la geometria sommersa in (almeno) un transetto della. Il programma esegue una stima delle portate molto generale senza considerare le caratteristiche idrauliche che caratterizzano la sezione.

Pur con queste approssimazioni si è desiderato provare la capacità di analisi del programma per avere un'idea di massima delle potenzialità del metodo.

Non sono state calcolate le portate attraverso le misure eseguite con i programmi PIV_lab e PTV_lab ma sarebbe stato possibile attraverso l'applicativo chiamato RiVer [22] che non è stato oggetto di studio in questa tesi.

Nelle tabelle (5-6) sono mostrati i valori delle portate calcolate ed il relativo errore percentuale rispetto al valore di riferimento. Ogni misura di portata è accompagnata dalla parametrizzazione (Interrogation Area e Search Area) che l'ha generata.

Il valore di riferimento per la portata del Basento è pari a $0.607 \text{ m}^3/\text{s}$ mentre la portata del Noce è pari a $1.678 \text{ m}^3/\text{s}$. questi valori sono stati ottenuti i risultati derivati dall'applicazione del metodo della sezione media e dal metodo della sezione centrata. I due metodi hanno utilizzato le velocità di corrente, misurate in campo a differenti altezze della sezione, e le informazioni sulla geometria della sezione acquisite durante l'uscita in sito.

Le informazioni geometriche utilizzate per il calcolo della portata di riferimento con i metodi "tradizionali" sono le stesse fornite al programma Fudaa quindi l'errore percentuale espresso nelle tabelle considererà il solo errore delle misure idrauliche.

In generale si osserva che le analisi che le analisi con elevato valore di RMSE presentano errori percentuali elevati nel calcolo della portata mentre gli errori percentuali minori si osservano nelle analisi che mostrano RMSE ridotti. Non si osserva una correlazione esatta tra i valori di RMSE e gli errori percentuali delle portate. Però si può notare come in corrispondenza delle analisi con RMSE minore di 0.1 m/s l'errore percentuale delle portate è inferiore al 15%. Ciononostante si sottolinea come non si possa dire il contrario: per RMSE superiori a 0.1 m/s non corrispondono sempre errori percentuali delle portate superiori al 15%.

Portata di riferimento: 0.607 m ³ /s					Portata di riferimento: 1.678 m ³ /s				
IA px	SA px	RMSE m/s	Portata m ³ /s	Errore %	IA px	SA px	RMSE m/s	Portata m ³ /s	Errore %
100	2	0.226	0.353	-41.5%	100	2	0.377	0.344	-79.5%
100	4	0.078	0.61	1.1%	100	4	0.191	1.040	-38.0%
100	6	0.088	0.653	8.3%	100	6	0.084	1.616	-3.7%
100	8	0.087	0.634	5.1%	100	8	0.061	1.652	-1.6%
100	10	0.082	0.658	9.1%	100	10	0.049	1.666	-0.7%
100	12	0.082	0.657	8.9%	100	12	0.054	1.666	-0.7%
100	20	0.087	0.641	6.3%	100	20	0.088	1.706	1.7%
50	2	0.254	0.353	-41.5%	50	2	0.392	0.300	-82.1%
50	4	0.083	0.54	-10.5%	50	4	0.239	0.955	-43.1%
50	6	0.071	0.604	0.1%	50	6	0.135	1.500	-10.6%
50	8	0.076	0.597	-1.0%	50	8	0.090	1.608	-4.2%
50	10	0.079	0.643	6.6%	50	10	0.082	1.608	-4.2%
50	12	0.082	0.647	7.3%	50	12	0.082	1.702	1.4%
50	20	0.087	0.65	7.8%	50	20	0.088	1.809	7.8%
30	2	0.287	0.256	-57.6%	30	2	0.392	0.272	-83.8%
30	4	0.125	0.496	-17.8%	30	4	0.237	0.861	-48.7%
30	6	0.086	0.56	-7.2%	30	6	0.136	1.414	-15.7%
30	8	0.080	0.581	-3.7%	30	8	0.096	1.605	-4.4%
30	10	0.080	0.592	-1.9%	30	10	0.072	1.707	1.7%
30	12	0.079	0.601	-0.4%	30	12	0.057	1.729	3.0%
30	20	0.091	0.605	0.3%	30	20	0.043	1.867	11.3%
20	2	0.305	0.217	-64.0%	20	2	0.404	0.237	-85.9%
20	4	0.135	0.439	-27.2%	20	4	0.268	0.789	-53.0%
20	6	0.087	0.516	-14.5%	20	6	0.166	1.296	-22.8%
20	8	0.079	0.568	-5.8%	20	8	0.112	1.296	-22.8%
20	10	0.075	0.582	-3.5%	20	10	0.087	1.626	-3.1%
20	12	0.075	0.59	-2.2%	20	12	0.082	1.652	-1.6%
20	20	0.077	0.598	-0.9%	20	20	0.060	1.788	6.5%

6-6Basento: portate calcolate con Fudaa

6-6 Noce: portate calcolate con Fudaa

7 Discussione

In questo capitolo si commenteranno i risultati ottenuti cercando di trarre delle considerazioni sulle operazioni necessarie per ottenere misure di velocità superficiali di un corso d'acqua ricorrendo a tecniche ottiche.

Si discuteranno per prime le considerazioni sull'uso di UAV per acquisizione dei video e sulle operazioni e accortezze necessarie per una buona acquisizione del video in campo; seguirà una trattazione sulle tecniche di pre-elaborazione indicando in quali condizioni siano opportune. Successivamente si discuterà riguardo ai programmi utilizzati e sulle differenti capacità di analisi. Il capitolo si concluderà con delle riflessioni sui futuri sviluppi delle tecniche ottiche per le misure idrauliche e su studi che potrebbero essere intrapresi per approfondire l'argomento.

7.1 Acquisizione dei video in campo

Per l'esecuzione delle tecniche ottiche trattate si è reso necessario acquisire video dei corsi d'acqua che permettessero ai programmi di riconoscere facilmente le particelle di traccianti; affinché questo sia possibile è necessario limitare la distorsione delle immagini e massimizzare il contrasto del tracciante rispetto al letto del fiume.

UAV

L'uso di un UAV per l'acquisizione dei video casi studio ha permesso di verificare che questo strumento consente di acquisire video in sicurezza, disponendo di un punto di vista privilegiato esattamente sulla verticale della sezione e molto rapidamente.

Un limite dello strumento osservato durante la missione in campo è consistito nel limite al tempo di volo derivato al numero di batterie a disposizione. Durante un'uscita in sito è bene premunirsi di un numero di batterie sufficiente a garantire l'esecuzione di più video così da poter eseguire più acquisizioni successive durante la stessa uscita nella stessa sezione.

Fotocamera

La fotocamera è stata utilizzata con asse dell'obiettivo perpendicolare al corso d'acqua e si è applicata solo una calibrazione lineare senza ortorettifica.

I dati ottenuti dalle analisi hanno mostrato come queste scelte abbiano permesso misure di velocità superficiale accettabili riducendo il tempo di pre elaborazione e le azioni di posa e misura dei marker che una ortorettifica avrebbe richiesto.

Per sezioni di elevate dimensioni, superiori a quelle dei casi studio, la scelta di evitare l'ortorettifica non è verificata.

Tracciante

Il tracciante utilizzato consiste in trucioli di legno di scarto dalle lavorazioni di falegnameria. I trucioli hanno una bassa densità che ne garantisce il galleggiamento ed una scarsa inerzia ed una dimensione abbastanza omogenea da permetterne il riconoscimento da parte delle tecniche PTV. Per sicurezza, prima dello spandimento, si è controllato se vi fossero elementi di dimensioni anomale che quando riconosciuti sono stati scartati.

Durante lo spandimento si è cercato di mantenere una distribuzione omogenea nella sezione. Purtroppo, malgrado le attenzioni degli operatori, in alcune zone della sezione il tracciante non è transitato con densità sufficienti a consentire la misura. L'assenza di tracciante in alcune zone è stata causata da fenomeni turbolenti che hanno portato ad aggregazioni di particelle in altre aree.

Il problema può essere risolto aumentando la durata del video così da acquisire un maggior numero di moti turbolenti che, data la loro natura variabile nel tempo, porteranno a dispersioni ed aggregazioni del tracciante differenti nello spazio consentendo il transito delle particelle in più zone della sezione rispetto a quante se ne osservano con video con durata inferiore.

Considerazioni operative

Durante l'uscita è buona regola verificare quando si è ancora nei pressi della sezione la bontà di un video dopo averlo acquisito e prevedere per ogni video pianificato due o tre video aggiuntivi, in funzione delle difficoltà prevedibili nell'esecuzione. Questi buoni accorgimenti di buon senso consentono di poter ripetere il video nel caso in cui durante la visione di controllo dopo l'acquisizione si osservino delle anomalie nell'esecuzione. Le più comuni anomalie osservate sono riportate in un breve elenco sottostante (da non ritenersi completo di tutte le possibili situazioni):

- ~ errato posizionamento del drone sulla verticale;

- ~ errato orientamento del drone rispetto al corso d'acqua;
- ~ errata inclinazione della fotocamera;
- ~ malfunzionamento della fotocamera;
- ~ insoddisfacente dispersione del tracciante;
- ~ variazione dell'illuminazione durante il video;
- ~ riflessi nella zona d'interesse.

7.2 Pre elaborazioni

Alcune pre-elaborazioni sono state utilizzate sui video casi studio. Per ciascuna pre-elaborazione considerata si è presentato un commento.

Stabilizzazione

La stabilizzazione si è dimostrata fondamentale per le analisi dei frame del Basento dove le raffiche di vento deboli ma discontinue hanno modificato spesso la posizione dell'UAV durante l'acquisizione; la posizione di acquisizione era così diversa tra i frame da portare le sponde a variare la loro posizione di svariati pixel tra frame successivi.

L'esecuzione di misurazioni senza stabilizzazione è possibile in situazioni di acquisizione come quella del caso studio Noce dove il drone aveva una buona stabilità.

Le operazioni di stabilizzazioni sono consigliabili se non obbligatorie prima di elaborare i frame di video acquisiti ricorrendo a UAV.

Trasformazione in bianco e nero

Nel capitolo dedicato ai risultati sono mostrati e descritti i grafici riportanti il confronto tra l'errore delle misure prodotte da frame in scala di grigio rispetto a quello delle misure generate da frame in bianco e nero.

Si deduce dalle considerazioni degli errori che nessuno dei due programmi consente la corretta misura delle velocità superficiali, attraverso l'elaborazione di frame in scala di grigi estratti dai video considerati ed eseguiti in condizioni di luce naturale non controllata e di letto del fiume naturale (non omogeneo). Il programma Fudaa però lascia supporre che in condizioni più omogenee di illuminazione e letto del corso d'acqua potrebbe fornire risultati accettabili.

Le considerazioni riguardo agli errori relativi campioni misurati attraverso Fudaa dai frame non trasformati trovano conferma nell'uso di questo programma in letteratura per l'elaborazione di immagini in scala di grigio estratte da video eseguiti in laboratorio [14] [23]. Tali articoli applicano i programmi per l'analisi di video compiuti in condizioni di letto omogeneo dal punto di vista cromatico e illuminazione controllata, tramite lampade alogene e tende per evitare illuminazioni esterne. Condizioni così controllate ed uniformi non sono facilmente riscontrabili nei letti naturali dei corsi d'acqua e allo stesso modo tali illuminazioni non sono replicabili nelle acquisizioni di video in sito, dove la luce naturale genera spesso riverberi e ombre.

Ricampionamento

Il ricampionamento è stato eseguito seguendo le indicazioni di letteratura [12] ed applicato al caso studio Noce.

Non si è considerate un controllo sulla bontà della pre-elaborazione esistendo già un commento in letteratura.

7.3 Considerazioni sui programmi di analisi

I campioni estratti dalle analisi eseguite attraverso il programma PIV_lab hanno mostrato come tra le configurazioni adottate la migliore risulta essere quella consigliata dal gruppo di ricerca di Potenza ossia la parametrizzazione (IA 32; step 16). Questa configurazione ha una IA tale da comprendere correttamente al suo interno le forme del tracciante ed il passo consente di generare una maglia tale da consentire delle buone cross correlazioni.

I risultati di Fudaa riportati nei grafici permettono di avanzare delle considerazioni sulle migliori parametrizzazioni adottabili per le misure.

Il valore della SA deve essere almeno superiore allo spostamento delle forme di tracciante atteso: un valore inferiore non consente al programma di eseguire correttamente le cross correlazioni perché la IA durante la ricerca nel secondo fotogramma non raggiungerà le posizioni occupate dalle le forme che avranno compiuto uno spostamento superiore alla SA impostata. Valori di SA superiori a tre volte lo spostamento atteso non porteranno sostanziali benefici ma provocheranno un aumento dell'onere computazionale. Osservando i grafici mostrati nei risultati si osserva come una SA nell'intervallo compreso tra una e tre volte il valore dello spostamento atteso forniscano buoni risultati.

Nell'intervallo di SA tra una e tre volte lo spostamento atteso si è potuto notare che per valori pari cinque volte la dimensione delle particelle le misure soffrono di un sottostima mentre il risultato si stabilizza per IA con valori pari o superiori a cinque volte la dimensione delle particelle del tracciante: valori di IA capaci di comprendere al loro interno le strutture generate dal tracciante consente di ottenere dei risultati adeguati.

Le analisi fornite dal gruppo di ricerca di Potenza elaborate attraverso PTV_lab hanno un errore generalmente comparabile a quello delle analisi eseguite attraverso gli altri software.

Confronto tra i programmi

Comparando tra loro le migliori analisi da ciascun programma si può notare come abbiano eseguito le misure in modo generalmente coerente. I programmi hanno misurato le velocità superficiali con errori superiori vicino alle sponde e la dove il tracciante era scarsamente presente. In ciascun caso studio sono state osservate delle differenze.

Nel Basento gli errori sono molto simili tra i programmi ma PTV lab ha fornito errori superiori nella parte destra della sezione. Questi errori probabilmente sono dovuti al tracciante che in quell'area nel video caso studio mostrava una forte aggregazione in strutture. Probabilmente il programma non è riuscito a distinguere correttamente le singole particelle in quando in quella zona si mostravano troppo fitte.

Nel Noce la tecnica PTV ha portato a delle sovrastime delle velocità mentre le tecniche PIV hanno avuto la tendenza inversa pur mantenendo un errore raffrontabile.

Nei risultati ottenuti da PIV_lab: in buona parte della sezione l'errore è simile a quello degli altri programmi ma nelle ultime due posizioni nella parte destra, vicino alle sponde il programma perde bruscamente in qualità. Probabilmente il programma ha avuto difficoltà a riconoscere le forme delle particelle di tracciante in quella zona perché le strutture sono molto disperse a causa di un allargamento della sponda. Fudaa è riuscito a limitare l'errore nelle parametrizzazioni aventi una IA molto elevata. L'errore è riconducibile alla presenza delle sponda e rientra nella tipologia di errore già riscontrata.

7.4 Portate

I valori di portata calcolati dal programma Fudaa hanno utilizzato le medesime informazione geometriche a cui si è fatto ricorso per ricavare le portate di riferimento quindi gli errori percentuali ricavati si riferiscono alle sole misure idrauliche. Gli errori delle portate

calcolate partendo dalle analisi con RMSE ridotti sono stati per lo più al di sotto del 10%. Le portate ottenute hanno superato le aspettative in quanto ricavate senza una legge di sito. In base ai risultati ottenuti è possibile supporre una buona accuratezza nel calcolo di portate attraverso l'uso di velocità superficiali acquisite con tecniche ottiche di analisi e di una calibrazione di sito del coefficiente di correlazione tra la velocità superficiale e la velocità media sulla verticale.

8 Conclusioni

In questa tesi si è quindi confermato che le tecniche ottiche di analisi video consentono l'acquisizione di misure idrauliche in modo economico, rapido ed sicuro.

La pre-elaborazione di trasformazione dei frame tramite la modifica dell'istogramma ha portato, da una rappresentazione in scala di grigi, ad una in bianco e nero: essa si è rivelata fondamentale per l'analisi dei video eseguiti in campo. La stabilizzazione è stata obbligatoria nel caso studio Basento a causa delle condizioni di vento, mentre nel Noce si sono potuti ottenere dei risultati anche senza ricorrervi.

Come precedentemente esposto sono state studiate le parametrizzazioni dei programmi PIV_lab e Fudaa. Le analisi migliori sono risultate essere quelle aventi:

- ~ la matrice di confronto tra i frame di dimensione raffrontabile alle strutture formate dal tracciante;
- ~ lo spostamento di ricerca nel frame successivo almeno doppio rispetto allo spostamento medio del tracciante.

Le misure di velocità ottenute attraverso i programmi hanno mostrato un errore significativo vicino alle sponde ed in alcuni punti dove il tracciante non è transitato (con errori anche dell'89%). Tuttavia nella maggior parte dei punti della sezione l'approssimazione del dato è stata accettabile. Questo comportamento era atteso noti gli esempi in letteratura.

Il calcolo delle portate ottenuto attraverso le velocità superficiali, misurate con le tecniche ottiche, ha fornito quindi risultati incoraggianti. Questo lascia intendere che studi mirati alla definizione della correlazione tra le velocità superficiali e le portate transitanti, porteranno allo sviluppo di un importante metodo d'indagine, utile soprattutto nei corsi d'acqua non strumentati.

Una considerazione particolare deve essere fatta sull'impiego di UAV: senza questo strumento le tecniche perderebbero molte delle loro ottime caratteristiche. Gli UAV permettono di eseguire misure con ottime risoluzioni spaziali e temporali, garantendo la sicurezza degli operatori durante le attività.

Gli UAV sono un campo in continua espansione e il loro sviluppo, unito alla sperimentazione di nuovi sensori e metodologie di analisi, lascia presagire una sempre maggior applicabilità in campo ambientale. La velocità con cui si sviluppano queste

tecnologie dovrebbe implementare la creazione di procedure standardizzate per l'elaborazione dei dati e la condivisione dei metadati.

9 Bibliografia

- [1]. Manfreda S, Dal Sasso S, Pizarro A, Tauro F. New Insights Offered by UAS for River Monitoring. *Applications of Small Unmanned Aircraft Systems: Best Practices and Case Studies*. 2019; 211-234.
- [2]. McCabe M, Aragon B, Houborg R, Mascaro J. CubeSats in Hydrology: Ultra-High Resolution Insights into Vegetation Dynamics and Terrestrial Evaporation. *Water Resources Research (American Geophysical Union Journals)*. 2017; 53, 10,017-10,024. <https://doi.org/10.1002/2017WR022240>.
- [3]. Floris A, Clementel F, Colle G, Gubert F, Bertoldi L, Lorenzi G. Stima di volumi legnosi forestali con dati fotogrammetrici telerilevati da UAV su piccole superfici: un caso di studio in Trentino. *Atti della "16a Conferenza Nazionale ASITA"*. Fiera di Vicenza. 2012; 681-688.
- [4]. Langhammer J, Lendzioch T, Miřijovský J, Hartvich F. UAV-Based Optical Granulometry as Tool for Detecting Changes in Structure of Flood Depositions. *Remote Sensing*. 2017; 9(3), 240.
- [5]. Westoby MJ, Brasington J, Glasser NF, Hambrey MJ, Reynolds JM. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology (Elsevier)*. 2012; 179, 300-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- [6]. Manfreda S, McCabe M, Miller P, Lucas R, Madrigal V, Mallinis G, Ben-Dor E ,et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sensing (MDPI)*. 2018; 10(4), 641-669.
- [7]. Woodget A, Carbonneau P, Visser F, Maddock I. Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms (British Society for Geomorphology)*. 2015; 40(1), 47-64.
- [8]. Bandini F, Olesen D, Jakobsen J, Kittel C, Wang S, Garcia M, Bauer-Gottwein P. Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle. *Hydrology and Earth System Sciences (European Geosciences Union)*. 2018; 22(8) 4165-4181.
- [9]. Ente Nazionale per l'Aviazione Civile. *Regolamento Mezzi aerei a pilotaggio remoto*. 2019 Nov. Roma. Ed 3.

- [10]. Novaro Mascarello N, Quagliotti F. The civil use of small unmanned aerial systems (sUASs): operational and safety challenges. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology (Emerald)*. 2017; 89(5), 703-708. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2017-0014>
- [11]. Commissione Europea. REGOLAMENTO DI ESECUZIONE (UE) 2019/947 DELLA COMMISSIONE del 24 maggio 2019 relativo a norme e procedure per l'esercizio di aeromobili senza equipaggio. *Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea*. 2019 Giu; 152, 45-71.
- [12]. Dal Sasso SF, Pizarro A, Samela C, Mita L, Manfreda S. Exploring the optimal experimental setup for surface flow velocity measurements using PTV. *Environmental Monitoring and Assessment (Springer)*. 2018 Lug; 190, 460.
- [13]. Tauro F, Piscopia R, Grimaldi S. Streamflow observations from cameras: large-scale particle image velocimetry or particle tracking velocimetry? *Water Resources Research (American Geophysical Union Journals)*. 2017 Dic; 53 (12), 10374– 10394. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>
- [14]. Sutarto TE. Application of Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) to Identify Flow Pattern in a Channel. *Procedia Engineering (Elsevier)*. 2015; 125, 213-219.
- [15]. Welber M, Coz J, Laronne J, Zolezzi Guido, Zamler D, Dramais G, Hauet A, Salvaro M. Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research (American Geophysical Union Journals)*. 2016 Feb; 52(2), 1108-1126.
- [16]. Dustin MC. Monitoring Parks with Inexpensive UAVs: Cost Benefits Analysis for Monitoring and Maintaining Parks Facilities [Dissertation]. University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, 2015.
- [17]. Matese A, Toscano P, Di Gennaro SF, Genesio L, Vaccari FP, Primicerio J, Belli C, Zaldei A, Bianconi R, Gioli B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. *Remote Sensing (MDPI)*. 2015; 7(3), 2971–2990.
- [18]. Kim Y. Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry [Dissertation]. University of Iowa, Iowa City, IA, 2006
- [19]. Thielicke W, Eize J S. PIVlab – Towards User-Friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software (Ubiquity Press)* 2014, 2. doi:10.5334/jors.bl.
- [20]. Le Coz J, JodeauM, Hauet A, Marchand B, Le Boursicaud R. (2014) Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free

- FUDAA - LSPIV software. International Conference of fluvial hydraulics. Lausanne, Switzerland. River Flow 2014, 1961-1967.
- [21]. Tmušić G, Manfreda S, Aasen H, James MR, Gonçalves G, Ben-Dor E, Brook A, et al. Current Practices in UAS-based Environmental Monitoring. Remote Sensing (MDPI). 2020, 12(6), 1001-1036.
- [22]. Patalano A, García C, Rodriguez A. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). Computers and Geosciences (Elsevier). 2017 Dic; 109, 323-330.
- [23]. Chen K. Application of large-scale particle image velocimetry at the Hydraulics Laboratory of Colorado State University [Dissertation]. Colorado State University, Colorado. 2018. <https://hdl.handle.net/10217/189265>

9.1 Sitografia

1. Istrea, Fudaa-LSPIV [Internet]. Jérôme Le Coz; 2019 [updated 2019; cited 2019 Jan] Available from: <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/>
2. Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale Sede Basilicata, Basento [Internet]. Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale Sede Basilicata; [cited 2020 Feb 22]. Available from: <http://www.adb.basilicata.it/adb/risorseidriche/fiume.asp?fiume=Basento>
3. Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale Sede Basilicata, Noce [Internet]. Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Meridionale Sede Basilicata [cited 2020 Feb 22]. Available from: <http://www.adb.basilicata.it/adb/risorseidriche/fiume.asp?fiume=Noce>
4. SEBA Hydrometrie; Mulinelli idrometrici portatili [Internet]. SEBA Hydrometrie; 2012 [updated 2012 Feb 24; cited 2020 Feb 20]. Available from: <http://www.instrumentservice.eu/it/wp-content/uploads/2013/03/Mulinello-universale-F1.pdf>
5. Viatronics Corp., Handheld surface velocity flow radar SVR-3 Pro [internet]. Viatronics Corp. 2020 [updated 2016; cited 2020 Feb 20]. Available from : <https://www.viatronics.fi/uploads/Brochures/Viatronics-SVR-3-Pro-ENG.pdf>

6. DJI; PHANTOM 3[internet]. DJI 2017 [updated 2017; cited 2020 Feb 20]. Available from:
<https://www.dji.com/it/phantom-3-se>
7. Sommer; RQ-30 non-contact discharge system [internet]. Sommer 2011 [updated 2011; cited 2020 Feb 20]. Available from:
https://www.elscolab.com/sites/default/files/uploads/48/Sommer_TechnicalInformation_RQ30.pdf

I riferimenti della bibliografia sono stati generati secondo le linee guida dell'University of Queensland secondo le linee guida Vancouver:

University of Queensland; Vancouver reference style [internet]. University of Queensland 2020 [update 20220 Feb 4; cited 2020 Mar 23]. Available from:
<https://guides.library.uq.edu.au/referencing/vancouver/webpages>

A. Appendice

9.2 Stato dell'arte: misura delle portate in un corso d'acqua

Le portate nei corsi d'acqua sono ottenute prevalentemente tramite misure indirette. La portata sarà ricavata partendo da misure di velocità, nota la sezione dell'alveo fluviale, oppure in relazione al livello idraulico ricorrendo alle scale di deflusso.

Nelle righe sottostanti sono riportati alcuni metodi.

A.1.1 Mulinello

Il mulinello è uno strumento utilizzato da lungo tempo in idraulica, consente di effettuare misure di velocità da cui si ricaverà la portata. Lo strumento può operare anche in condizioni di flusso ridotto, in acque sia limpide che torbide.

Il mulinello è costituito da un corpo fisso, con una forma idrodinamica, su cui si innesterà l'elica direzionata durante la misura in verso opposto alla direzione di flusso della corrente. Il cui movimento dell'elica consentirà di ottenere la velocità del flusso misurando il numero di giri compiuti nell'unità di tempo, note le costanti del mulinello utilizzato.

La misura della portata richiederà la definizione del profilo di velocità nella sezione.

Il profilo di velocità nella sezione si otterrà campionando la velocità nel modo più omogeneo e distribuito possibile. Si procederà scegliendo delle verticali con intervalli orizzontali tra loro il più possibile regolari. Lungo le verticali scelte, a varie altezze, verrà posto il mulinello che misurerà la velocità del flusso in quel punto.



Con il campionamento delle velocità si otterrà il suo profilo nella sezione (con una risoluzione spaziale definita dagli intervalli di campionamento).

Nota la sezione geometrica e la velocità media si calcolerà la portata sommando i prodotti tra i campionamenti e l'area di riferimento di ciascuna misura (ricorrendo ad esempio al metodo della sezione media o della sezione centrata).

Il metodo presenta alcuni difetti legati a delle condizioni operative. Intatti il metodo è difficilmente o non applicabile nelle condizioni di:

- ~ grandi dimensioni della sezione: la difficoltà operativa è legata all'elevato numero di misurazioni da acquisire ed alla difficoltà nel porre in posizione il mulinello;
- ~ elevate portate: in questi casi le operazioni di misura saranno disagiati o, in caso di eventi alluvionali, pericolose per gli operatori.

Nelle condizioni di corsi d'acqua in piena il metodo sarà difficilmente utilizzabile in quando la sezione sarà elevata e la portata notevole. Si avrà quindi la concomitanza delle due caratteristiche limitanti.

Il mulinello ad elica è talvolta sostituito dal mulinello elettromagnetico che prevede le stesse attività e prescrizioni per il corretto uso ma non avendo necessità di parti meccaniche in movimento non è ostacolato da alghe, profondità o velocità troppo ridotte.

A.1.2 Acoustic Doppler Current Profilers (ADCP)

Lo strumento che prende il nome di "Acoustic Doppler Current Profilers" (ADCPs) è costituito da un sensore alloggiato su un supporto galleggiante posto a contatto con la superficie del corso d'acqua.

Lo strumento eseguirà delle misure di velocità del flusso tramite l'effetto doppler lungo la verticale di stazionamento. Le misure saranno ad elevato intervallo temporale e coinvolgeranno un volume sulla verticale del sensore. Spostando lo strumento lungo la sezione si potrà ottenere un profilo verticale delle velocità che, nota la sezione geometrica, ci consentirà di ricavare le portate.



Lo strumento non potrà operare in condizioni di portate eccezionalmente elevate o in presenza di abbondante trasporto solido (caratteristiche tipiche delle piene alluvionali) in quanto potrebbe essere danneggiato o portato via dalla corrente rendendo impossibile le misurazioni.

A.1.3 Scale di Deflusso

Le misure dirette sono quelle maggiormente utilizzate poiché tecnicamente molto affidabili e robuste. Queste tipologie di misure hanno il difetto di non essere praticabili né in continuo, necessitando di tempo ed operatori dedicati per le operazioni di acquisizione della misura, né in caso di portate elevate, per questioni di sicurezza degli operatori e degli strumenti.

Per ottenere dunque una stima delle portate in condizioni di normale esercizio senza dover effettuare ogni volta misurazioni e per poter stimare le portate in condizioni di flussi elevati si ricorre alle scale di deflusso.

La scala di deflusso consiste nella relazione tra la portata transitante nel corso d'acqua ed il tirante idrico. Questa relazione può avere differenti gradi di incertezza e complessità, varia a seconda della sezione considerata ed è determinata sperimentalmente attraverso l'esecuzione di misure di portata ed altezza idrometrica contemporanee effettuate nella sezione d'interesse.

Le portate transitanti ottenute ed i rispettivi livelli idraulici misurati, sono utilizzati per la creazione di grafici delle curve deflusso. I valori del livello e della portata sono quindi rappresentati su un grafico rispettivamente sugli assi delle ascisse e delle ordinate. I punti riportati, corrispondenti alle misure effettuate, saranno interpolati per ottenere la curva di deflusso caratteristica del sito in esame.

Per conoscere la portata transitante in un dato momento, senza dover eseguire una misura strumentale, nota la curva di deflusso caratteristica della sezione in esame, sarà sufficiente riportare nel grafico la misura del livello idraulico e fare da questo far partire una retta che intersecherà la curva di deflusso. Dal punto così individuato sulla curva si tratterà una nuova retta orizzontale che permetterà di conoscere, per intersezione sull'asse delle portate, la portata stimata corrispondente.

Affidabilità della curva di deflusso

La curva così ottenuta avrà un'affidabilità, nella definizione delle portate, variabile in funzione della numerosità e distribuzione delle misure che sono state utilizzate per la sua interpolazione.

Supponiamo di suddividere l'asse orizzontale del grafico, corrispondente ai livelli idraulici, in più intervalli di pari dimensione. Le portate definite dai valori del tirante idraulico

compreso in un certo intervallo saranno tanto più affidabili tante più misure interpolate avranno livelli idraulici all'interno dell'intervallo di interesse.

Da queste considerazioni possiamo affermare che valori di portata ricercati sulla curva in condizioni ordinarie di flusso sono molto prossimi a quelli reali grazie alla buona interpolazione di quella parte di curva.

Quando si cerca di ottenere la portata di un corso d'acqua utilizzando la scala di deflusso durante eventi particolarmente intensi, con la scala di deflusso, questa sarà tanto meno affidabile tanto più raro sarà l'evento in esame poiché la curva disporrà di poche (o addirittura nessuna) misure pregresse per la stima del comportamento di questa tipologia di eventi.

La scarsità di informazioni riguardo agli eventi intensi è dovuta a varie cause:

- ~ la rarità degli eventi: la scarsa frequenza di accadimento contribuisce alla scarsità di occasioni utili per operare delle misurazioni;
- ~ Il rischio legato all'attività di misura degli eventi intensi: le misurazioni in presenza di flussi intensi (come durante le alluvioni) non sono facilmente attuabili a causa del rischio per gli operatori e per gli strumenti nel caso di metodi diretti.

Lo sviluppo di metodi indiretti efficienti nasce proprio dalla necessità di monitorare le portate durante eventi intensi in sicurezza.

A.1.4 Radar fisso

Il metodo di stima delle portate con il sistema radar fisso senza contatto con il pelo libero ricorre ad uno strumento fisso, posto in una posizione sopraelevata, da cui lo strumento può inquadrare la superficie del corso d'acqua.

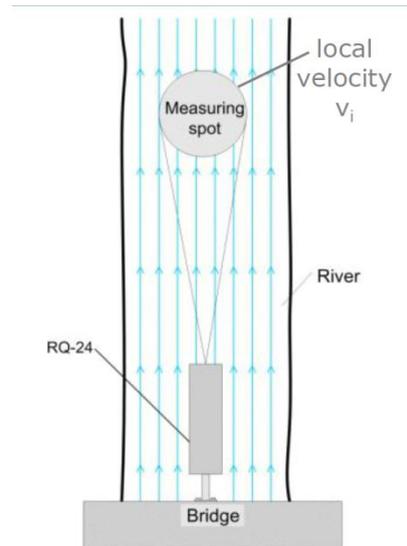
Lo strumento opera tramite effetto doppler per misurare la velocità superficiale nella superficie della sezione inquadrata.

Si otterrà la velocità media della sezione tramite una calibrazione di un modello matematico. Il modello metterà in relazione la velocità superficiale misurata nel punto inquadrato dallo strumento con la portata transitante. La calibrazione sarà eseguita in precedenza e terrà conto sia delle condizioni del sito sia dalla velocità superficiale misurata,.

La calibrazione sarà eseguita basandosi su eventi pregressi di cui si misureranno le portate che saranno quindi correlate alle misure acquisite dallo strumento nelle medesime condizioni. L'affidabilità della relazione si baserà quindi sulla conoscenza di eventi precedenti oggetto di misure e sulla loro abbondanza.

La distanza tra lo strumento e la superficie dell'acqua sarà utilizzata, nota la geometria del profilo, per ottenere il tirante idraulico e quindi la sezione geometrica interessata dal flusso.

I passaggi necessari con questo metodo per ottenere le portate sono ancora in fase di analisi sperimentale ma esistono già sul mercato delle aziende che propongono di installare e gestire questi strumenti. [Sitografia 7)



9.3 Stato dell'arte: misura delle velocità superficiali

La misura delle velocità superficiali di un corso d'acqua è possibile ricorrendo a vari strumenti di misura più o meno affidabili e comodi per l'operatore.

A.1.5 Mulinello ad elica

Lo strumento per le misure di velocità nei corsi d'acqua è il mulinello a elica di cui si è già parlato.

Per eseguire la misura si posizionerà lo strumento nel punto della sezione del corso d'acqua dove si desidera misurare la velocità. La velocità superficiale nella sezione si otterrà ripetendo le misure ad intervalli lungo la superficie. Lo strumento dovrà essere a contatto (sommergendo interamente l'elica) con il corso d'acqua.

9.3.1 Misura radar per la velocità superficiale (Surface Velocity Radar)

Gli strumenti radar per la misura delle velocità superficiali (Surface Velocity Radar, SVR) effettuano misure radar della velocità di flusso superficiale basandosi sul principio del cambio di frequenza doppler. Il segnale emesso dall'apparecchio è riflesso dalla superficie del corso d'acqua inquadrata portando ad una variazione del segnale in ritorno verso lo strumento che, rilevata dal sensore, porta alla misura della velocità superficiale.

La velocità superficiale nella sezione del tratto d'interesse del corso d'acqua si otterrà ripetendo la misura in più punti intervallati tra loro. Ciascuna singola misurazione dovrà considerarsi puntuale con riferimento al centro dell'area della superficie del corso d'acqua inquadrata.

Lo strumento presenta un'elevata accuratezza per velocità superiori ai 30 cm/s.
[Sitografia 7]

Le misure sono indipendenti dalla temperatura media dell'aria e non richiedono alcun tipo di contatto tra lo strumento ed il corso d'acqua.

La ripetizione delle misure richiederà tempo. Più frequentemente il dato di velocità superficiale utilizzato per la definizione della portata transitata sarà acquisito da uno strumento fisso in una posizione sopraelevata e riferito solamente ad una parte della sezione corrispondente a quella inquadrata dallo strumento.

9.4 Confronto tra il metodo video rispetto alle altre tipologie

A.1.6 Mulinello

Il mulinello è un metodo affidabile e di semplice esecuzione nel caso in cui la sezione d'interesse sia raggiungibile facilmente dagli operatori e dallo strumento.

L'economicità della strumentazione lo porta ad essere preferibile rispetto agli altri metodi per l'esecuzione di misure in sezioni ristrette e con portate limitate.

Per sezioni del corso d'acqua molto estese lo strumento perderà di efficienza in quando la misurazione richiederà molto tempo per essere eseguita.

Portate transitive elevate e letti del corso d'acqua non facilmente raggiungibili con lo strumento rappresenteranno un limite all'uso del mulinello. Le portate elevate metteranno a rischio la sicurezza dell'operatore e dello strumento mentre le irregolarità o profondità della sezione renderanno difficoltoso e/o pericoloso la misurazione.

In queste situazioni il mulinello risulterà poco efficiente o non utilizzabile. Al contrario la tecnologia LSPIV consente di misurare le velocità velocemente, su sezioni molto estese, senza rischi per gli operatori, anche in condizioni di piena

A.1.7 Acoustic Doppler Current Profilers

Le misure di velocità nella sezione di un corso d'acqua eseguite tramite "Acoustic Doppler Current Profilers" sono molto accurate e di semplice esecuzione. Possono essere eseguite comodamente anche in sezioni estese (anche se richiederanno un po' di tempo nell'essere eseguite). Il metodo quindi risulta efficiente e conveniente per effettuare misure di velocità in condizioni di flusso ordinario.

Trattandosi di uno strumento che richiede il contatto con il corso d'acqua per operare non risulta utilizzabile in condizioni di piena e trasporto solido elevato in quanto rischierebbe di essere danneggiato.

Le tecniche LSPIV richiedono invece delle elaborazioni più complesse, soggettive e con maggior tempo di analisi. Il costo della strumentazione richiesta dalle due tecniche è molto differente in quanto per la tecnica LSPIV sarà sufficiente una camera video (ed eventualmente un drone) mentre per l'analisi ADCP sarà necessario una strumentazione più costosa. Oltre a ciò le tecniche di telerilevamento, come spesso ripetuto, possono operare in sicurezza anche in situazioni di piena.

A.1.8 Radar fisso

Il metodo radar fisso consente di effettuare misure in continuo sui corsi d'acqua per conoscere le portate. Esso richiede delle elaborazioni preliminari per la definizione della legge di sito ma dopo queste operazioni la ricostruzione della portata sarà relativamente banale.

Ciascuno strumento è posto in una sezione del corso d'acqua, e acquisisce misure solo in quella specifica sezione. Lo strumento deve essere installato in una posizione tale da consentire l'inquadramento di un'area del corso d'acqua rappresentativa della sezione.

Il metodo LSPIV può essere applicato per misure in continuo. In questo caso le analisi possono essere messe a punto per ottenere elaborazioni più speditive note le caratteristiche del sito specifico. Il vantaggio rispetto al metodo radar fisso consiste nella superiore capacità d'indagine (verrà fornito il campo di moto della velocità superficiale anziché la velocità superficiale in un solo punto) e nei costi più contenuti.

Il metodo inoltre potrà essere applicato anche in modo non fisso portando ad una maggiore elasticità d'impiego in quando l'acquisizione dei video potrà essere eseguita anche in corsi d'acqua non strumentati precedentemente e sarà possibile ricorrere a droni che

potranno operare da punti di presa spesso più favorevoli di quelli disponibili per le installazioni fisse.

A.1.9 Radar “Spalleggiabile”

Il metodo SVR è un metodo efficiente e speditivo per la misura delle velocità superficiali che non richiede grandi investimenti in strumentazione.

Rispetto alla tecnica LSPIV il metodo richiede molto meno tempo per fornire la misura ma ha necessità di un punto di acquisizione stabile e prossimo all’acqua nel caso della maggior parte degli strumenti. Per questa ragione non sarà possibile ricorrere ai droni per l’acquisizione e diverrà complesso operare in condizioni di scarso accesso alla sezione d’interesse.

Il radar fornisce inoltre misure puntuali mentre il telerilevamento video consente di conoscere l’insieme del campo di moto, comprese le sue turbolenze.

	Mulinello	ACDP	Radar Fisso	Radar Mobile	LSPIV
Utilizzabile in sezioni di elevata ampiezza	No Richiede inoltre che il fondo del corso d'acqua sia percorribile	Si. Le misure richiederanno però molto tempo	Si. Ma la calibrazione sarà più complessa	Si. La misura richiederà però un punto di stazionamento dello strumento adeguato	Si. Il metodo risulta speditivo
Misura fornita	Velocità puntuali nella sezione	Velocità puntuali, mediate su un volume, nel profilo della sezione	Una velocità puntuale, media delle velocità nell'area inquadrata	Velocità superficiali puntuali, mediate su aree della sezione	<u>Campo di modo</u> della velocità superficiale nell'area ripresa. (misura areale)
Tempo di campionamento	Alcuni minuti per ogni punto nella sezione in cui si desidera misurare la velocità	Decine di minuti	Pochi minuti	Alcuni minuti per ciascun punto della superficie in cui si misurerà la velocità	Alcuni minuti per acquisire il video. Alcuni minuti aggiuntivi se si effettua il video tramite volo con drone
Possibilità di effettuare misure in continuo	No	Solo con particolari e costose stazioni	Si. È pensato per la misura in continuo	No	Si. Posizionando una camera fissa
Tempo di elaborazione	Minimo (Alcuni minuti per riportare i dati in tabelle)	Minimo (pochi minuti per il trasferimento dei dati)	Il dato puntuale sarà fornito subito. La Portata sarà ricavata con formule di sito	Minimo (Alcuni minuti per riportare i dati in tabelle)	Elevato (mezzora, un ora per ottenere un'analisi)
Semplicità/complessità nell'elaborazione dei dati	La conversione da giri/minuto a m/s è lineare	I dati forniti dallo strumento saranno già rappresentati come profilo di velocità	Per ottenere la portata la calibrazione rispetto alle particolari condizioni del sito richiederà tempo ed impegno.	Lo strumento fornirà già la misura della velocità in m/s.	L'analisi dei dati che fornirà il profilo di velocità richiederà il lavoro di un operatore esperto per riuscire ad ottimizzare i tempi ed i risultati
Contatto con il corso d'acqua	Si	Si	No	No	No
Utilizzabile in condizioni di piena	No	No	Si	Si	Si
Costo della strumentazione	~4000€	~15000 ÷ 20000€	~3000€	~3000€	Drone ~3000€ Camera ~500€

A-1 Tabella di confronto tra i metodi

9.5 Schede fiumi Basento e Noce

FIUME BASENTO		
A) Caratteristiche della sezione		
Data ed ora di esecuzione del video	13 Giugno 2018	15:30
Coordinate geografiche della sezione di misura	40°37'34.9"N 15°47'44.1"E	
Tipologia di sezione trasversale	Sezione naturale di forma trapezoidale irregolare	
Pendenza del fondo (%)	0.01	
Materiale del fondo	Ghiaioso	
Trasporto solido al fondo	Limitato	
Trasporto solido in sospensione	Limitato	
B) Video		
Condizioni di illuminazione	Buone condizioni di illuminazione della radiazione solare incidente con poca riflessione da parte della superficie idrica del corso d'acqua, con presenza di lievi increspature e vortici e presenze di lievi zone d'ombra.	
Tipologia SAPR	Aereomobile di tipo DJI Phantom 3 Pro	
Quota di volo (m)	10	
Inclinazione della camera (gradi)	90	
Modello della camera	FC6310	
Frequenza di campionamento (Hz)	24	
Durata del video acquisito (s)		
C) Tracciante		
Tipologia	Trucioli di legno	
Dimensione media del tracciante (m)	0.03	
Colore	Chiaro	
Densità (particelle/pixels)	4.90E-04	
D) Misure di riferimento		
Tipologia di strumento	Mulinello idraulico	
Q (m ³)	0.607	
H max (m)	0.36	
Larghezza trasversale (m)	6	
U max (m/s)	0.68	
U media (m/s)	0.43	
Distanza dal bordo sinistro (m)	Profondità (m)	Velocità (cm/s)
0.5	18	5.27
1.0	25	17.32
1.5	33	42.95
2.0	33	57.89
2.5	27	29.07
3.0	30	29.07
3.5	38	61.10
4.0	34	67.50
4.5	35	53.62

5.0		32	50.42
5.5		32	42.95
6.0		28	24.80
E) Operazioni di preprocessamento			
Stabilizzazione	No	Ricampionamento	SI
Trasformazione in B/N	Si		
E) Analisi Ottica			
Programma di calcolo adottato:		PIV_lab	
Dimensione della regione d'interesse (mm)			
x	315	w	1052
y	346	h	698
Calibrazione			
Elemento di riferimento		Strumento idraulico	
Real distance (mm)		200	
1 (px) = (m)		0.005	
Validazione			
u	1.5	v	0.4
-u	-0.5	-v	-0.4
Simulazioni numeriche investigate			
Algoritmo di calcolo	Frame rate utilizzato	Finestra di analisi	Numero di frame
DCC	24	128 – 64	100
			200
			500
		64 – 32	100
			200
			500
		32 – 16	100
			200
			500
FTT; 1 passo	24	128 – 64	100
			200
			500
		64 – 32	100
			200
			500
		32 – 16	100
			200
			500
Programma di calcolo adottato:		Fudaa	
Dimensione della regione d'interesse (mm)			
x	315	w	1052
y	346	h	698
Calibrazione			
Elemento di riferimento		Strumento idraulico	
Real distance (mm)		200	

1 (px) = (m)		0.005	
Validazione			
u	1E+30	v	0.5
-u	-0.5	-v	-0.5
Simulazioni numeriche investigate			
IA	SA	IA	SA
100	2	50	2
	4		4
	6		6
	8		8
	10		10
	12		12
	20		20
30	2	20	2
	4		4
	6		6
	8		8
	10		10
	12		12
	20		20

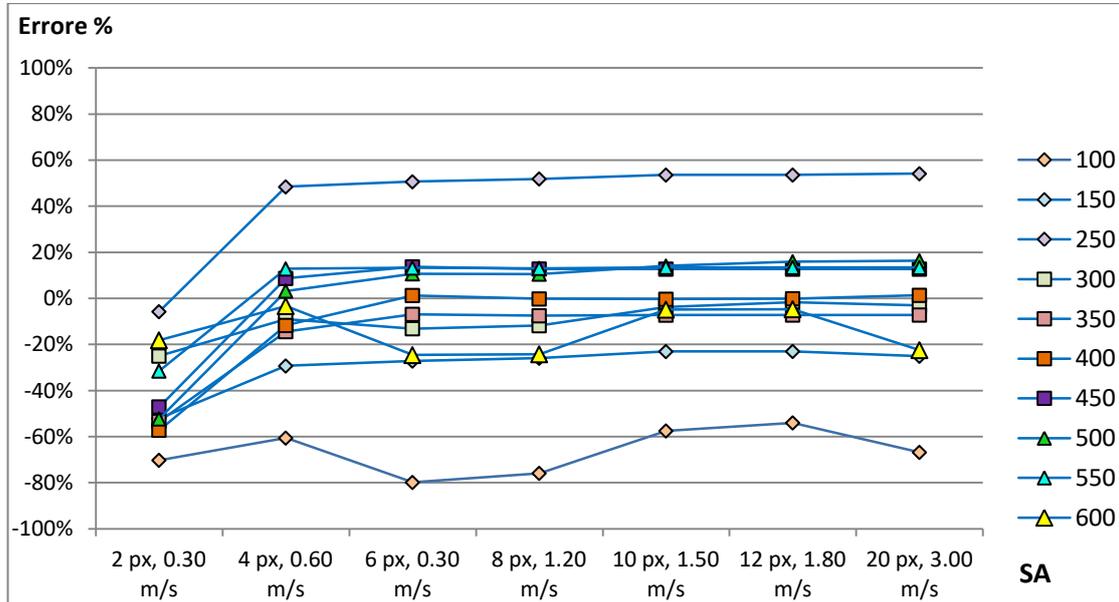
FIUME NOCE		
A) Caratteristiche della sezione		
Data ed ora di esecuzione del video		
Coordinate geografiche della sezione di misura	39° 59' 32" N, 15° 48' 7" E	
Tipologia di sezione trasversale	Sezione naturale di forma trapezoidale irregolare	
Pendenza del fondo (%)	1.1	
Materiale del fondo	Ghiaioso	
Trasporto solido al fondo	Limitato	
Trasporto solido in sospensione	Limitato	
B) Video		
Condizioni di illuminazione	Le indagini di campo sono state condotte di giorno in condizioni di luce diurna e considerando due diverse condizioni di acqua limpida e torbida	
Tipologia SAPR	Aereomobile di tipo DJI Phantom 3 Pro	
Quota di volo (m)	14.6	
Inclinazione della camera (gradi)	90	
Modello della camera	FC6310	
Frequenza di campionamento (Hz)	24	
Durata del video acquisito (s)		
C) Tracciante		
Tipologia	Truciolini di legno	
Dimensione media del tracciante (m)	0.03	
Colore	Chiaro	
Densità (particelle/pixels)	3.40E-04 ; 1.63E-04	
D) Misure di riferimento		
Tipologia di strumento	Mulinello idraulico	
Q (m ³)	1.678	
H max (m)	0.45	
Larghezza trasversale (m)	14.6	
U max (m/s)	0.48	
U media (m/s)	0.437	
Distanza dal bordo sinistro (m)	Profondità (m)	Velocità (cm/s)
0	20	
1	20	0.344053333
2	25	0.41879
3	35	0.440143333
4	45	0.472173333
5	40	0.48285
6	40	0.472173333
7	40	0.461496667
8	40	0.48285
9	35	0.48285
10	35	0.440143333
11	30	0.472173333

12	20	0.376083333	
13	15	0.247963333	
14.6	0		
E) Operazioni di preprocessamento			
Stabilizzazione	No	Ricampionamento SI	
Trasformazione in B/N	Si		
F) Analisi Ottica			
Programma di calcolo adottato:	PIV_lab		
Dimensione della regione d'interesse (mm)			
x	426	w 771	
y	353	h 580	
Calibrazione			
Elemento di riferimento	Strumento idraulico		
Real distance (mm)	200		
1 (px) = (m)	0.0109		
Validazione			
u	1.5	v 0.4	
-u	-0.5	-v -0.4	
Simulazioni numeriche investigate			
Algoritmo di calcolo	Frame rate utilizzato	Finestra di analisi	Numero di frame
DCC	24	128 – 64	100
			200
			500
		64 – 32	100
			200
			500
		32 – 16	100
			200
			500
FTT; 1 passo	24	128 – 64	100
			200
			500
		64 – 32	100
			200
			500
		32 – 16	100
			200
			500
Programma di calcolo adottato:	Fudaa		
Dimensione della regione d'interesse (mm)			
x	315	w 1052	
y	346	h 698	
Calibrazione			
Elemento di riferimento	Strumento idraulico		
Real distance (mm)	200		

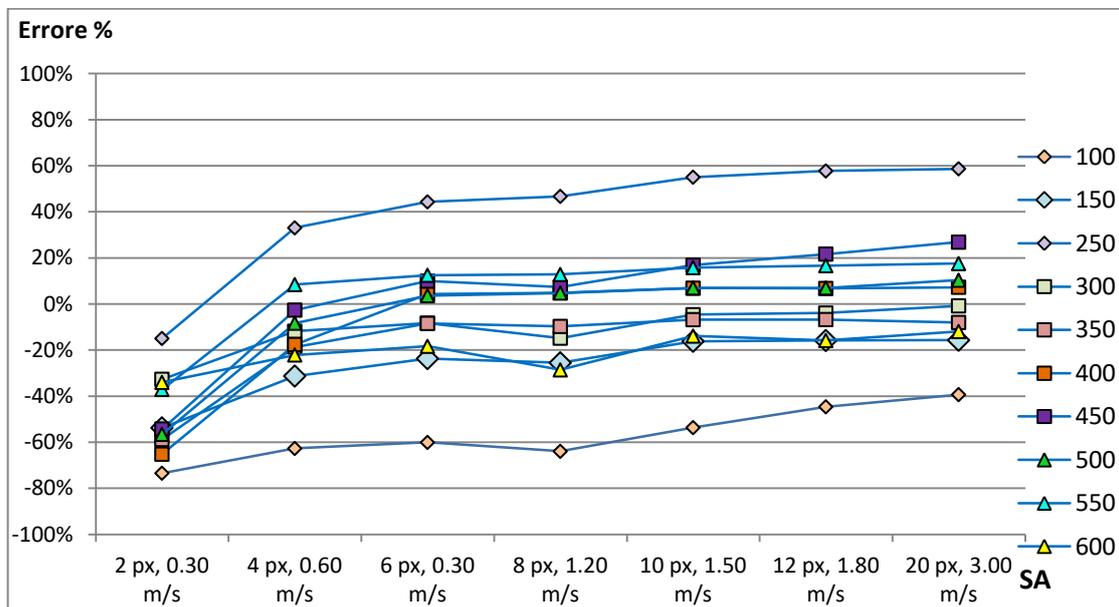
1 (px) = (m)		0.005	
Validazione			
u	1E+30	v	0.5
-u	-0.5	-v	-0.5
Simulazioni numeriche investigate			
IA	SA	IA	SA
100	2	50	2
	4		4
	6		6
	8		8
	10		10
	12		12
	20		20
30	2	20	2
	4		4
	6		6
	8		8
	10		10
	12		12
	20		20

9.6 Grafici dei risultati delle analisi

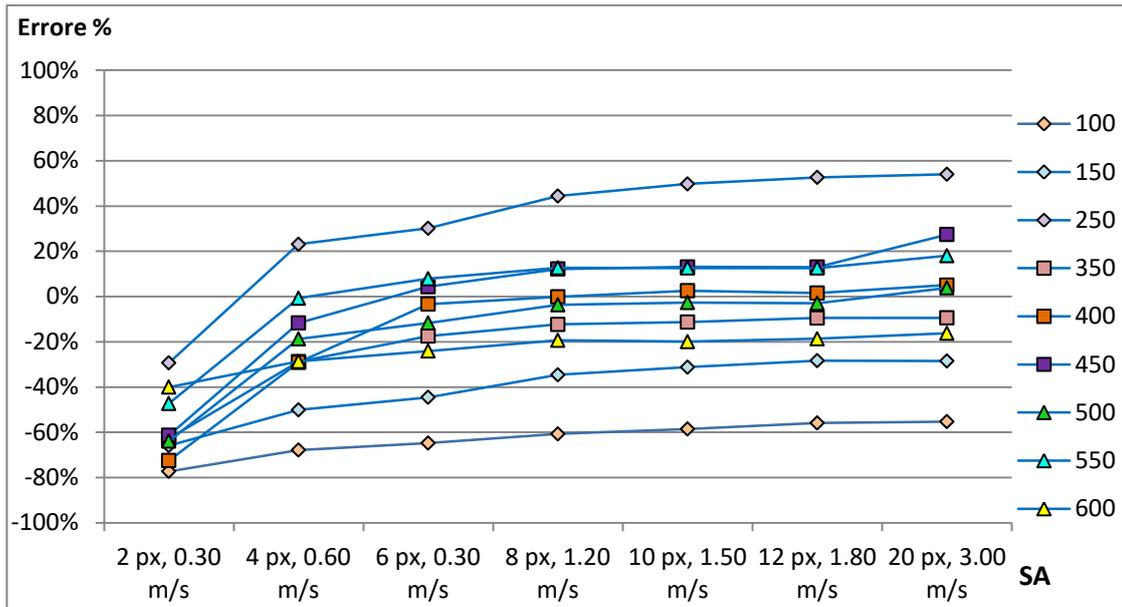
A.1.10 Basento:



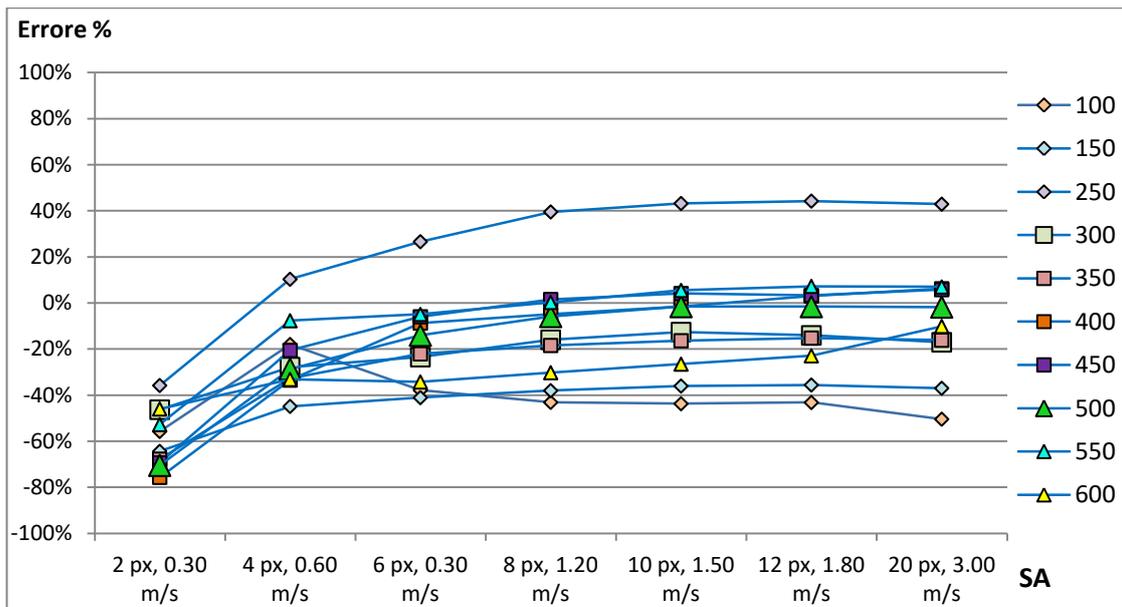
A-1 Basento IA=100, Errore Percentuale



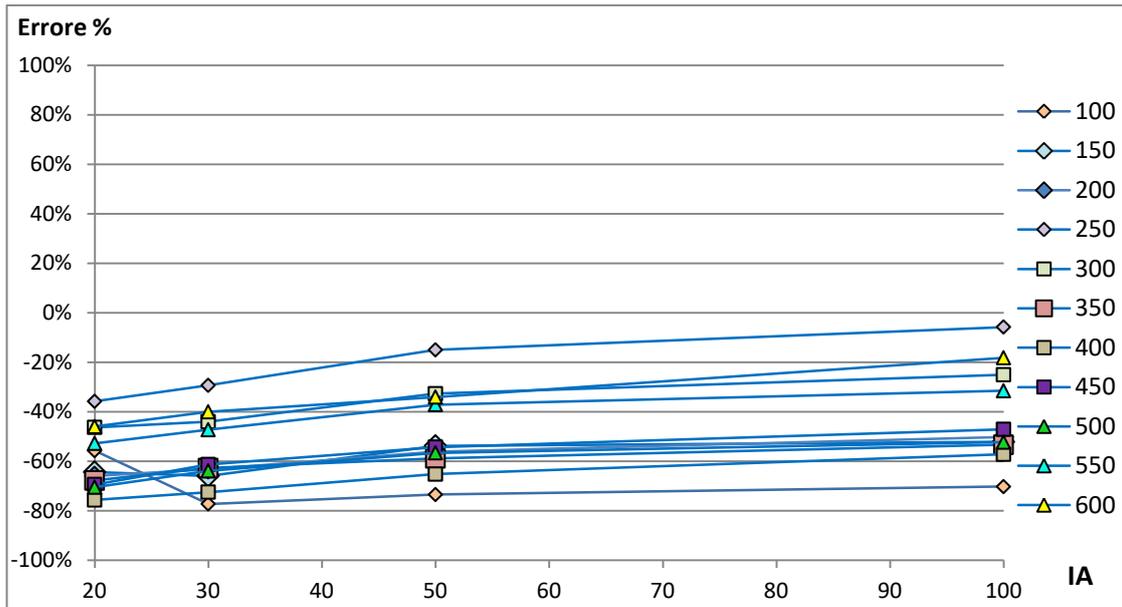
A-2 Basento IA=50, Errore Percentuale



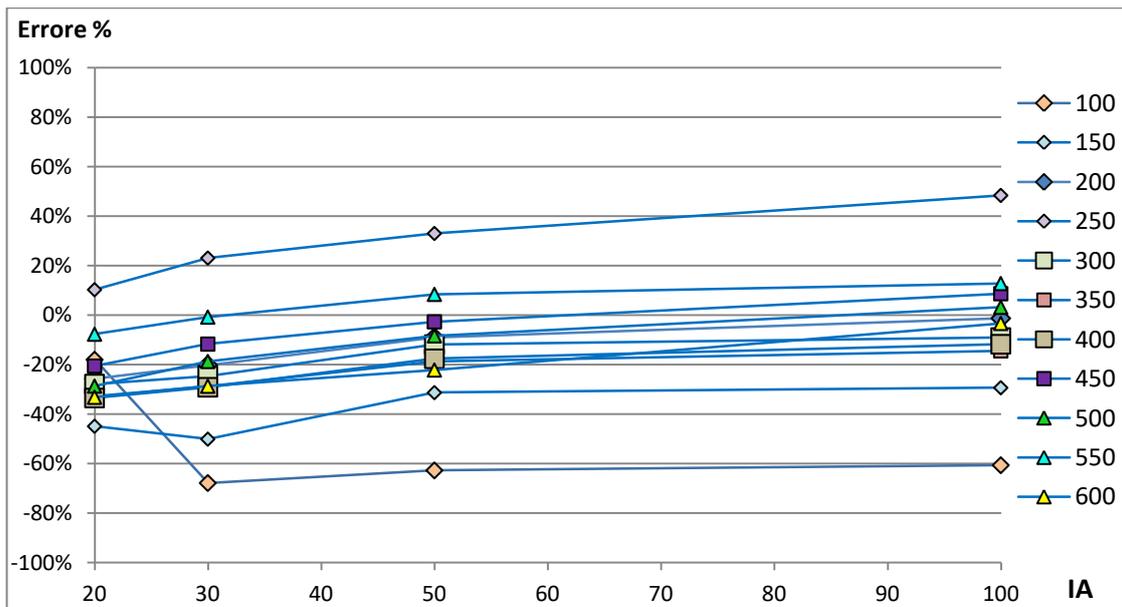
A-3 Basento IA=30, Errore Percentuale



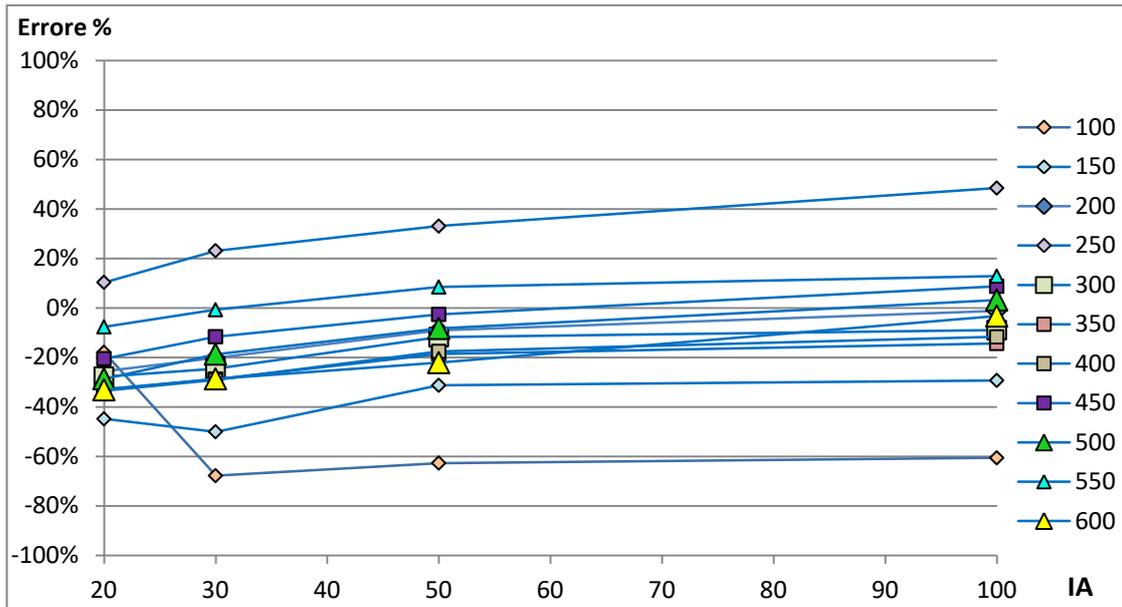
A-4 Basento IA=20, Errore Percentuale



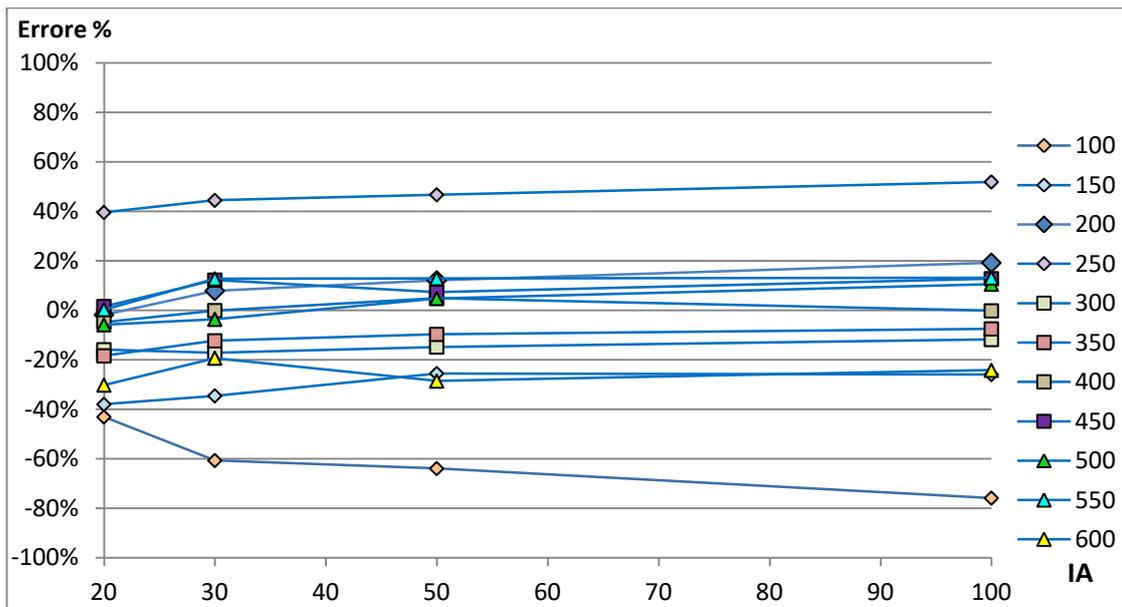
A-5 Basento SA=2, Errore Percentuale



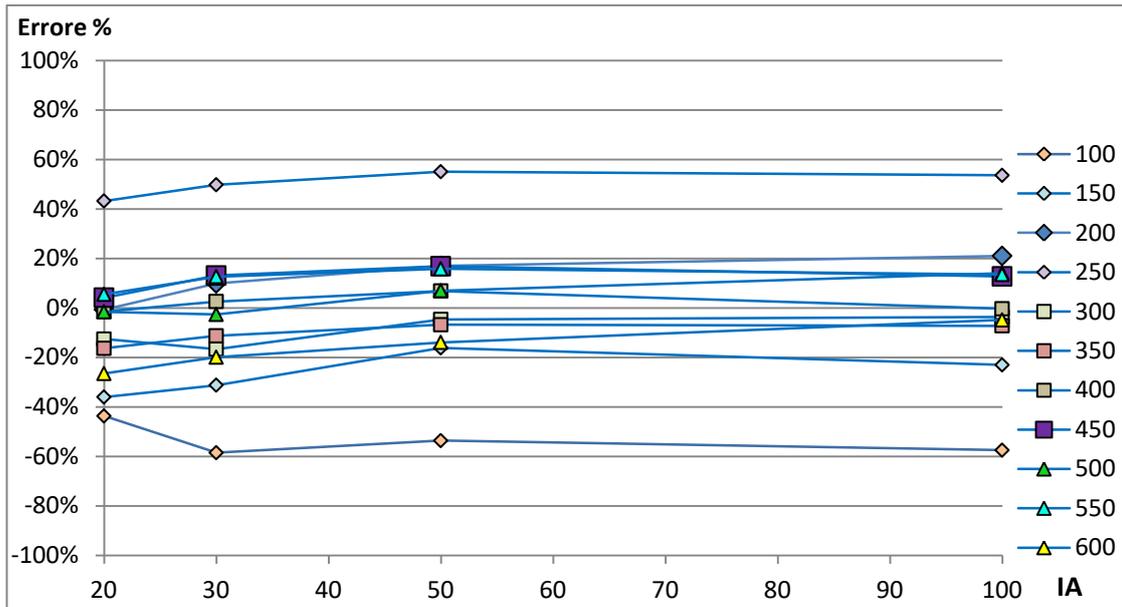
A-6 Basento SA=4, Errore Percentuale



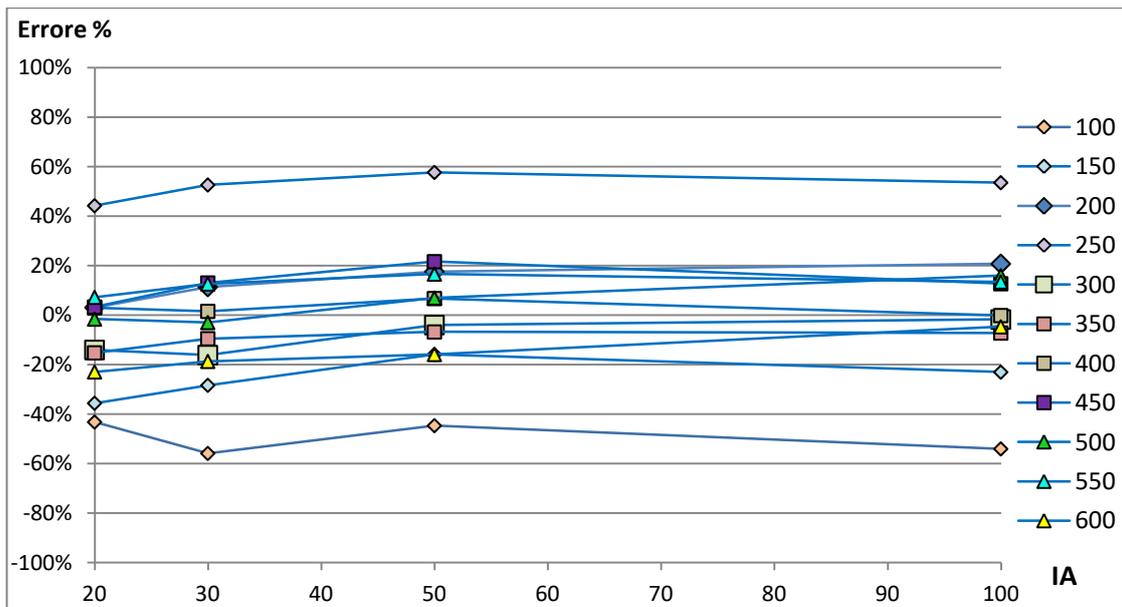
A-7 Basento SA=4, Errore Percentuale



A-8 Basento SA=8, Errore Percentuale

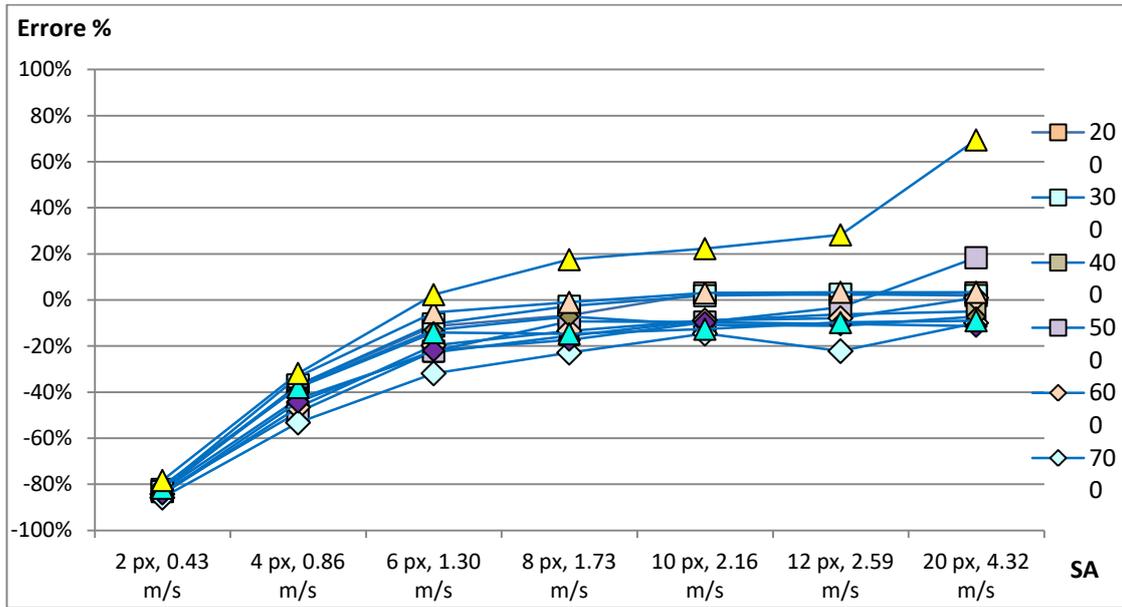


A-9 Basento SA=10, Errore Percentuale

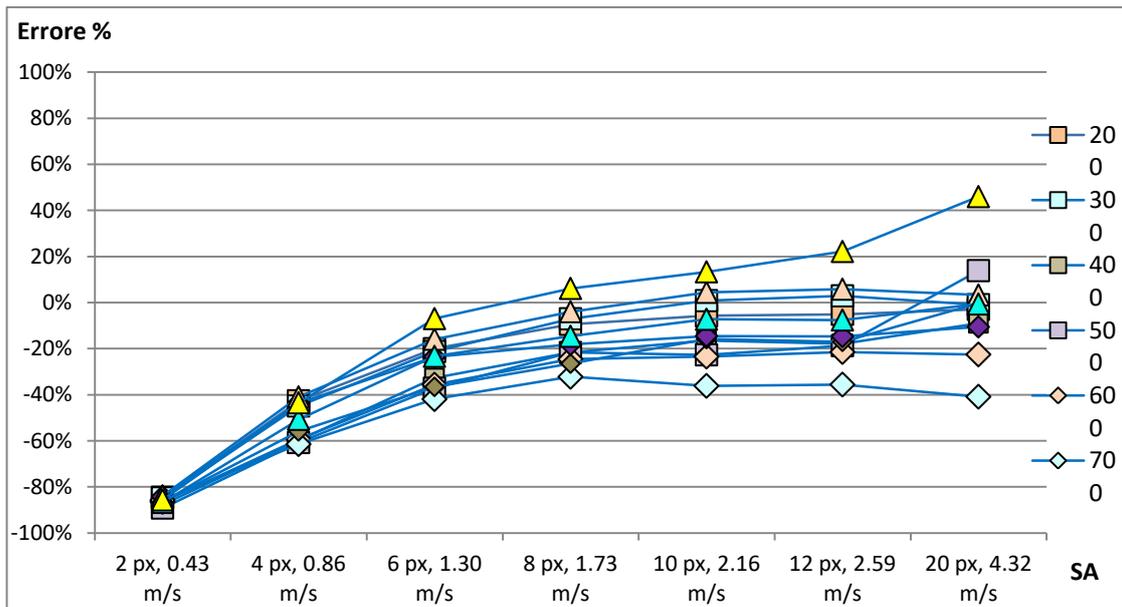


A-10 Basento SA=12, Errore Percentuale

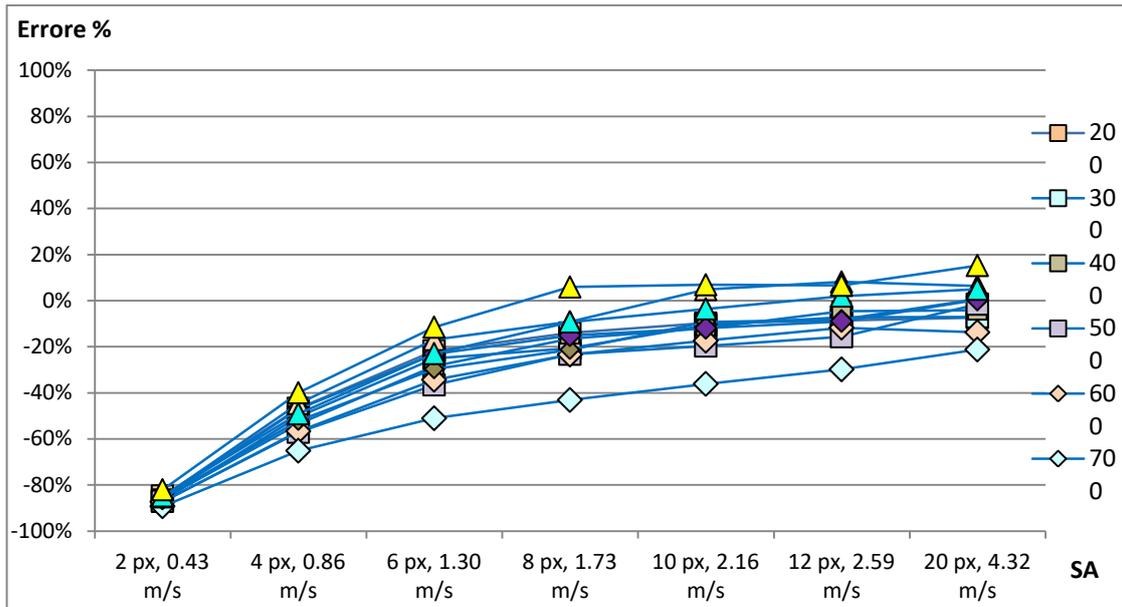
A.1.11 Noce



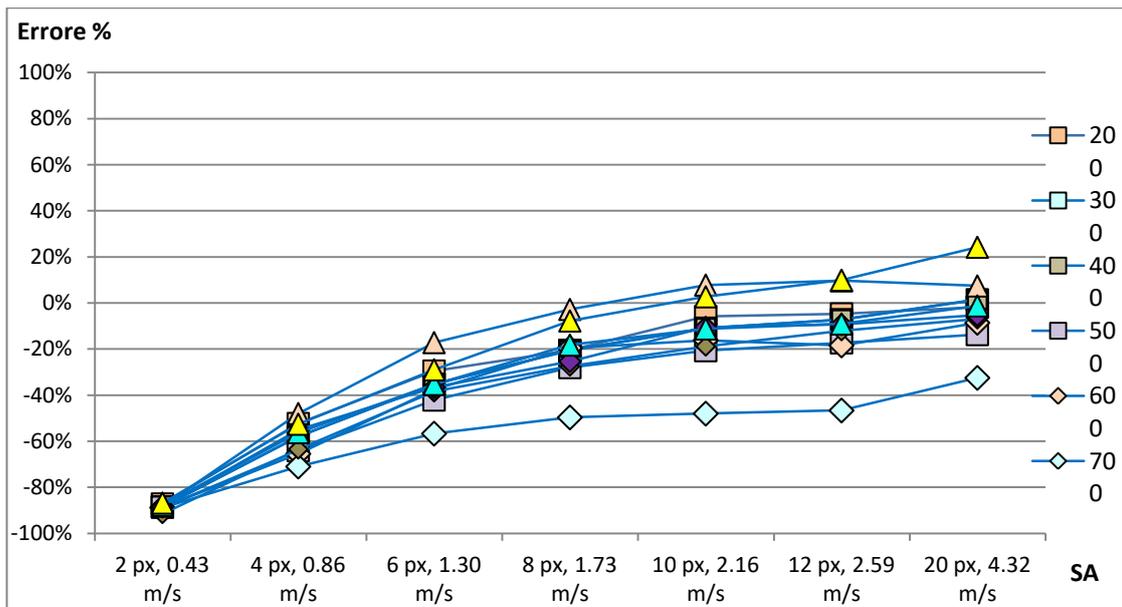
A-11 Noce IA=100, Errore Percentuale



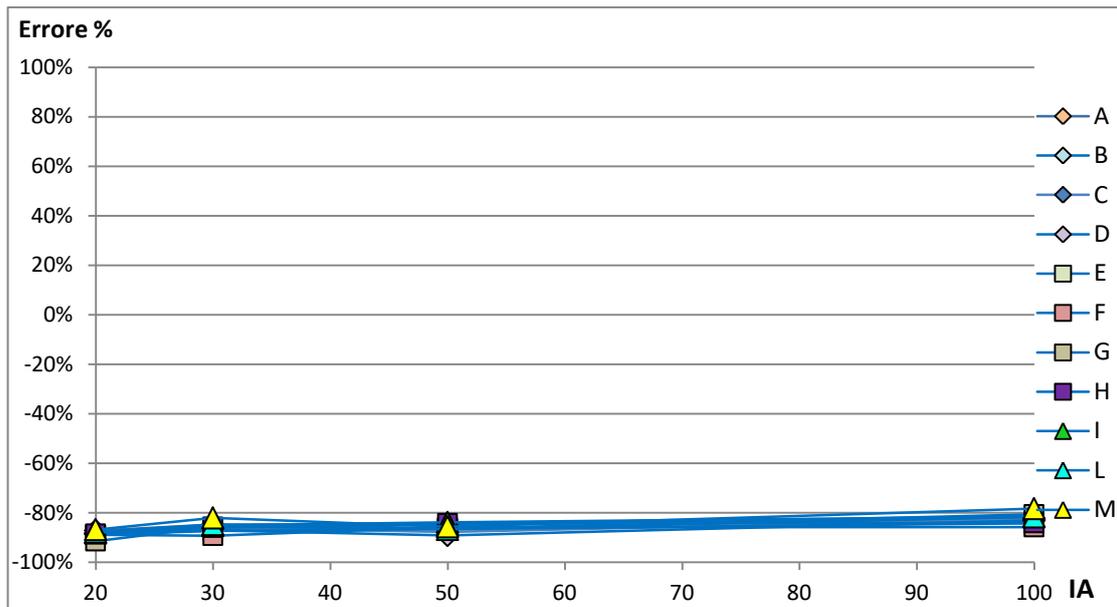
A-12 Noce IA=50, Errore Percentuale



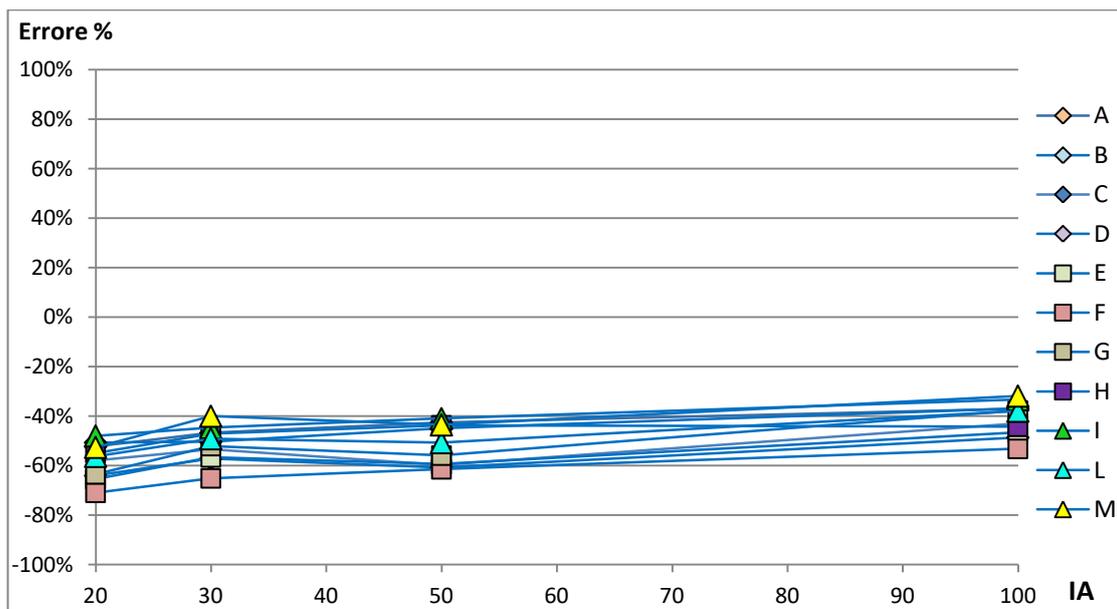
A-13 Noce IA=30, Errore Percentuale



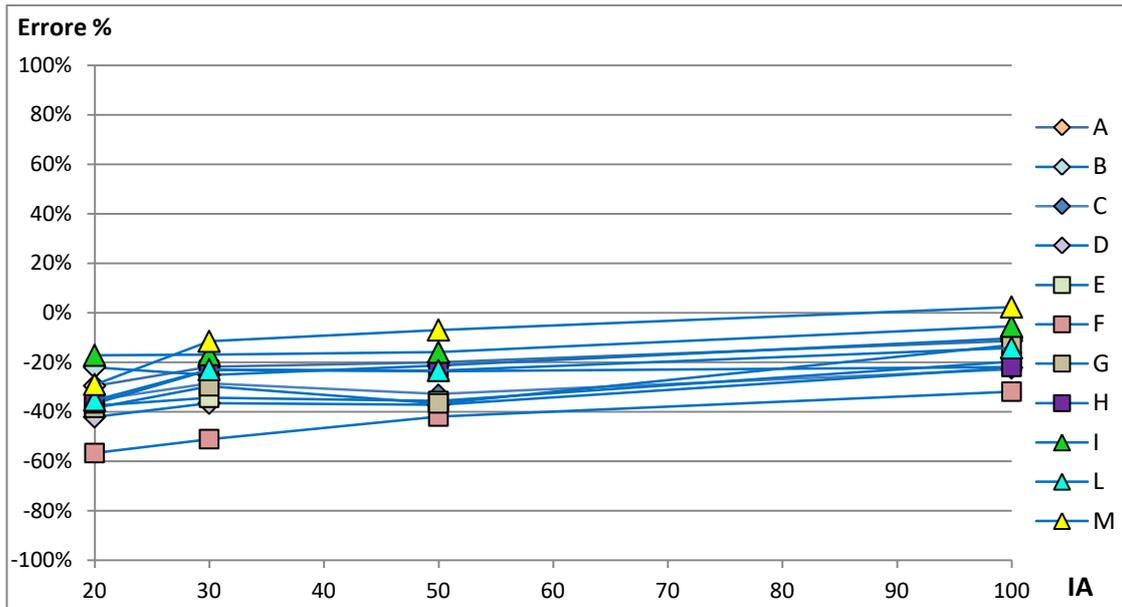
A-14 Noce IA=20, Errore Percentuale



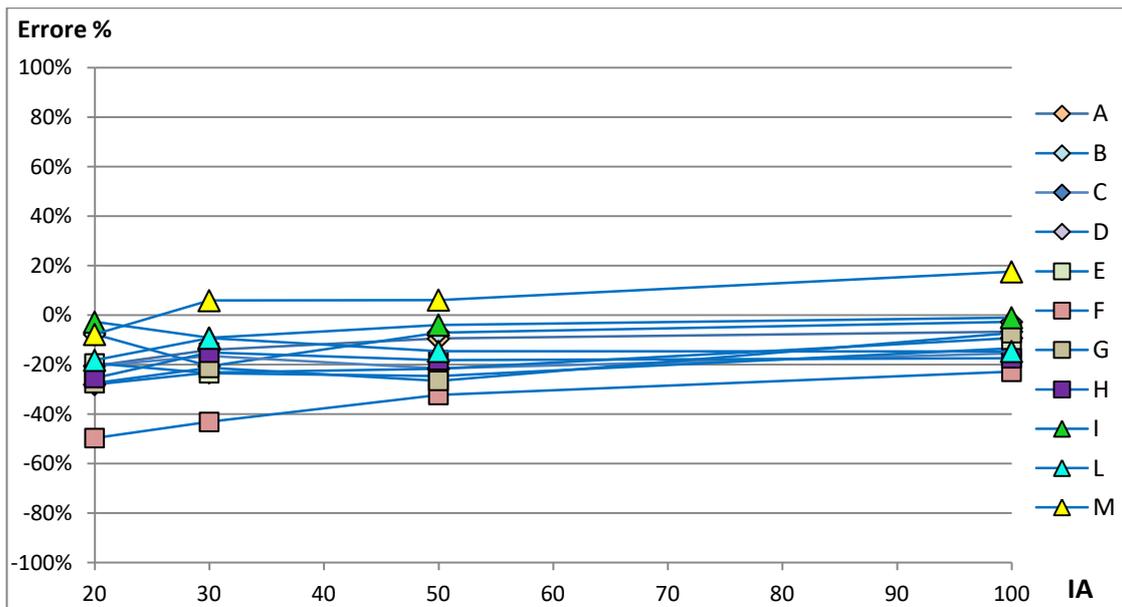
A-15 Noce SA=2, Errore Percentuale



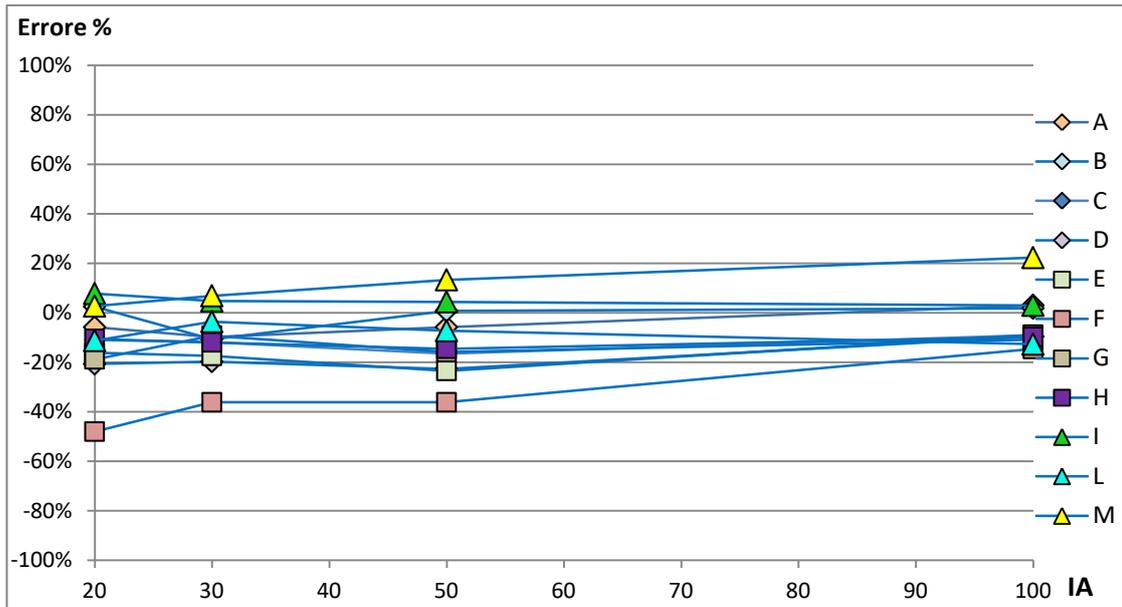
A-16 Noce SA=4, Errore Percentuale



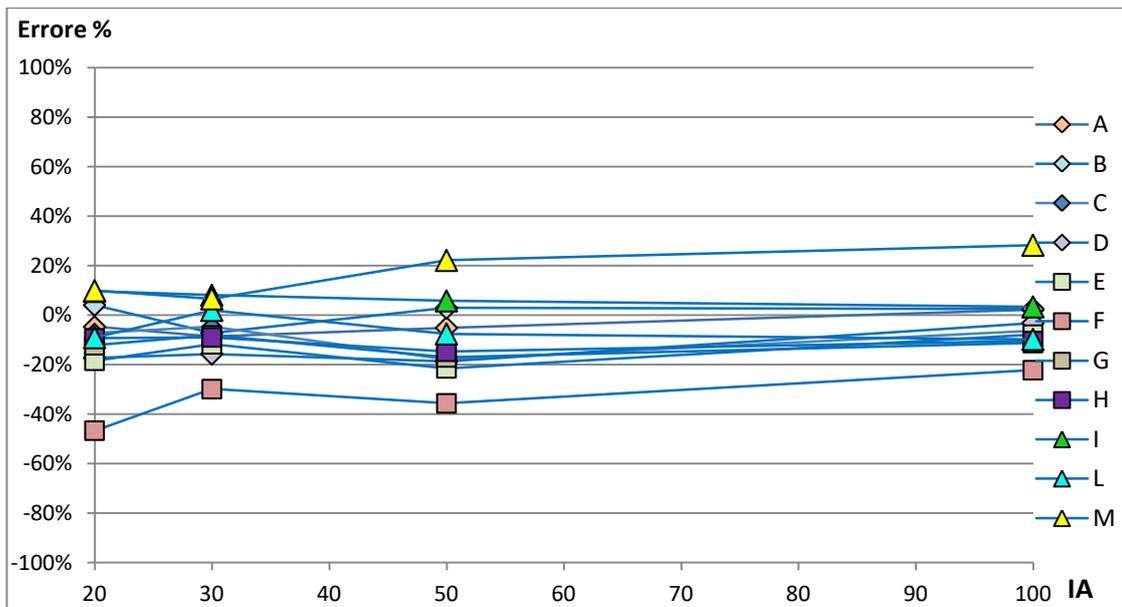
A-17 Noce SA=6, Errore Percentuale



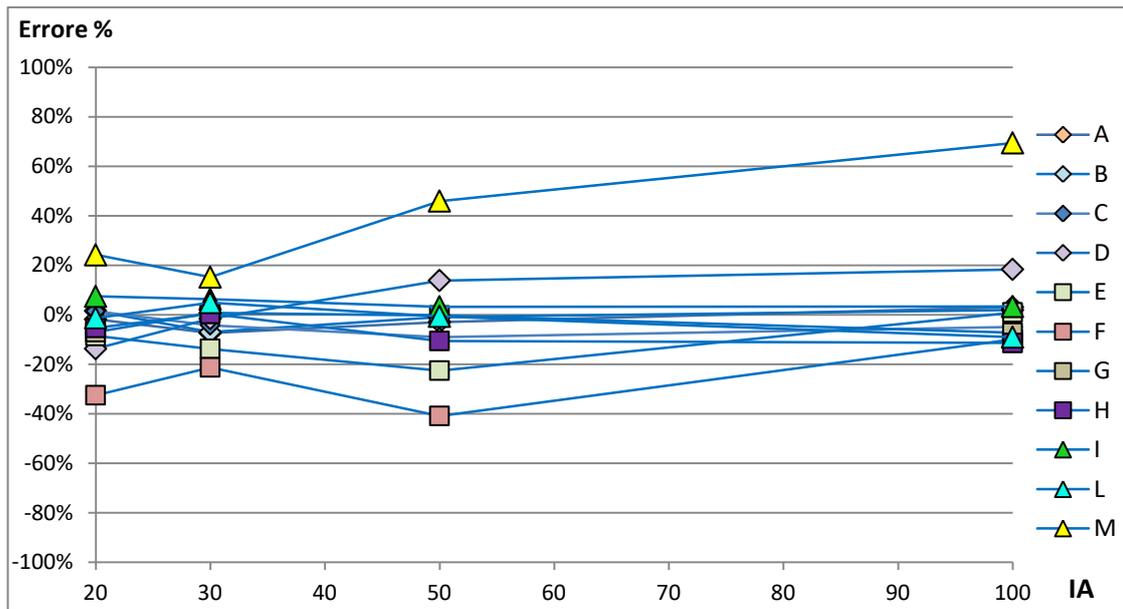
A-18 Noce SA=8, Errore Percentuale



A-19 Noce SA=10, Errore Percentuale



A-20 Noce SA=12, Errore Percentuale



A-21 Noce SA=12, Errore Percentuale