



**Politecnico
di Torino**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Caratterizzazione della vegetazione a partire da
dati LiDAR e calibrazione di un modello
stocastico per la dinamica della vegetazione
riparia: caso studio del torrente Orco**

Relatore

Prof. Carlo Camporeale

Correlatore

Ing. Melissa Latella

Candidata

Camilla Redoglia

Luglio 2021

A mio papà Franco

A mia mamma Antonella

Abstract

Il lavoro di tesi è nell'ambito dell'idraulica fluviale intesa come ecomorfodinamica fluviale dove sono presenti sia aspetti ecologici che morfologici. In particolare, lo studio è stato condotto sul torrente Orco, che si trova nella regione Piemonte (Italia) e sfocia nel Po a nord di Torino presso Chivasso. Durante gli anni precedenti l'inizio del presente progetto di tesi, sono state fatte campagne di misura, rilievi topografici LiDAR e con drone in modo da ricostruire la topografia e l'altimetria del corso d'acqua di un tratto del torrente Orco compreso tra Cuorgnè e Chivasso per un'estensione di quasi 30 km. L'attività di tesi coinvolge un'analisi di dati (topografici e LiDAR) e l'utilizzo di alcuni software per la gestione del dato LiDAR e la trasposizione in un formato accessibile (QGIS, CloudCompare) al fine di caratterizzare la vegetazione ripariale a partire dai dati LiDAR forniti dal CNR IRPI. Per l'individuazione dei singoli alberi si è utilizzato un approccio innovativo basato sulla densità spaziale dei punti che costituiscono la nuvola georeferenziata fornita dall'acquisizione LiDAR (le chiome degli alberi di latifoglie risultano più dense in corrispondenza del tronco mentre allontanandosi verso le estremità delle fronde, la densità diminuisce). A partire dai risultati forniti dall'implementazione di questo algoritmo su MATLAB, si è calcolata la densità di biomassa arborea per ogni specie ripariale presente nell'area di studio. L'attività di tesi coinvolge inoltre, la modellazione idraulica bidimensionale del torrente Orco con l'uso del software Delft3D Flexible Mesh per osservare, al variare della portata, quali sono i livelli raggiunti dal flusso della corrente in ogni punto dell'area di studio in presenza dell'attrito dato dalla vegetazione. Quest'attività permette di ottenere, per ogni punto dell'area di studio, la probabilità di inondazione e la scala integrale del processo di inondazione, necessarie per la calibrazione e validazione di un modello stocastico che, basandosi su considerazioni teoriche, viene applicato in campo per simulare l'evoluzione della vegetazione riparia. La calibrazione ha permesso di determinare i parametri biologici della crescita e del decadimento della vegetazione presente nell'area di studio per comprendere le dinamiche degli ecosistemi ripariali.

Indice

Abstract	3
Elenco delle figure	6
Elenco delle tabelle	8
Elenco delle equazioni.....	8
Introduzione	9
1. Il bacino del torrente Orco	10
1.1 Inquadramento territoriale e idro-morfologico	10
1.2 I principali eventi alluvionali.....	13
1.3 Inquadramento idrologico.....	14
1.3.1 Portate di riferimento	16
1.4 Caratteri generali del paesaggio naturale	17
2. Acquisizione dati	21
2.1 Introduzione LiDAR.....	22
2.2 Acquisizione aerea dati LiDAR	23
2.3 Analisi granulometrica.....	25
2.4 Coefficiente di scabrezza	27
2.5 Attività in campo	28
3. Caratterizzazione della vegetazione a partire dai dati LiDAR.....	30
3.1 Studi in letteratura	31
3.1.1 Definizione del metodo proposto	33
3.2 Identificazione dei singoli alberi a partire dai dati LiDAR.....	35
3.2.1 Prima versione dell'algoritmo: problemi e risoluzione	35
3.2.2 Versione definitiva.....	40
3.2.3 Discussione dei risultati dell'algoritmo applicato alle 12 aree campione	41
3.3 Calcolo della biomassa arborea.....	47
3.3.1 Descrizione curva allometrica	47
3.3.2 Descrizione algoritmo.....	50
3.3.3 Discussione dei risultati del calcolo della biomassa applicato alle 12 aree campione ..	53
4. Modellazione idrodinamica fluviale mediante il software Delft3D	55
4.1 Delft3D Flexible Mesh e impostazioni del modello idrodinamico	55
4.1.1 Introduzione al software Delft3D Flexible Mesh.....	55
4.1.2 Risoluzione equazioni del modello idrodinamico bidimensionale	57
4.1.3 Maglia di calcolo.....	58
4.1.4 Bed Level	59

4.1.5	Condizioni al contorno	59
4.1.6	Trachytape.....	59
4.1.7	Modellazione delle strutture.....	61
4.2	Costruzione del modello idrodinamico del torrente Orco	62
4.3	Validazione del modello numerico.....	71
4.4	Risultati del modello.....	75
5.	Calibrazione modello stocastico.....	78
5.1	Applicazione di un modello stocastico all’ambiente ripariale del T. Orco	78
5.2	Implementazione del modello stocastico	82
5.3	Analisi dei risultati della calibrazione	83
	Conclusioni	88
	Appendici.....	89
	Appendice A	89
	Appendice B.....	90
	Appendice C.....	91
	Ringraziamenti.....	95
	Bibliografia.....	97

Elenco delle figure

FIGURA 1 - INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL TORRENTE ORCO.	10
FIGURA 2 - PRINCIPALI AFFLUENTI DEL TORRENTE ORCO.	11
FIGURA 3 - IDROGRAMMA DELLE PORTATE MEDIE GIORNALIERE PER L'ANNO 2019.	12
FIGURA 4 - SERIE STORICA DEL MASSIMO ANNUO DELLE PORTATE REGISTRATE NELLA STAZIONE PRESSO PONT CANAVESE.	15
FIGURA 5 - SERIE STORICA DEL MASSIMO ANNUO DELLE PORTATE REGISTRATE NELLA STAZIONE PRESSO SAN BENIGNO CANAVESE.	15
FIGURA 6 - IDROGRAMMA DELLE PORTATE MEDIE GIORNALIERE PER GLI ANNI 2018 E 2019.	16
FIGURA 7 - PORTATE SIGNIFICATIVE PER LE SIMULAZIONI IDRODINAMICHE.	17
FIGURA 8 - CARTA FORESTALE DELL'INTERA AREA DI STUDIO DEL TORRENTE ORCO CON RELATIVA LEGENDA RIPRODOTTA CON L'USO DEL SOFTWARE QGIS.	20
FIGURA 9 - SCHEMA DELLA TECNOLOGIA LIDAR (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) COASTAL SERVICES CENTER, 2012) [14].	22
FIGURA 10 - PIANO DI VOLO TRA CUORGNÈ E CHIVASSO.	24
FIGURA 11 - LOCALIZZAZIONE DEI 3 SITI CAMPIONATI: MONTANARO (1), SAN BENIGNO CANAVESE (2) E RIVAROLO CANAVESE (3).	25
FIGURA 12 - MISURAZIONI AREA DI SAGGIO CON LASER TRUPULSE 200.	28
FIGURA 13 - AREE INVESTIGATE DURANTE IL SOPRALLUOGO PRESSO SAN BENIGNO CANAVESE. LE POSIZIONI DELLE AREE CAMPIONE RISPETTO AL SISTEMA DI RIFERIMENTO EPSG:32632 HANNO COORDINATE: AREA1 45°14'38.63"N E 7°48'42.47"E, AREA2 45°14'22.43"N E 7°48'42.81"E, AREA3 45°14'6.23"N E 7°48'43.15"E, RISPETTO AL CENTROIDE DELLE AREE STESSE...	29
FIGURA 14 - A SINISTRA: AREA 1, DETTAGLIO IN CAMPO. A DESTRA: AREA 2, DETTAGLIO IN CAMPO.	29
FIGURA 15 - AREA 3, DETTAGLIO IN CAMPO.	29
FIGURA 16 - SCHEMA SUI METODI RACCOLTI IN LETTERATURA PER L'IDENTIFICAZIONE DEI SINGOLI ALBERI (LATELLA, M. ET AL., 2021) [32].	31
FIGURA 17 - VISTA LATERALE DI CONIFERE (IN ALTO) E ALBERI DECIDUE (IN BASSO) TRATTO DA JEAN-ROMAIN ROUSSEL ET AL., 2017 [46].	33
FIGURA 18 - A) VISTA LATERALE DELLA NUVOLA DI PUNTI CHE COSTITUISCE UN SINGOLO ALBERO; B) RAPPRESENTAZIONE DENSITÀ DI PUNTI: VISTA DALL'ALTO (NEL PIANO Z=0) DELLA NUVOLA DI PUNTI DELL'ALBERO IN FIGURA A). (LATELLA ET AL., 2021) [32].	34
FIGURA 19 - CONFRONTO TRA APPROCCIO MASSIMI LOCALI (IN ALTO) E APPROCCIO DENSITY-BASED (IN BASSO) PER A) POPOLAZIONE DI AGHIFOGIE, B) BOSCO DI LATIFOGIE NEI MESI PRIMAVERILI/ESTIVI (CON FOGLIE), C) BOSCO DI LATIFOGIE NEI MESI AUTUNNALI/INVERNALI (SENZA FOGLIE), CONDIZIONE LEAF-OFF. (LATELLA ET AL., 2021) [32].	34
FIGURA 20 - FLOW CHART PRIMA VERSIONE DELL'ALGORITMO PER L'INDIVIDUAZIONE DEI SINGOLI ALBERI.	35
FIGURA 21 - AREA CAMPIONE PRESSO SAN BENIGNO CANAVESE: IMMAGINE SATELLITARE (GOOGLE MAPS) E IMMAGINE LIDAR. LA POSIZIONE DELL'AREA CAMPIONATA RISPETTO AL SISTEMA DI RIFERIMENTO EPSG:32632 HA COORDINATE, LATITUDINE 45°14'38.63"N E LONGITUDINE 7°48'42.47"E, RISPETTO AL CENTROIDE DELL'AREA STESSA.	36
FIGURA 22 - ESEMPIO 1: VISTA DALL'ALTO DI ALBERI CONTEGGIATI DUE VOLTE.	36
FIGURA 23 - ESEMPIO 2: VISTA DALL'ALTO DI ALBERI CONTEGGIATI DUE VOLTE.	37
FIGURA 24 - ESEMPIO 2: RAPPRESENTAZIONE TRIDIMENSIONALE DI ALBERI CONTEGGIATI DUE VOLTE.	37
FIGURA 25 - ESEMPIO: VISTA DALL'ALTO (SOVRAPPOSIZIONE IMMAGINE LIDAR CON DATI ACQUISITI LIDAR).	37
FIGURA 26 - ESEMPIO: VISUALIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE (SOVRAPPOSIZIONE IMMAGINE LIDAR CON DATI ACQUISITI LIDAR).	38
FIGURA 27 - ESEMPIO: VISUALIZZAZIONE TRIDIMENSIONALE.	38
FIGURA 28 - ESEMPIO: BASSA DENSITÀ DI PUNTI PERTANTO NON VENGONO INDIVIDUATI PUNTI.	38
FIGURA 29 - FLOW CHART DELLA VERSIONE DEFINITIVA DELL'ALGORITMO PER L'INDIVIDUAZIONE DEI SINGOLI ALBERI.	40
FIGURA 30 - VISTA SATELLITARE DELL'AREA DI STUDIO (FONTE GOOGLE EARTH) CON LOCALIZZAZIONE DELLE 12 AREE CAMPIONE: IN ARANCIONE AREE NON REGOLARI, IN GIALLO AREE REGOLARI E IN VERDE AREE MISTE.	42
FIGURA 31 - VISUALIZZAZIONE TRAMITE IL SOFTWARE QGIS DELLA NUVOLA DI PUNTI (IN ROSA) E DEGLI ALBERI INDIVIDUATI DALL'ALGORITMO (IN VERDE) SOVRAPPosti ALL'ORTOFOTO CON LEGENDA.	44
FIGURA 32 - VISUALIZZAZIONE TRAMITE IL SOFTWARE QGIS DEGLI ALBERI EFFETTIVI (IN VERDE) E DEGLI ALBERI INDIVIDUATI DALL'ALGORITMO (IN ARANCIONE) SOVRAPPosti ALL'ORTOFOTO CON LEGENDA.	45
FIGURA 33 - VISUALIZZAZIONE GRAFICA DELLE 12 AREE CAMPIONE A CUI È STATO APPLICATO L'ALGORITMO: I PUNTI ROSSI INDICANO LE POSIZIONI DEI TRONCHI FORNITE COME RISULTATO DA MATLAB; I PUNTI BIANCHI, INVECE, QUELLE MISURATE IN CAMPO (LATELLA ET AL., 2021) [32].	46
FIGURA 34 - CURVE ALLOMETRICHE DELLE SPECIE PIOPIPI E SALICI (CON INTEGRAZIONE DEL DATABASE DEL RIO CINCA), ROBINIE E QUERCE.	48

FIGURA 35 - SCHEMA CLASSIFICAZIONE DELLE LATIFOGIE (INFC, 2003 [52]).....	49
FIGURA 36 - FLOW CHART CALCOLO DELLA DENSITÀ DI BIOMASSA.....	50
FIGURA 37 - CARTA FORESTALE DELL'INTERA AREA DI STUDIO DEL TORRENTE ORCO CON VISUALIZZAZIONE DEI MACRO- RAGGRUPPAMENTI (SPP. INDICA L'ABBREVIAZIONE DI SP. PL. (SPECIES PLURES)) E RELATIVA LEGENDA RIPRODOTTA CON L'USO DEL SOFTWARE QGIS.	51
FIGURA 38 – DETTAGLIO PLOT MATLAB AREA CAMPIONE D11. IN ALTO A SX: DISPOSIZIONE DELLE ALTEZZE DEGLI ALBERI INDIVIDUATI; IN ALTO A DX: DISPOSIZIONE DEI DIAMETRI; IN BASSO A SX: GRAFICO BIOMASSA ARBOREA; IN BASSO A DX: I PUNTI RAPPRESENTANO LA POSIZIONE DEGLI ALBERI INDIVIDUATI SUDDIVISI PER SPECIE.	53
FIGURA 39 - VISUALIZZAZIONE TRAMITE IL SOFTWARE QGIS DELL'OUTPUT GENERATO DALL'ALGORITMO RELATIVO ALL'AREA D11 SOVRAPPOSTO ALL'ORTOFOTO CON LEGENDA.	54
FIGURA 40 - ESEMPIO DI GRIGLIA STRUTTURATA (A) E NON STRUTTURATA (B) [60].....	56
FIGURA 41 - INTERFACCIA DELFT3D-QUICKPLOT.	57
FIGURA 42 - REQUISITO DI ORTOGONALITÀ TRA DUE CELLE TRIANGOLARI ADIACENTI [61].	58
FIGURA 43 - DELFT3D, IMPOSTAZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO NELLA SEZIONE GENERAL.....	62
FIGURA 44 - DELFT3D, IMPOSTAZIONE DEL COEFFICIENTE DI MANNING NELLA SEZIONE PHYSICAL PARAMETERS.....	62
FIGURA 45 - EDITOR RGFGGRID, VISUALIZZAZIONE DELLA MESH RETTANGOLARE RELATIVA AL SOLO CANALE ATTIVO.	63
FIGURA 46 – EDITOR RGFGGRID, DETTAGLIO NELLA SEZIONE DI VALLE DURANTE LA CREAZIONE DEL POLIGONO SPONDA DESTRA OROGRAFICA.	64
FIGURA 47 - EDITOR RGFGGRID, POLIGONO SPONDA DESTRA OROGRAFICA ENTRO IL QUALE SI REALIZZERÀ LA MESH TRIANGOLARE. .	64
FIGURA 48 - EDITOR RGFGGRID, DETTAGLIO NELLA SEZIONE DI VALLE DELLA CREAZIONE DELLA MESH TRIANGOLARE.....	65
FIGURA 49 - EDITOR RGFGGRID, DETTAGLIO DEL TRATTO DI VALLE DELLE MESH UNITE. SI NOTINO LA MESH RETTANGOLARE UNITA A QUELLA TRIANGOLARE.	65
FIGURA 50 - DELFT3D FM, OPERAZIONE DI INTERPOLAZIONE TRA DTM E CELLE DELLA MAGLIA DI CALCOLO.....	66
FIGURA 51 - DELFT3D FM, BED LEVEL INTERPOLATO.	67
FIGURA 52 - FILE .TTD UTILIZZATO PER LA DEFINIZIONE DEI TRACHYTOPES.....	68
FIGURA 53 - ESTRATTO DEL FILE .ARL CONTENENTE LA DISTRIBUZIONE DEI TRACHYTOPES.....	68
FIGURA 54 - INTERFACCIA CONDIZIONE AL CONTORNO DI MONTE (PORTATA).....	70
FIGURA 55 - INTERFACCIA CONDIZIONE AL CONTORNO DI VALLE (INVARIANTE DI RIEMANN).....	70
FIGURA 56 - DATI SU LIVELLI GIORNALIERI E PORTATE GIORNALIERE DEL 13/06/2021, BOLLETTINO IDROLOGICO ARPA PIEMONTE [66].	71
FIGURA 57 - VISUALIZZAZIONE SU QGIS DELL'IMMAGINE SATELLITARE (SENTINEL) CON SOVRAPPOSIZIONE DELLE AREE ALLAGATE (IN BLU) RESTITUITE DALLA SIMULAZIONE IDRODINAMICA DI PORTATA 16,7 m ³ /s.	72
FIGURA 58 – AREA BAGNATA RESTITUITA DALLA SIMULAZIONE IDRODINAMICA (IN AZZURRO) PER UNA PORTATA PARI A 16,7 m ³ /s E SELEZIONE DI 25 VALORI CASUALI (PUNTI IN ROSSO) PER OTTENERE LA MEDIA DEI LIVELLI NEI PRESSI DI SAN BENIGNO.	73
FIGURA 59 – VISUALIZZAZIONE AREE ALLAGATE CON PORTATA SIMULATA DI 1800 mc/s.	75
FIGURA 60 - VISUALIZZAZIONE AREE ALLAGATE CON PORTATA SIMULATA DI 1496 mc/s.	76
FIGURA 61 – VISUALIZZAZIONE AREE ALLAGATE CON PORTATA SIMULATA DI 99 mc/s.	77
FIGURA 62 - SCHEMATIZZAZIONE DI UN GENERICO TRANSETTO RIPARIALE CON INDICAZIONE DELLE VARIABILI UTILIZZATE [72].	79
FIGURA 63 – COME SI DISTRIBUISCE LA VEGETAZIONE IN FUNZIONE DEL FATTORE DI DECADIMENTO AL VARIARE DELLE FASCE DI PROBABILITÀ DI INONDAZIONE. IL COLORE ROSSO RAPPRESENTA LE SALICACEE, IL BLU LA SPECIE DELLE ROBINIE E L'AZZURRO LE QUERCE.	83
FIGURA 64 - COME SI DISTRIBUISCE LA VEGETAZIONE IN FUNZIONE DI B) TASSO DI DECADIMENTO; C) CAPACITÀ DI CARICO, AL VARIARE DELLE FASCE DI PROBABILITÀ DI INONDAZIONE. IL COLORE ROSSO RAPPRESENTA LE SALICACEE, IL BLU LA SPECIE DELLE ROBINIE E L'AZZURRO LE QUERCE.	84
FIGURA 65 - CONFRONTO DI DENSITÀ DI PROBABILITÀ DI FREQUENZA TRA LA RAPPRESENTAZIONE REALE PER SALICACEE.	85
FIGURA 66 - CONFRONTO DI DENSITÀ DI PROBABILITÀ DI FREQUENZA TRA LA RAPPRESENTAZIONE REALE PER ROBINIE.	86
FIGURA 67 - CONFRONTO DI DENSITÀ DI PROBABILITÀ DI FREQUENZA TRA LA RAPPRESENTAZIONE REALE PER QUERCUS.....	87
FIGURA 68 - DATI SU LIVELLI GIORNALIERI E PORTATE GIORNALIERE DEL 23/06/2020, BOLLETTINO IDROLOGICO ARPA PIEMONTE [77].	91
FIGURA 69 - AREA BAGNATA RESTITUITA DALLA SIMULAZIONE IDRODINAMICA (IN ROSA) PER UNA PORTATA PARI A 27,9 mc/s E SELEZIONE DI 25 VALORI CASUALI (PUNTI IN ROSSO) PER OTTENERE LA MEDIA DEI LIVELLI NEI PRESSI DI SAN BENIGNO.	91
FIGURA 70 - DATI SU LIVELLI GIORNALIERI E PORTATE GIORNALIERE DEL 06/04/2020, BOLLETTINO IDROLOGICO ARPA PIEMONTE [78].	93

FIGURA 71 - AREA BAGNATA RESTITUITA DALLA SIMULAZIONE IDRODINAMICA (IN BLU) PER UNA PORTATA PARI A 6,43 MC/S E SELEZIONE DI 25 VALORI CASUALI (PUNTI IN ROSSO) PER OTTENERE LA MEDIA DEI LIVELLI NEI PRESSI DI SAN BENIGNO. 93

Elenco delle tabelle

TABELLA 1 - DATI AGGREGATI DI PORTATE GIORNALIERE E MENSILI REPERIBILI DALLA BANCA DATI IDROLOGICA DI ARPA PIEMONTE. .	12
TABELLA 2 – EVENTI ALLUVIONALI CHE HANNO INTERESSATO IL TORRENTE ORCO FINO ALL'ANNO 2000 (DATI REPERITI DALL'AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DEL FIUME Po) [7].	14
TABELLA 3 - PORTATE AL COLMO NELL'AMBITO DEL PAI.	14
TABELLA 4 - SPECIE ARBOREE PRESENTI NELLA PROVINCIA DI TORINO (INFORMAZIONI REPERITE DA REGIONE PIEMONTE, EDIZIONE 2016); IN VERDE LE SPECIE NELL'AREA STUDIO DEL TORRENTE ORCO.	19
TABELLA 5 - SPECIE ARBOREE PRESENTI NELL'AREA STUDIO DEL TORRENTE ORCO.	20
TABELLA 6 - FORMULE TEORICHE PER IL CALCOLO DEL COEFFICIENTE DI MANNING, N.	27
TABELLA 7 – PRINCIPALI CRITICITÀ RISCONTRATE NELLA PRIMA VERSIONE DELL'ALGORITMO E RELATIVE SOLUZIONI PROPOSTE.	39
TABELLA 8 - CARATTERISTICHE PRINCIPALI DELLE 12 AREE CAMPIONE.	43
TABELLA 9 – CONFRONTO NUMERO EFFETTIVO DI ALBERI CON QUELLO FORNITO DALL'ALGORITMO.	43
TABELLA 10 - PARAMETRI ALLOMETRICI SUDDIVISI PER TIPOLOGIA DI SPECIE ARBOREA E GWD (MILES AND SMITH, 2009 [50]).	48
TABELLA 11 - PARAMETRI ALLOMETRICI SUDDIVISI PER TIPOLOGIA DI SPECIE ARBOREA UTILIZZATI NEL CALCOLO DELLA DENSITÀ DI BIOMASSA.	50
TABELLA 12 - STUDI REPERITI IN LETTERATURA SULLE PERCENTUALI DI FOGLIAME IN BASE AL TIPO DI LEGNO.	52
TABELLA 13 – DENSITÀ DI BIOMASSA CALCOLATA PER OGNI AREA CAMPIONE.	53
TABELLA 14 – GREEN WOOD DENSITY CALIBRATA.	54
TABELLA 15 - RIEPILOGO PORTATE SIMULATE NEL MODELLO IDRAULICO.	69
TABELLA 16 – COORDINATE SPAZIALI E LIVELLO IDRICO ASSOCIATO AD OGNI PUNTO INDIVIDUATO IN MANIERA RANDOM.	74
TABELLA 17 – TABELLA DI SINTESI SULLA VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO.	74
TABELLA 18 - SERIE STORICA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA PER LA STAZIONE PRESSO PONT CANAVESE. IN ROSSO VENGONO EVIDENZIATE DUE PORTATE CHE CORRISPONDONO AD EVENTI STRAORDINARI.	90
TABELLA 19 - SERIE STORICA DELLE PORTATE AL COLMO DI PIENA PER LA STAZIONE PRESSO SAN BENIGNO CANAVESE.	90
TABELLA 20 - COORDINATE SPAZIALI E LIVELLO IDRICO ASSOCIATO AD OGNI PUNTO INDIVIDUATO IN MANIERA CASUALE.	92
TABELLA 21 - COORDINATE SPAZIALI E LIVELLO IDRICO ASSOCIATO AD OGNI PUNTO INDIVIDUATO IN MANIERA CASUALE.	94

Elenco delle equazioni

EQUAZIONE 1 - EQUAZIONE PER IL CALCOLO DELLA SCABREZZA IDRAULICA.	60
EQUAZIONE 2 - PROCESSO DICOTOMICO.	79
EQUAZIONE 3 – ESPRESSIONE ANALITICA DEL TASSO DI DECADIMENTO α_1 .	80
EQUAZIONE 4 – EQUAZIONE DELLA CARRYING CAPACITY.	80
EQUAZIONE 5 – ESPRESSIONE ANALITICA DELLA CARRYING CAPACITY.	80
EQUAZIONE 6 – FATTORE DI DECADIMENTO NORMALIZZATO.	81
EQUAZIONE 7 – PROCESSO DICOTOMICO NORMALIZZATO.	81
EQUAZIONE 8 – EQUAZIONE STOCASTICA.	81
EQUAZIONE 9 – FUNZIONE DI DENSITÀ DI PROBABILITÀ.	82

Introduzione

Il seguente lavoro ha come obiettivo quello di calibrare e validare un modello che, basandosi su considerazioni teoriche, viene applicato in campo per creare previsioni, in particolare previsioni biomorfologiche.

È suddiviso in quattro sezioni: la prima sezione, comprensiva dei primi due capitoli, descrive l'inquadramento generale dell'area del torrente Orco per un tratto tra Cuorgnè e quasi la confluenza nel Po, per una lunghezza di circa 30 km, da un punto di vista geografico, forestale ed idrologico.

La seconda parte riguarda la caratterizzazione della vegetazione. Il primo obiettivo è quello di individuare i singoli alberi a partire da dati di *Remote Sensing* che permettono di ricostruire, in tre dimensioni, le aree vegetate, con il supporto di campagne di misura, dati forestali, rilievi topografici e geologici. Dall'unione di tutte queste informazioni, si ricava la posizione spaziale, l'altezza e la relativa biomassa di ciascun elemento arboreo. Il seguente studio nasce proprio dall'esigenza di voler individuare quegli alberi che presentano chiome globose e tondeggianti spesso le une fuse nelle altre, tipiche delle zone ripariali, poco distinguibili con i tradizionali metodi utilizzati per le conifere.

La terza sezione del lavoro di tesi è incentrata sulla realizzazione di un modello idraulico bidimensionale in grado di simulare il comportamento del flusso idrico del torrente Orco in condizioni di moto stazionario per diverse portate di riferimento per ottenere le aree inondate e i livelli idrici modellati.

Nella quarta ed ultima sezione, si studia, dal punto di vista teorico, il funzionamento di un modello stocastico di crescita della vegetazione ripariale e lo si calibra sulla base dei dati ottenuti tramite caratterizzazione vegetazione da Remote Sensing e modellazione idrodinamica bidimensionale. Il modello calibrato diventa uno strumento per prevedere la risposta della vegetazione riparia a variazioni di flussi idrici.

1. Il bacino del torrente Orco

Il torrente Orco scorre sul versante meridionale del massiccio del Gran Paradiso. Il bacino idrografico del torrente in esame è caratterizzato da principalmente due ambienti geograficamente e morfologicamente molto diversi fra loro: il torrente percorre, inizialmente, il fondovalle montano per circa 50 km, con alveo inciso tra pareti rocciose mentre successivamente percorre un ambiente pianeggiante che si sviluppa nell'altopiano canavesano per circa 40 km, fino alla confluenza nel Po in prossimità di Chivasso. In funzione del settore che si considera, non solo cambia l'ambiente geografico e morfologico (montano o pianeggiante) ma variano anche le condizioni climatiche, i regimi termopluviometrici e si sono inoltre verificati fenomeni ed effetti differenti (Lollino et al., 2005) [1].

La vegetazione del bacino dell'Orco è caratterizzata, nelle parti basse dei versanti, da cedui di castagno molto estesi mentre lungo i fianchi e le testate delle valli ci si imbatte in lariceti misti a faggio. La specie arborea prevalente è quella delle robinie che si alterna alla presenza di saliceti e pioppeti e quercocarpineti, tipici dei siti ripariali. La Regione Piemonte ha redatto una Carta Forestale (Edizione 2016) che è stata fondamentale per comprendere la disposizione spaziale delle diverse specie che abitano l'ambiente ripariale in esame.

L'idrogramma medio annuo del torrente Orco si presenta con una portata pressochè costante pari a circa 28 m³/s con elevati picchi di portata variabili da 350 m³/s a 1600 m³/s circa, nei mesi di maggio/giugno e ottobre/novembre che indicano, sostanzialmente, fenomeni alluvionali. L'ultimo evento di piena verificatosi è quello dell'anno 2000 ad ottobre, in cui la piena di portata massima al colmo registrata a Pont Canavese pari a 1650 m³/s, ha causato erosioni e scalzamenti importanti in prossimità delle spalle dei ponti.

L'analisi idrologica ha permesso di selezionare, attraverso il metodo statistico dei percentili, i valori delle portate oggetto di successiva modellazione idrodinamica bidimensionale trattata nel *paragrafo 1.3.1*.

1.1 Inquadramento territoriale e idro-morfologico

Il torrente Orco scorre sul versante meridionale del massiccio del Gran Paradiso, ha origine dalle pendici delle Punte Leynir e Rossett (oltre 3000 m s.l.m.) e percorre il fondovalle montano per circa 50 km, con alveo inciso tra pareti rocciose [2]. Successivamente il percorso si sviluppa nell'altopiano canavesano per circa 40 km, fino alla confluenza nel Po in prossimità di Chivasso.



Figura 1 - Inquadramento territoriale del torrente Orco.



Figura 2 - Principali affluenti del torrente Orco.

Il bacino idrografico dell'Orco ha una superficie complessiva di circa 910 km² e si distinguono due ambiti geografici: il 78% in ambito montano (chiuso all'altezza del comune di Cuorgnè, poco più a valle della confluenza in Orco del torrente Soana, l'affluente principale) e il 22% in pianura [2]. In quest'ultimo ambito, nella regione fluviale del tratto compreso tra Cuorgnè e la confluenza in Po a Chivasso, il carattere del corso d'acqua è fortemente torrentizio, connotato da pericolose piene autunnali e primaverili e da un alveo poco inciso rispetto ai territori circostanti. Il corso d'acqua principale, nella parte montana (dalla testa fino a Cuorgnè), può essere considerato in uno stadio di sviluppo giovanile, ovvero caratterizzato da forti pendenze, accentuati fenomeni erosivi e frequenti aree di alluvionamento e sovralluvionamento (Audisio, 2002) [3].

Il torrente a valle del centro abitato di Pont Canavese cambia radicalmente il suo assetto, abbandonando le caratteristiche tipiche del torrente alpino, con alveo di larghezza ridotta e pendenza irregolare (a tratti elevata), per assumere quelle proprie di un corso d'acqua di pianura e l'alveo, non più vincolato dalla presenza dei fianchi vallivi, si allarga molto. La larghezza massima storica registrata nel 1881 e 1954 è di circa 800 metri. L'aumento dell'antropizzazione, dovuto al boom economico degli anni '50, e il contemporaneo abbassamento del fondo alveo di circa 1-2 metri in media (massimo 3-4 metri in alcune zone) per estrazione di inerti sia in alveo che nelle aree laterali, ha portato alla condizione fluviale attuale. Sono pertanto presenti diversi rami secondari che si attivano in occasione degli eventi di morbida (causati da piogge o scioglimento di nevi e ghiacciai entro il livello di guardia) o di piena (eventi eccezionali che possono causare danni), oltre al ramo principale dove, salvo interventi antropici, scorre l'acqua in regime di magra (causato dalle scarse precipitazioni atmosferiche) [4].

La configurazione e la distribuzione caratteristica delle acque viene descritta porzione per porzione partendo da Cuorgnè, a monte, fino a Chivasso, a valle, con un tratto intermedio Rivarolo Canavese – San Benigno Canavese [5].

Nel tratto Cuorgnè – Rivarolo Canavese l'alveotipo è sinuoso, a tratti sub-rettilineo, con presenza diffusa di barre longitudinali e laterali, estremamente irregolare, con larghezza continuamente variabile.

Nel tratto intermedio l'alveotipo è sinuoso, con caratteri pluricursali e presenza di rami secondari, separati da quello principale da isole stabili parzialmente vegetate. Si rilevano abbassamenti generalizzati del fondo alveo, maggiormente evidenti in prossimità dei ponti di San Benigno Canavese

– Foglizzo e dell'autostrada A5. Le sponde sono interessate da fenomeni erosivi continui, sia in destra che in sinistra, localmente molto intensi. Le opere di difesa spondale, costituite generalmente da massi e pietrame, risultano dissestate a tratti, come pure le opere di stabilizzazione del fondo, in prossimità dei ponti stradali di Feletto e di San Benigno Canavese e autostradale di Foglizzo, anch'esse in massi e pietrame.

Nel tratto San Benigno Canavese – confluenza con il Po presso Chivasso, l'alveo è sinuoso, a tratti meandriforme, con larghezza variabile; abbassamenti del fondo sono particolarmente evidenti in prossimità del ponte autostradale di Chivasso.

Il complesso delle variazioni della portata durante l'anno, conducono a definire l'Orco un corso d'acqua a regime torrentizio. Nonostante sia caratterizzato da portate perenni e copiose, la sua portata non è regolare al variare delle stagioni anzi, presenta una portata irregolare in cui si alternano piene improvvise, nel periodo tardo primaverile e autunnale causando danni (in *tabella 2* vi sono riassunti i principali eventi di piena storici), a magre durante il periodo estivo. I dati giornalieri e mensili delle portate, nonché la durata e la scala numerica delle portate, sono disponibili e consultabili grazie alla Banca dati Idrologica dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA) del Piemonte [6] per le stazioni e per gli anni riportati in *tabella 1*.

STAZIONI	DATI DISPONIBILI PER GLI ANNI:
Cuornè	2004 - 2008
San Benigno Canavese	2002 - 2019
Spineto	2010 - 2019

Tabella 1 - Dati aggregati di portate giornaliere e mensili reperibili dalla Banca dati Idrologica di Arpa Piemonte.

In *figura 3* è possibile visualizzare la variazione della portata del torrente Orco presso la stazione di misura a San Benigno Canavese nell'anno 2019, le cui portate giornaliere sono state reperite dalla Banca dati Idrologica di ARPA Piemonte [6].

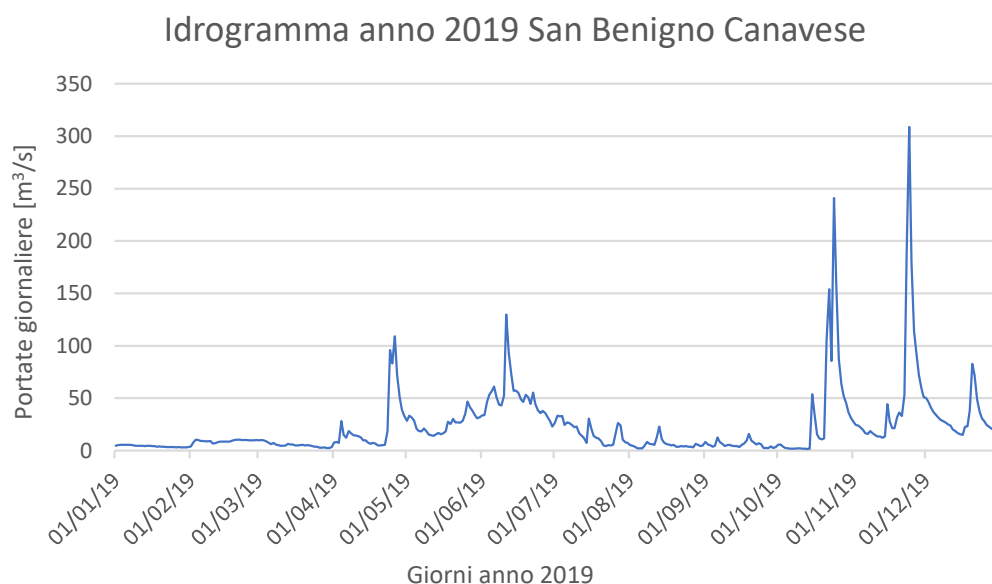


Figura 3 - Idrogramma delle portate medie giornaliere per l'anno 2019.

In *figura 3*, i picchi dell'idrogramma annuo rappresentano proprio gli eventi di piena verificatisi nei mesi maggio/giugno e nei mesi autunnali mentre, per il resto dell'anno, la portata media del torrente Orco è di circa 28 m³/s.

1.2 I principali eventi alluvionali

L'analisi e l'interpretazione dei dati storici, in particolare gli eventi a luglio 1654 (soprattutto per la Val Soana), 5-6 ottobre 1845, 23-24 agosto 1900 e al 9-10 ottobre 1907, hanno permesso di ricavare informazioni importanti su frequenza e intensità degli eventi stessi e quale tipo di conseguenze portassero tali fenomeni (Lollino et al., 2005) [1]. Lo stesso articolo da cui sono stati citati i precedenti dati storici, mette in evidenza come, in funzione del tipo di conformazione territoriale che il torrente percorre, i danni a seguito di eventi alluvionali sono stati diversi ma tante lesioni sono anche dovute all'aumento del grado di antropizzazione che ha portato a edificare, coltivare o invadere in spazi storicamente occupati da zone di pertinenza fluviale. Nel tratto montano i maggiori danni sono stati causati da colate detritiche (*debris flow* e *mudflow*) ed erosioni spondali principalmente; nel tratto pianeggiante, invece, danni ed erosioni alle difese spondali di sinistra e allagamenti diffusi. L'85% dei danni e delle esondazioni si sono verificati proprio sulla sponda orografica sinistra del torrente Orco perché si è notato come la sinistra idrografica sia ad una quota media inferiore rispetto alla sponda destra e pertanto l'acqua ha trovato facilmente una direzione preferenziale di esondazione.

I principali eventi eccezionali a carattere alluvionale verificatisi dal 1957 al 2000 sono riassunti nella seguente *tabella 2* [7]:

ANNO DELLA PIENA	AREE COINVOLTE	CARATTERISTICHE EVENTO	DATI
Giugno 1957	-	Evento meteorico intenso a carattere alluvionale; estensione territoriale e danni di grande entità	Altezza massima di precipitazione in 24 ore a Ceresole Reale: 94,4mm
Luglio 1973	Straripamento a Pont Canavese	Piena torrente Orco	-
Agosto 1978	Valle del Soana	Precipitazioni di breve durata ma di elevata intensità	-
Settembre 1993	Intera asta del torrente Orco e del Soana, il suo affluente principale	Piena straordinaria molto gravosa; riattivazione di canali secondari abbandonati da tempo dal corso d'acqua; notevole trasporto solido, erosioni, scalzamenti al piede e ribaltamenti delle pile di sostegno di ponti, collassi, dissesti e sopralluvionamento tratti vallivi hanno generato gravi danni	Portata massima al colmo: a Ceresole 220 m ³ /s, a Spineto 1600 m ³ /s, a San Benigno Canavese 1550 m ³ /s
Novembre 1994	-	Piena torrente Orco simile a quella del 1993 ma meno gravosa; allagamenti e dissesti del fondovalle	-

Ottobre 2000	Intera asta del torrente Orco e del Soana	Piena molto gravosa; erosioni e scalzamenti delle spalle dei ponti e dei rilevati stradali di accesso, sovralluvionamenti	Portata massima al colmo a Pont Canavese 1650 m ³ /s
--------------	---	---	---

Tabella 2 – Eventi alluvionali che hanno interessato il torrente Orco fino all'anno 2000 (dati reperiti dall'Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po) [7].

Ad ottobre 2020 si sono verificate abbondanti precipitazioni nel cuneese, nel verbano e nel torinese ma l'evento per il torrente Orco ha registrato colmi contenuti.

1.3 Inquadramento idrologico

L'analisi idrologica consiste nello studio delle portate fino ad oggi misurate, consultabili dalla Banca dati idrologica di ARPA Piemonte [8] e dall'Open data di idrologia del Politecnico di Torino [9].

In riferimento al bacino del torrente Orco, il Piano di stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) fornisce i valori delle portate di progetto ai tempi di ritorno riportati in *tabella 3* [10]:

CORSO D'ACQUA	SEZIONE	SUPERFICIE [m ²]	Q20 [m ³ /s]	Q100 [m ³ /s]	Q200 [m ³ /s]	Q500 [m ³ /s]
Orco	Cuornè	634	1160	1900	2280	2850
Orco	Confluenza Po	930	1300	2020	2370	2870

Tabella 3 - Portate al colmo nell'ambito del PAI.

Tramite il sito dell'Open data di idrologia del Politecnico di Torino [9] si accede al Catalogo delle Piene del Piemonte e in particolare al Catalogo delle Portate Massime Annuali al colmo del bacino Occidentale del Po per reperire le informazioni d'interesse sulle portate. I dati disponibili riguardano le portate al colmo di piena e le portate giornaliere nelle sezioni di Pont Canavese e San Benigno Canavese solo per determinati anni:

- Pont Canavese
 - Q_{colmo}: 1928-1943, 1945-1971, 1974-1977, 1993, 2000;
 - Q_{giornaliere}: 1928-1943, 1948-1976;
- San Benigno Canavese
 - Q_{colmo}: 2000-2016;
 - Q_{giornaliere}: 2003-2010.

In seguito, in *figura 4* e in *figura 5*, si visualizzano gli andamenti delle serie storiche dei massimi annui delle portate registrate nelle stazioni di Pont Canavese e San Benigno i cui valori delle portate associate al rispettivo anno vengono riportati in forma tabellare per completezza in *Appendice A* e *Appendice B* rispettivamente.

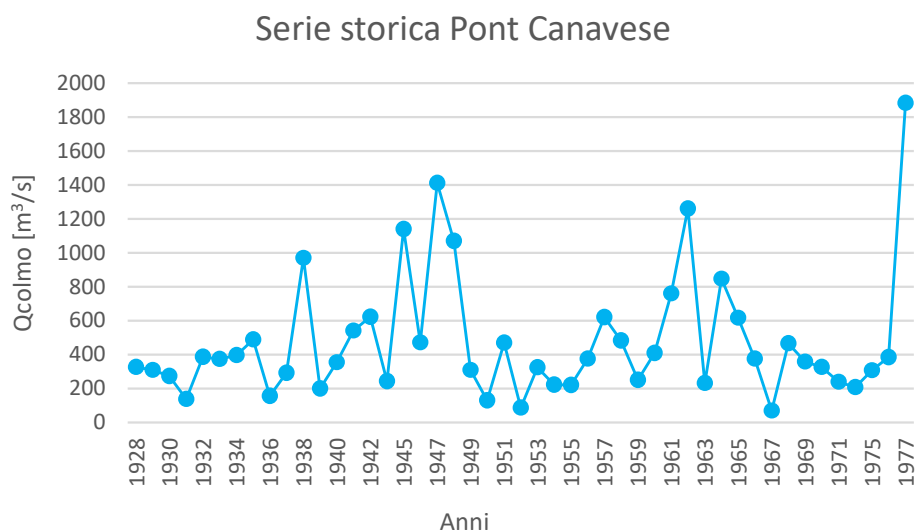


Figura 4 - Serie storica del massimo annuo delle portate registrate nella stazione presso Pont Canavese.

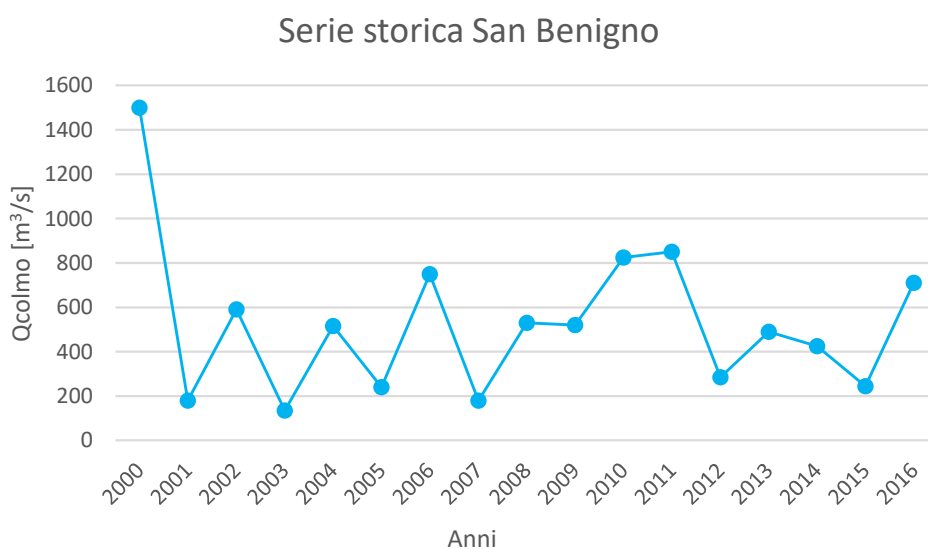


Figura 5 - Serie storica del massimo annuo delle portate registrate nella stazione presso San Benigno Canavese.

1.3.1 Portate di riferimento

A partire dall'idrogramma del torrente Orco degli anni 2018 e 2019 nella sezione di San Benigno Canavese in *figura 6*, si è scelto di selezionare 20 portate, successivamente oggetto di simulazione idrodinamica bidimensionale tramite il software Delft3D Flexible Mesh (riferimento al *Capitolo 4*).

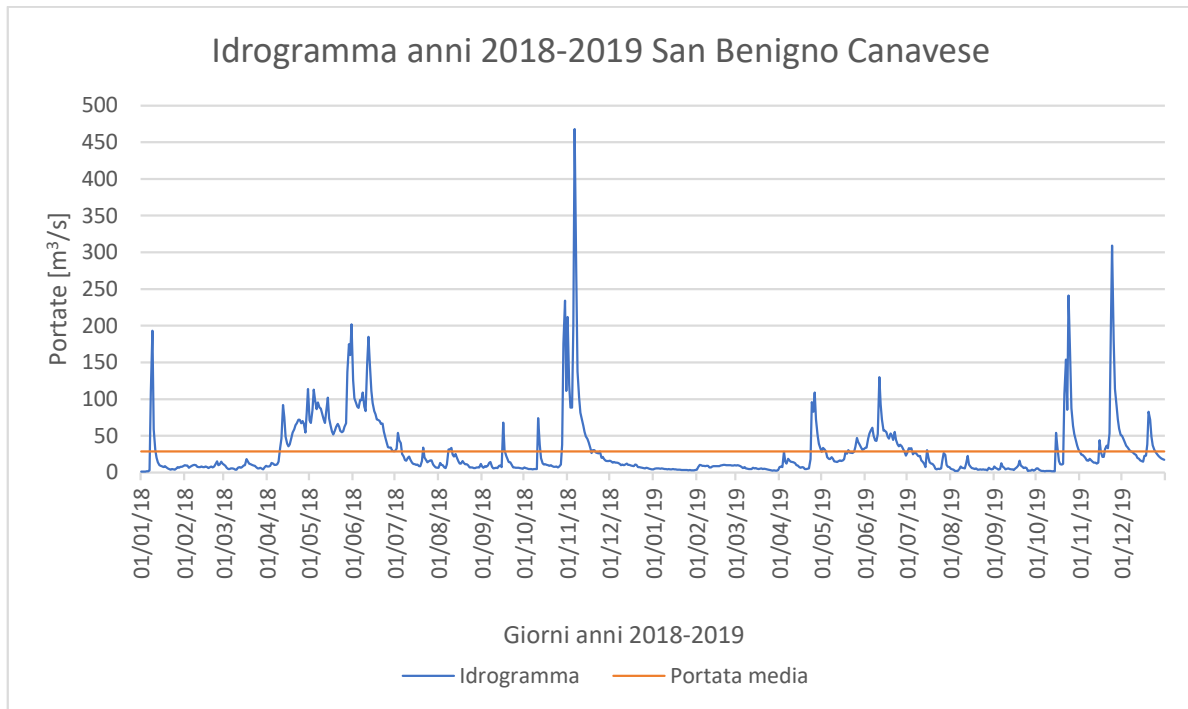


Figura 6 - Idrogramma delle portate medie giornaliere per gli anni 2018 e 2019.

La linea orizzontale, presente in *figura 6*, corrisponde alla portata media biennale ed è di circa 28 m³/s.

Per tenere conto della variabilità delle portate che contraddistingue l'idraulica fluviale, si è scelto di selezionare le portate a partire dai percentili relativi alle portate in *figura 6*. Il percentile è una misura statistica che esprime la variabilità del singolo valore rispetto all'intera popolazione di dati presa di riferimento: indica il valore al di sotto del quale si verifica una certa percentuale di osservazione. Per esempio, il 50° percentile è il valore al di sotto del quale si trova il 50% delle osservazioni. Considerando un insieme campione di n dati, ordinati in maniera crescente, l'indice del k-esimo percentile è dato da [11]:

$$I_k = \left[0.5 + \left(\frac{n * k}{100} \right) \right]$$

Nel caso in esame, n = 730 che corrispondono ai valori di portata di 365 giorni per due anni (2018 e 2019) e k sono i percentili dal 5% al 95% con passo 5%.

Il risultato di questo studio è riportato in *figura 7*:

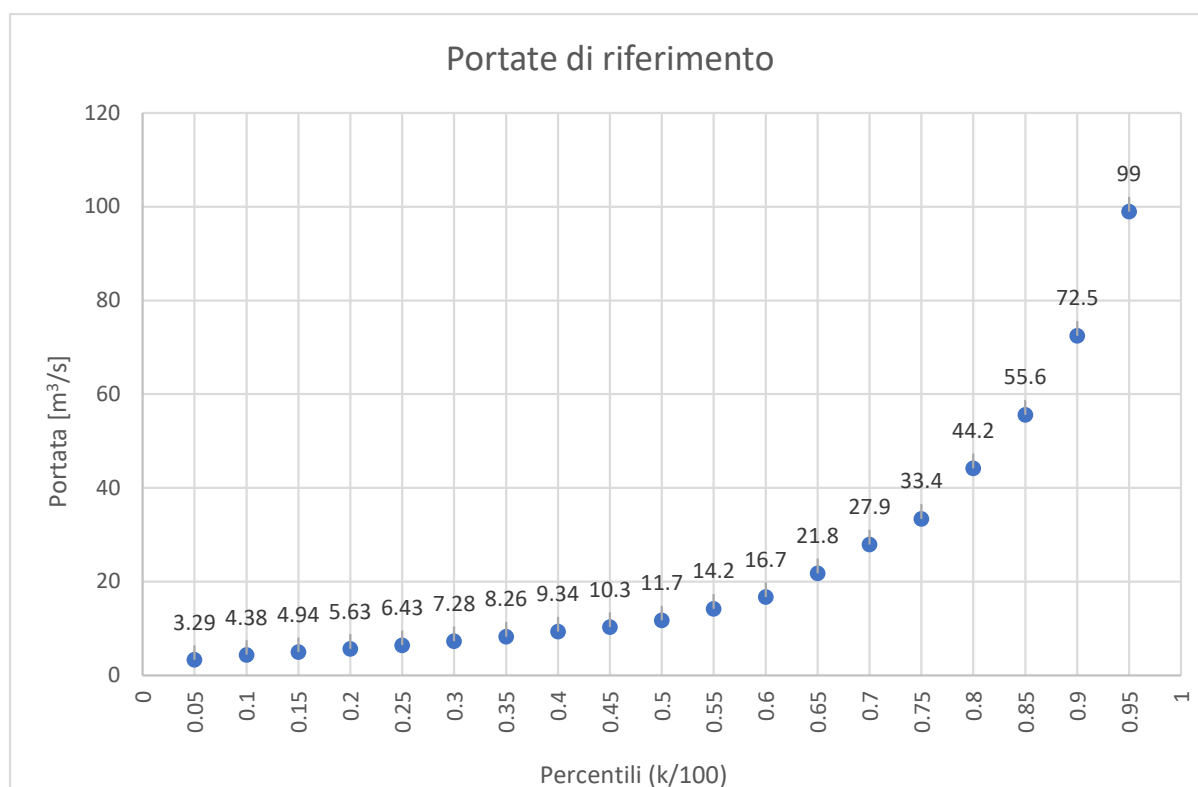


Figura 7 - Portate significative per le simulazioni idrodinamiche.

Ai 19 dati in *figura 7*, è stata aggiunta anche la portata con tempo di ritorno un anno pari a 221 m³/s per un totale di 20 portate che si utilizzeranno nelle simulazioni idrodinamiche bidimensionali.

1.4 Caratteri generali del paesaggio naturale

La vegetazione del bacino dell'Orco è caratterizzata, nelle parti basse dei versanti, da cedui di castagno molto estesi mentre lariceti, anche misti a faggio, interessano i fianchi e le testate delle valli.

La Regione Piemonte ha redatto una Carta Forestale (Edizione 2016) la cui consultazione, estrazione e riproduzione dei dati è autorizzata dalla stessa Regione Piemonte. In *tabella 4* vengono elencate le specie arboree, nella sezione "categoria", e le relative sottospecie, nella sezione "tipologia", reperite dalla Carta Forestale della provincia di Torino.

CATEGORIA FORESTALE	TIPOLOGIA	PREVALENZA GEOGRAFICA SUL TERRITORIO
Abetine	Abetina endalpica	0,75%
	Abetina eutrofica	
	Abetina mesotrofica mesalpica	
	Abetina oligotrofica mesalpica	
Acero-tiglio-frassineti	Acero-tiglio-frassineto d'invasione	9,54%
	Acero-tiglio-frassineto di forra	

Alneti planiziali e montani	Alneto di ontano bianco	Diffusione planiziale e montana. Rappresentano il 2,19% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Alneto di ontano nero	
	Alneto di ontano verde	
Arbusteti planiziali collinari e montani	Arbusteto montano xerofilo di Prunus sp.pl/Berberis vulgaris	1,07%
	Arbusteto mesoxerofilo di Prunus spinosa e Cornus sanguinea	
	Ginepreto di Juniperus communis	
	Arbusteto rupestre di Amelanchier ovalis	
Arbusteti subalpini	Alneto di ontano verde	3,5%
Boscaglie pioniere e d'invasione	Betuleto montano	8,55%
	Corileto d'invasione	
	Boscaglie d'invasione	
	Boscaglia rupestre pioniera	
	Pioppeto d'invasione a pioppo tremolo	
	Betuleto planiziale di brughiera	
	Saliceto paludoso di Salix cinerea	
Castagneti	Castagneto mesoneutrofilo a Salvia glutinosa delle Alpi	Diffusione in Val Susa, Pinerolese, Canavese e Valli di Lanzo. Rappresentano il 12,05% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Castagneto acidofilo a Teucrium scorodonia delle Alpi	
	Castagneto da frutto	
	Castagneto neutrofilo dell'Appennino e dei rilievi collinari interni	
	Castagneto acidofilo a Physospermum cornubiense dell'Appennino e dei rilievi collinari interni	
Cerrete	Cerreta acidofila	0,1%
	Cerreta mesofila	
Faggete	Faggeta mesotrofica	Popolano i versanti meno esposti dei rilievi alpini. Rappresentano il 6,34% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Faggeta oligotrofica	
	Faggeta mesoxerofila	
	Faggeta eutrofica delle Alpi	
Lariceti e cembrete	Larici-cembreto su rodoreto-vaccinieto	Diffusione nel paesaggio subalpino. Rappresentano il 15,91% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Lariceto dei campi di massi	
	Lariceto mesoxerofilo subalpino	
	Lariceto pascolivo	
	Lariceto montano	
	Lariceto a megaforbie	
	Lariceto di greto	
Peccete	Pecceta subalpina	0,21%
	Pecceta montana mesalpica	
	Pecceta montana endalpica	
	Pineta di pino uncinato eretto	0,34%

Pinete di pino montano	Pineta di pino montano prostrato	
Pinete di pino silvestre	Pineta mesalpica acidofila di pino silvestre	1,8%
	Pineta endalpica basifila di pino silvestre	
Querceti di rovere	Querceto di rovere a Teucrium scorodonia	Diffusione sui bassi versanti e si trovano a contatto con castagneti. Rappresentano il 3,2% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Querceto di rovere a Potentilla alba	
	Querceto-tiglieto	
	Querceto di rovere a Physospermum cornubiense dei rilievi collinari interni	
	Querceto di rovere/roverella con orniello ed Erica cinerea	
Querceti di roverella	Querceto xero-acidofilo di roverella delle Alpi	1,48%
	Querceto mesoxerofilo di roverella delle Alpi	
	Orno-querceto di roverella	
	Querceto mesoxerofilo di roverella dei rilievi collinari interni e dell'Appennino	
Querco-carpineti	Querco-carpineto della bassa pianura	Ampia diffusione: collinare, pianiziale, rilievi alpini e fondovalle. Rappresentano il 6,54% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
	Querco-carpineto d'alta pianura ad elevate precipitazioni	
	Querceto misto d'impluvio dei rilievi collinari interni	
	Querco-carpineto d'alta pianura a basse precipitazioni	
	Querco-carpineto mesoxerofilo del Monferrato e/o Colline del Po	
Rimboschimenti	Rimboschimento dei piani pianiziale e collinare	3,33%
	Rimboschimento del piano montano	
	Rimboschimento del piano subalpino	
Robinieti	Robinieto	Specie di pianura e collina diffusa lungo i rilievi interni della fascia pedemontana. Rappresentano il 17,65% della vegetazione presente nella provincia di Torino.
Saliceti e pioppeti ripari	Saliceto arbustivo ripario	Popolano le sponde dei corsi d'acqua. Rappresentano il 5,44% della vegetazione presente nella provincia di Torino
	Saliceto di salice bianco	
	Saliceto paludoso di Salix cinerea	
	Pioppeto d'invasione a pioppo tremolo	
	Pioppeto di pioppo bianco	
	Pioppeto di pioppo nero	

Tabella 4 - Specie arboree presenti nella provincia di Torino (informazioni reperite da Regione Piemonte, Edizione 2016); in verde le specie nell'area studio del torrente Orco.

In *tabella 4* sono inoltre evidenziate le specie arboree presenti all'interno dell'area studio del torrente Orco e in particolare, non si farà una distinzione per sottospecie ma si farà solamente riferimento alle categorie forestali, come si vedrà nel *sottocapitolo 3.3* riguardante il calcolo della densità di biomassa, sarà sufficiente riconoscere la specie arborea.

In *figura 8* si può osservare parte del contenuto della Carta Forestale della provincia di Torino in quanto è stata selezionata la sola area studio di interesse del torrente Orco. Per completezza sono stati aggiunti i centri urbani principali.

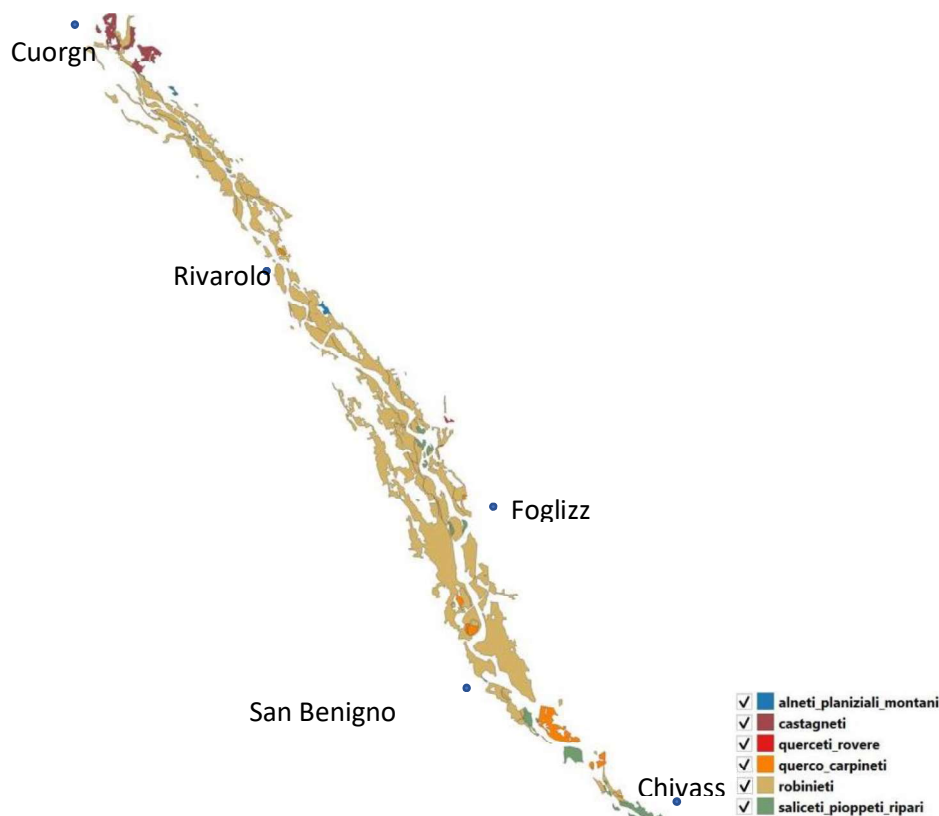


Figura 8 - Carta Forestale dell'intera area di studio del torrente Orco con relativa legenda riprodotta con l'uso del software QGIS.

La Carta Forestale in *figura 8* illustra la disposizione delle diverse specie arboree: da una prima osservazione si evince come la specie prevalente nell'area di studio sia data dalla robinia pseudoacacia.

Nella *tabella 5* sottostante sono state calcolate le percentuali di ogni singola specie appartenenti alla zona di interesse e, infatti, i robinieti rappresentano circa il 74%. Una buona percentuale di vegetazione è inoltre data da saliceti e pioppeti ripari (circa 14%) e querceto-carpineti (circa 7%).

CATEGORIA	PREVALENZA SUL TERRITORIO
Alneti planiziali	1,26 %
Castagneti	3,77 %
Querceti di rovere	0,6 %
Querceto-carpineti	6,92 %
Robinieti	73,58 %
Saliceti e pioppeti ripari	13,84 %

Tabella 5 - Specie arboree presenti nell'area studio del torrente Orco.

2. Acquisizione dati

Prima di iniziare il vero e proprio progetto di tesi, è stato necessario raccogliere i dati.

Il CNR IRPI ha eseguito a febbraio 2019, un rilevamento LiDAR/fotogrammetrico aerotrasportato del tratto del torrente Orco compreso tra Cuorgnè e la confluenza con il Po a Chivasso. Il LiDAR (Light Detection and Ranging) è un sistema di rilevamento attivo che restituisce la superficie terrestre e tutti gli elementi su di essa (edifici, infrastrutture, vegetazione, ecc.) attraverso una nuvola di punti tridimensionale. Il CNR IRPI, oltre al volo LiDAR, ha fornito il Modello Digitale del Terreno (DTM) e i punti del terreno e della vegetazione relativi a quel DTM in formato LAS.

Gli interventi ingegneristici sul torrente Orco sono stati numerosi, sia a causa della sua imprevedibile e repentina riattivazione di canali secondari e aree abbandonate a seguito di eventi di piena che allagano la zona perifluviale e incrementano il fenomeno del deposito, sia successivamente all'alluvione del 2000. A tal riguardo, sono stati effettuati a febbraio 2019, dei campionamenti sulla composizione granulometrica in tre siti. Grazie ai valori caratteristici della curva granulometrica (d_{50} e d_{90}) tramite formule empiriche si è stimato, e successivamente verificato tramite la formula inversa dell'equazione di Chezy, il coefficiente di scabrezza dell'alveo.

Durante l'attività di tesi sono stati effettuati due sopralluoghi: il primo per creare un piccolo database costituito da diametri e altezze degli alberi suddivisi per specie, tramite analisi su aree di saggio nei pressi delle sponde del torrente Orco e il secondo per un controllo visivo sul campo per comprendere la natura della nuvola di punti LiDAR in determinate aree.

2.1 Introduzione LiDAR

La tecnologia LiDAR, acronimo di Light Detection and Ranging, è una tecnica di telerilevamento “attivo” di scansione laser che permette di eseguire rilievi topografici ad alta risoluzione su un’area [12], ottenendo una nuvola di punti (a ciascun punto vengono associate coordinate ed altezza) [13].

Il sistema di acquisizione dei dati LiDAR è composto da sensori ottici attivi costituiti da un trasmettitore (un laser scanner) che, una volta posizionato a bordo di un aereo o un drone, emette un impulso luminoso ad alta frequenza, un ricevitore GPS per il posizionamento del punto e da un sistema di acquisizione dati costituito dalle stazioni GPS che si trovano a terra (*figura 9*).

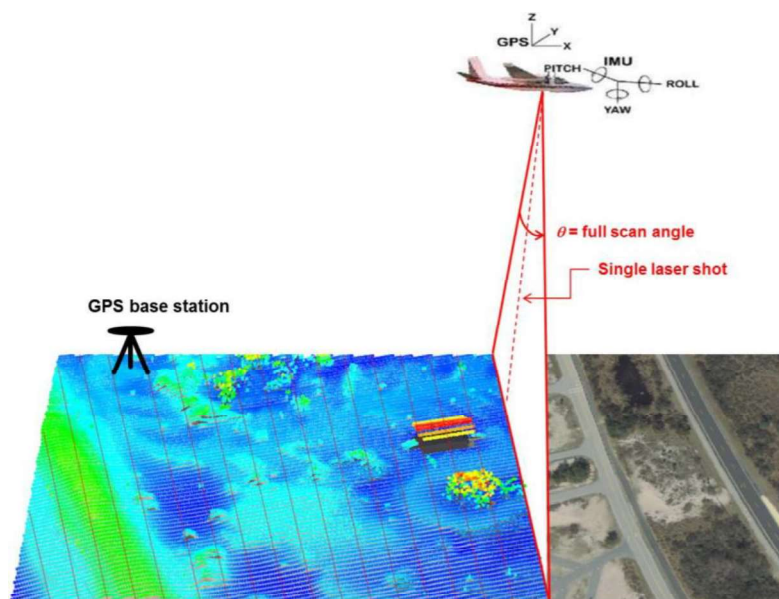


Figura 9 – Schema della tecnologia LiDAR (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2012) [14].

Il laser emette un impulso di tipo ottico del quale si misura l’intervallo di tempo tra l’emissione del segnale e la ricezione dell’impulso di ritorno. Noto l’intervallo di tempo, lo si converte tramite la velocità di propagazione del segnale nota, in distanza percorsa. Il prodotto generato dal volo LiDAR sarà un profilo in tre dimensioni delle superfici colpite dal laser (Floris et al., 2010) [15].

Questa tecnologia permette di riprodurre l’area interessata in maniera dettagliata perché la densità di punti rilevata è elevata ed è possibile dividere la vegetazione dagli edifici e vegetazione ed edifici dalla superficie terrestre. Ogni impulso restituisce un ritorno della superficie se incontra, per esempio, terreno ed edifici mentre restituisce ritorni multipli del segnale in presenza di vegetazione in quanto il segnale viene in parte trasmesso e in parte riflesso. Quando il raggio laser incontra, per esempio, la chioma di un albero, parte del segnale viene riflessa dalla chioma stessa e parte prosegue fino all’ostacolo successivo o al suolo: se la vegetazione non è eccessivamente densa, il LiDAR penetra riflettendo punti a diversi livelli della fronda e al suolo ed è possibile acquisire dati riguardanti rami e foglie di ciascun albero. I dati acquisiti dai sensori laser su aerei riguardano porzioni di territorio comprendenti terreno, edifici, infrastrutture e vegetazione. Per poter generare il modello digitale è necessario che vengano registrati dal sensore almeno il primo e l’ultimo ritorno: i punti possono essere filtrati in base agli impulsi appartenenti al suolo piuttosto che a superfici vegetate o edificate quindi grazie alla catalogazione si possono estrarre le quote del terreno ottenendo la descrizione della forma del territorio rimuovendo la vegetazione della nuvola di punti rilevata.

Dal volo si ottiene, con l'uso dei primi impulsi, un Modello Digitale della Superficie, DSM (*Digital Surface Model*), che comprende qualsiasi elemento/oggetto intercettato dal laser come edifici, pali, chiome di alberi, terreno, infrastrutture ecc. Tramite una successiva elaborazione dei dati è possibile filtrare il DSM e, utilizzando gli ultimi ritorni dell'impulso laser, si ottiene il Modello Digitale del Terreno, DTM (*Digital Terrain Model*), che comprende i soli dati dei punti relativi alla superficie del terreno. Dalla differenza algebrica locale tra DSM e DTM si ottiene il DCM (*Digital Canopy Model*) che comprende solo ed esclusivamente i punti appartenenti alla vegetazione.

I vantaggi dell'utilizzo del LiDAR sono principalmente l'elevata precisione, l'elevata velocità di acquisizione dei dati, combinati all'elevata superficie di territorio da indagare, e una miglior analisi topografica di dettaglio della superficie terrestre rispetto ad altri metodi di raccolta dati come la fotogrammetria o la raccolta dati a terra tramite censimenti. Entrambe queste ultime soluzioni sono in grado di indagare aree vaste ma la prima restituisce immagini bidimensionali (Cina, 2017) [16] quindi non si hanno informazioni riguardo l'elevazione dei punti, mentre la seconda colma la mancanza della fotogrammetria ma prevede di effettuare campagne quindi attività di censimento molto dettagliate a livello del singolo albero ma che risultano essere dispendiose in termini di tempistiche, velocità, costi e con l'impossibilità di perlustrare in dettaglio, sia siti poco agevoli da accedere quali isole centrali o aree ad alta densità di bassa vegetazione (rovi, erba alta, ecc.), sia zone molto estese (Scrinzi, 1989) [17], (White et al., 2013) [18].

I LiDAR hanno, inoltre, innumerevoli campi di utilizzo: agricoltura (Eitel et al., 2014) [19], applicazioni forestali per la creazione di inventari forestali e mappe tematiche (Penasa, 2021) [20], attività ambientali [21], pianificazione urbanistica, pianificazione e progettazione infrastrutture, settore della selvicoltura (Vastaranta et al., 2013) [22], valutazione del rischio di alluvione, geomatica (Reutebuch et al., 2003) [23].

2.2 Acquisizione aerea dati LiDAR

La fotogrammetria aerea viene utilizzata per rilevare la topografia del territorio e si suddivide in 3 step:

- Pianificazione e tracciamento di un piano di volo e sorvolo del territorio;
- Acquisizione delle immagini;
- Generazione dell'ortomosaico GeoTIFF geodifferenziato del volo.

L'acquisizione dei dati LiDAR è avvenuta tramite dei sensori laser montati su aerei e il volo per strisciate parallele ha permesso di reperire tutte le informazioni sul territorio oggetto di studio. Le singole strisciate vengono pianificate dal tracciamento di un piano di volo che tiene conto della portata massima del sensore, della conformazione territoriale e di un'area di sovrapposizione tra strisciate adiacenti, necessaria per una copertura completa del territorio.

Il CNR IRPI ha fornito il rilevamento LiDAR/fotogrammetrico aerotrasportato con propria strumentazione del tratto del torrente compreso tra Cuorgnè e la confluenza con il Po presso Chivasso. Il volo, risalente al 28/02/2019, è stato pianificato tracciando le strisciate necessarie a garantire una copertura LiDAR dell'area di indagine con densità media di punti raw pari a 10 punti/m²; una copertura stereoscopica minima di progetto pari a 60% (*forward overlap*) e 30% (*sidevard overlap*); e un GSD (*Grozmdsambling Distance*) fotografico medio pari a 10 cm/pixel. Si riporta il piano di volo nella figura sottostante (*figura 10*):

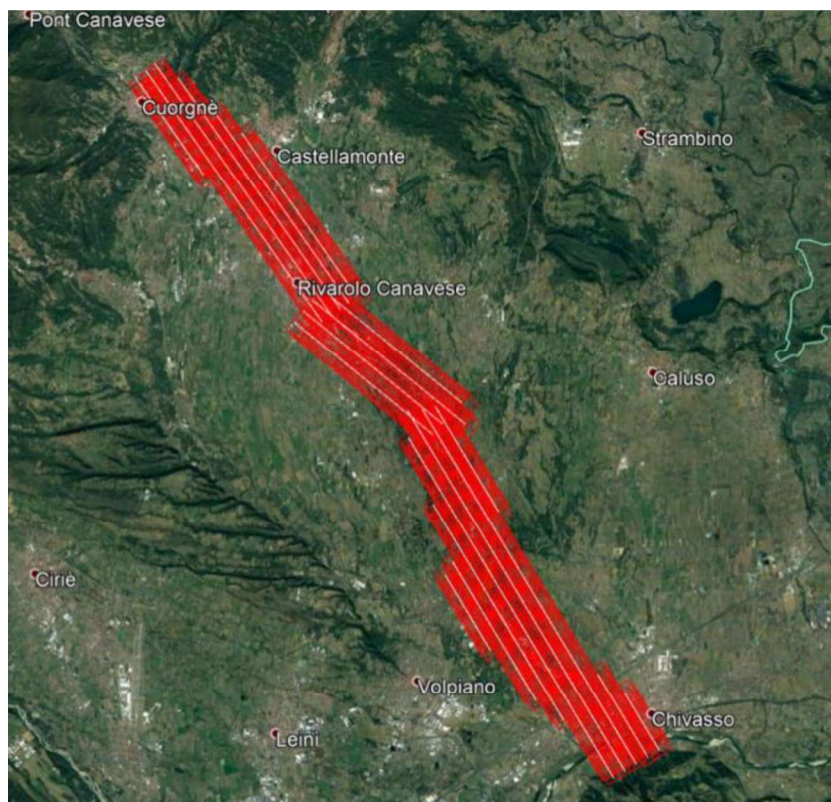


Figura 10 - Piano di volo tra Cuorgnè e Chivasso.

Il rilevamento è stato infine programmato con una frequenza di scansione pari a 400KHz in fascia di emissione superiore MTA (*Multiple-TimeAround*) 3; equivalente ad una quota media AGL (*Above Ground Level*) e variabile a seconda della strisciata, compresa tra 675 e 794 m.

Per i rilevamenti aerei sopradescritti, il CNR IRPI ha utilizzato il sensore aerotrasportato Litemapper 6800 di proprietà, ingegnerizzato su POD DART certificato EASA con minor/STC approval per Eurocopter AS350 marche HELIWEST.

Al fine di risolvere i disallineamenti strumentali, diversi per ciascuna installazione successivamente all'installazione operativa per il rilevamento dell'area di progetto prevista per il g10fno successivo, è stato eseguito il volo di calibrazione standard per il sistema sopra la base operativa HELIWEST di Motta di Costigliole (AT) con determinazione degli offset strumentali tra sistema e antenna GNSS posta su timone di coda (stazione totale TOPCON GPT-6001 1" — certificato di calibrazione del 06/04/2018). Il volo, costituito da 4 strisciate incrociate a 400m AGL e 4 strisciate incrociate sovrapposte alle precedenti e volate a 800m AGL ha consentito la determinazione dei disallineamenti strumentali esistenti tra sistema LiDAR/GPS/IMU e camera medio formato nonché la rideterminazione dei parametri interni della camera con cui è stato generato un file di calibrazione valido per la produzione dell'ortofotomosaico del volo (Brovelli et al., 2020) [24].

Il dato rilevato risulta composto da 23 strisciate "corridoi" per un totale di 1.377.181.696 punti e 727 scatti stereoscopici in medio formato 7216X5412 24 BIT. Il progetto è stato organizzato in 422 tiles quadrati di lato 500m con numerazione arbitraria Nord-Sud e corrispondenza univoca di numerazione tra tile laser e tile ortofotografico. Il prodotto ortofotografico è infine stato generato con medesima numerazione del taglio laser, con dimensione del pixel pari a 7 cm. Tutto il dato, in ottemperanza a quanto previsto dal D.lgs. 10 novembre 2011, è trattato e fornito nel datum di riferimento ETRF2000 in proiezione piana UTM su fuso 32N.

Il dato è stato filtrato e classificato per l'estrapolazione di modelli appartenenti a:

- Piano campagna (ground);
- Bassa, media ed alta vegetazione;
- Edifici;
- Acqua.

Il materiale utilizzato e fornito dal CNR IRPI consiste in:

- DTM 10cm: Modello Digitale del Terreno diviso con una maglia quadrata di 10 cm;
- DTM 50cm: Modello Digitale del Terreno diviso con una maglia quadrata di 50 cm;
- LAS Vegetation: punti della vegetazione riferiti al DTM 50cm;
- Ortofoto;
- Quadro d'unione: raccolta dei fogli di mappa.

2.3 Analisi granulometrica

La caratterizzazione della granulometria dei sedimenti è fondamentale per determinare la scabrezza di fondo alveo.

A inizio anno 2019 sono stati eseguiti 20 campionamenti in 3 siti lungo l'asta fluviale: Montanaro (1), San Benigno Canavese (2) e Rivarolo Canavese (3), riportati in *figura 11*.

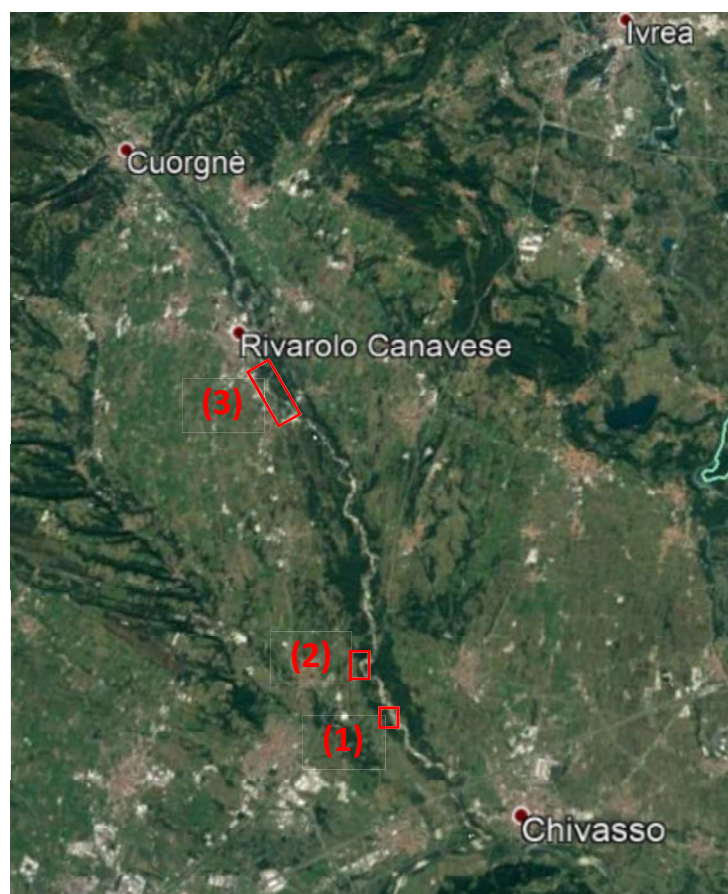


Figura 11 - Localizzazione dei 3 siti campionati: Montanaro (1), San Benigno Canavese (2) e Rivarolo Canavese (3).

Per le tre sezioni sono stati presi i campioni relativi sia alle sponde che all'alveo, e per ciascuna tipologia di campione è stata calcolata la curva granulometrica media.

La procedura di raccolta campioni è stata effettuata nello stesso modo per le tre sezioni: una volta individuata la zona, si procede con lo schema a *zig-zag* che consiste nella raccolta e misurazione casuale in loco dei campioni. Si parte da un punto, un operatore raccoglie casualmente una prima particella, ne misura gli assi massimo, intermedio e minore che caratterizzano la dimensione del sedimento, e si riportano tali misure sul libretto di campagna. Successivamente l'operatore si sposta di qualche passo in direzione diagonale ed effettua un'altra misurazione e così via fino a ricoprire l'intera zona e fino ad aver raccolto un numero sufficiente di dati che serviranno successivamente per la costruzione della curva granulometrica.

Una volta conclusa la campagna di misurazione, si suddivide il materiale raccolto e misurato, in funzione del diametro massimo, secondo le classi granulometriche principali:

- < 2 mm (materiale sabbioso/fine)
- 2 - 4 mm (ghiaia molto fine)
- 4 - 8 mm (ghiaia fine)
- 8 - 16 mm (ghiaia media)
- 16 – 32 mm (ghiaia grossa)
- 32 – 64 mm (ghiaia molto grossa)
- 64 – 128 mm (ciottoli piccoli)
- 128 – 256 mm (ciottoli grossi)
- 256 – 512 mm (massi piccoli)
- 512 – 1024 mm (massi grandi)
- > 1024 mm (massi molto grossi)

È necessario ricordare che qualora la granulometria presente sia superiore a due millimetri allora si utilizza il *metodo a zig-zag* descritto sopra, se invece risultasse inferiore ai due millimetri, si sarebbe in presenza di sabbia, limi o argille e non sarà possibile utilizzare tale metodo di misurazione; in tal caso sarà necessario raccogliere il campione e analizzarlo in laboratorio. I campioni di materiale sabbioso/fine (< 2 mm) sono stati, quindi, analizzati mediante setacciatura nel laboratorio di Idraulica del DIATI del Politecnico di Torino per determinare le dimensioni e le percentuali di materiale fine.

Il risultato dell'analisi granulometrica è la curva granulometrica che riporta, sito per sito, l'andamento del passante [%] in funzione del diametro [mm] dei campioni prelevati, generando una forma a S che caratterizza tipicamente le sabbie.

L'aver avuto a disposizione le curve granulometriche è stato propedeutico al calcolo del coefficiente di scabrezza da impostare nel modello idrodinamico bidimensionale (vedere *Capitolo 4*).

2.4 Coefficiente di scabrezza

Il coefficiente di scabrezza indica quanto è significativo l'attrito dell'alveo sulla resistenza al moto. In letteratura sono presenti numerose formule empiriche ma per valutare la scabrezza, nei modelli, viene spesso utilizzato il numero di Manning:

$$n = \frac{1}{k_s} \left[m^{-\frac{1}{3}} s \right]$$

Dove k_s rappresenta il coefficiente di Strickler che essendo l'inverso del numero di Manning avrà come unità di misura nel SI $[m^{\frac{1}{3}} s^{-1}]$: piccoli valori di k_s implicano grandi valori di n e, pertanto, una grande scabrezza.

Per determinare il coefficiente di Manning, come detto in precedenza, si fa uso di diverse formule empiriche (Latella et al., 2020) [25] (vedi *tabella 6*) in funzione dei quantili di distribuzione granulometrica, d_{50} e d_{90} , reperibili dall'analisi granulometrica.

Strickler [26]	Julien [27]	F. H. Adm. [28]	Strickler [26]	Julien [27]	Meyer-Peter & Muller [29]
$\frac{d_{50}^{\frac{1}{6}}}{21,1}$	$0,062 \cdot d_{50}^{\frac{1}{6}}$	$0,034 \cdot d_{50}^{\frac{1}{6}}$	$0,036 \cdot d_{90}^{\frac{1}{6}}$	$0,038 \cdot d_{90}^{\frac{1}{6}}$	$\frac{d_{90}^{\frac{1}{6}}}{26}$

Tabella 6 - Formule teoriche per il calcolo del coefficiente di Manning, n .

Le espressioni precedenti si applicano ai tre siti di campionamento visti in *figura 11* sia nelle barre che nell'alveo. Dei 6 valori di Manning ottenuti si scartano quello più alto e quello più basso che presentano i maggiori scostamenti e dei rimanenti si calcola una media.

La calibrazione effettiva di questo coefficiente avviene applicando la formula di Chezy in formula inversa:

$$n = \frac{\Omega \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{i_f}}{Q}$$

Dove Ω è l'area della sezione bagnata, R il raggio idraulico, i_f la pendenza dell'alveo e Q la portata volumetrica, valori misurati nelle campagne di misura. Il risultato ottenuto è un valore di Manning $n = 0.03$, del tutto analogo alla media delle formulazioni teoriche.

Il torrente Orco, lungo il suo percorso nel tratto pianeggiante da Cuornè fino a Chivasso, attraversa aree agricole, aree fittamente vegetate e aree molto urbanizzate. Il susseguirsi di diversi usi del suolo porterebbe a pensare ad un diverso coefficiente di scabrezza in base alle aree incontrate ma l'aver prima calcolato il coefficiente di Manning con formule empiriche e successivamente averlo verificato con la formula di Chezy in forma inversa esplicitando n , ha permesso di assumere un unico valore del coefficiente di scabrezza per l'intero alveo attivo. La modellazione idraulica (*capitolo 4*), però, terrà anche conto della vegetazione tramite i *trachytopes*.

Nella modellazione idraulica nel *capitolo 4*, il coefficiente di Manning sarà uno dei parametri da introdurre.

2.5 Attività in campo

Durante l'attività di tesi sono stati effettuati due sopralluoghi: il primo per creare un piccolo database costituito da diametri e altezze degli alberi suddivisi per specie, tramite analisi su aree di saggio, cioè campioni su una zona circoscritta, nei pressi delle sponde del torrente Orco (riferimento al *paragrafo 3.3.1* per apprendere l'utilizzo di tali dati) e il secondo per un controllo visivo sul campo per comprendere la natura della nuvola di punti LiDAR in determinate aree e valutare successivamente la performance dell'algoritmo.

Dal sopralluogo presso San Benigno Canavese effettuato il 21/02/2020, si sono acquisiti nuovi dati sulle specie incontrate durante l'attività in campo: pioppi, salici, robinie e querce. Si sono misurate, con un particolare strumento laser, tutte le altezze degli alberi, e i rispettivi diametri, presenti in un'area di saggio circolare di raggio di 15 metri. Nel dettaglio, lo strumento topografico utilizzato è il laser Rangefinder TruPulse 200, che con una precisione sulla distanza di $\pm 0.2\text{ m}$ in condizioni tipiche, una precisione di $\pm 1\text{ m}$ per punti lontani o debolmente individuabili e una accuratezza sull'inclinazione di $\pm 0.25^\circ$ [30].

Nell'effettuare le misurazioni è stato necessario posizionarsi ad una distanza sufficientemente lontana dall'albero in modo da ottenere un angolo (tra strumento e cima dell'albero) non troppo elevato ma tale da riuscire a puntare lo strumento alla cima e al tempo stesso misurare la distanza orizzontale (tra strumento e tronco), *figura 12*.

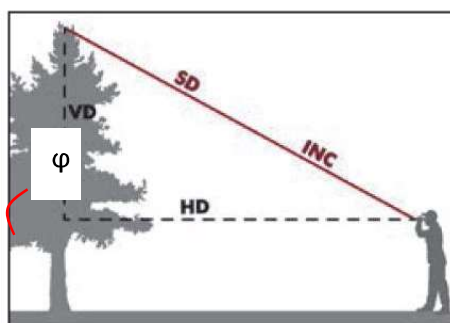


Figura 12 - Misurazioni area di saggio con laser TruPulse 200.

Nota HD, la distanza orizzontale del triangolo e l'angolo, φ , il cateto VD lo si calcola come:

$$VD = HD \cdot \tan(\varphi)$$

Con $\varphi < 45^\circ$ per evitare propagazioni di errore (propagazione di $\tan(\varphi)$).

Ogni pianta all'interno dell'area circolare delimitata di diametro superiore a 7 cm è stata oggetto di censimento.

La rilevazione delle coordinate degli alberi è stata effettuata tramite un sistema di posizionamento globale cinematico in tempo reale (RTK-GPS), con un modello LEICA 1250 e antenna GNSS.

Il secondo sopralluogo è stato svolto il 27/05/2020 al fine di controllare visivamente se fosse presente vegetazione nelle barre createsi nell'alveo perché dall'analisi delle nuvole di punti Lidar non si era in grado di comprendere la natura dei punti restituiti. Dal sopralluogo in tre aree campione (di dimensioni 500m x 500m) presso San Benigno Canavese in *figura 13*, si è potuta confermare la presenza di veri e propri alberi nelle barre (*fig. 14* e *fig. 15*).

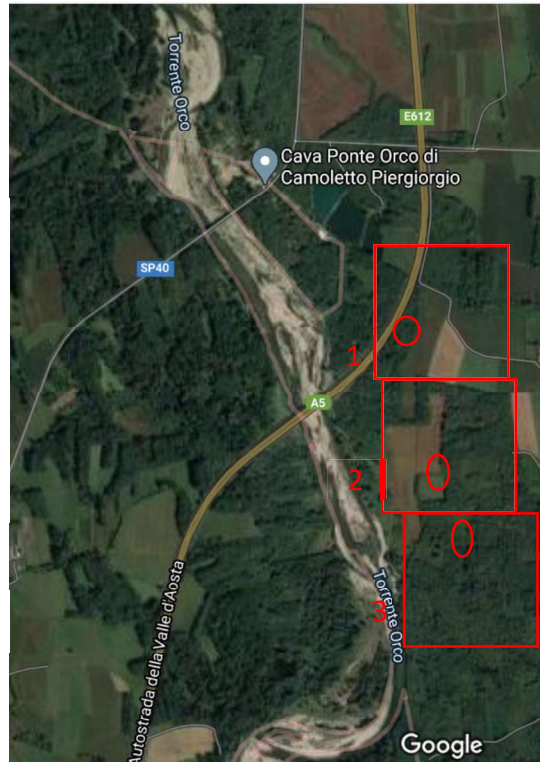


Figura 13 - Aree investigate durante il sopralluogo presso San Benigno Canavese. Le posizioni delle aree campione rispetto al sistema di riferimento EPSG:32632 hanno coordinate: area1 $45^{\circ}14'38.63''N$ e $7^{\circ}48'42.47''E$, area2 $45^{\circ}14'22.43''N$ e $7^{\circ}48'42.81''E$, area3 $45^{\circ}14'6.23''N$ e $7^{\circ}48'43.15''E$, rispetto al centroide delle aree stesse.



Figura 14 – A sinistra: area 1, dettaglio in campo. A destra: area 2, dettaglio in campo.



Figura 15 - Area 3, dettaglio in campo.

3. Caratterizzazione della vegetazione a partire dai dati LiDAR

Il lavoro vero e proprio di tesi inizia da questo capitolo in cui l'obiettivo di questa sezione è quello di trovare un modo efficace per caratterizzare la vegetazione ripariale da applicare lungo l'asta del torrente Orco avendo a disposizione, grazie al CNR IRPI (vedere *sottocapitolo 2.2* per maggiori dettagli), dati LiDAR. Grazie ai precedenti studi in letteratura, si comprende come la nuvola di punti restituita dall'applicazione LiDAR sia un ottimo punto di partenza da cui iniziare lo studio e come, nonostante la specificità dell'argomento, l'individuazione della vegetazione sia ampiamente trattato. La maggioranza degli studi, però, riguarda le conifere perché grazie alla loro tipica forma conica e la loro disposizione regolare, l'individuazione del singolo albero è facilitata rispetto a popolamenti di latifoglie.

I metodi proposti prevedono un approccio *CHM-based*, cioè modelli basati sull'altezza della chioma, o *cloud-based*, modelli che lavorano sull'intera nuvola di punti tridimensionale. Essendo stato dimostrato in letteratura che quest'ultimo approccio risulta essere più preciso [31], si è scelto di adottare appunto l'approccio cloud-based ideando un algoritmo *density-based*, cioè che si basa sulla densità spaziale dei punti avendo osservato come le chiome degli alberi di latifoglie risultano essere più dense in corrispondenza del tronco e man mano che ci si allontana da esso, si riduce.

Nel *sottocapitolo 3.2* vengono descritti i meccanismi di funzionamento degli algoritmi sull'individuazione dei singoli alberi e quello sul calcolo della biomassa, le criticità inizialmente riscontrate e successivamente risolte e, infine, le loro applicazioni a 12 popolamenti decidui nell'area di studio del torrente Orco. Gli algoritmi vengono testati su aree campione in diverse condizioni per poter rappresentare al meglio la realtà vegetale.

Il livello di successo del metodo *density-based* sull'individuazione dei singoli alberi, oltre al funzionamento dell'algoritmo in sé, dipende dalla risoluzione dei dati LiDAR e richiede almeno 3-4 punti al metro quadro per ottenere risultati precisi. È importante che i voli LiDAR siano effettuati nei mesi autunnali/invernali in condizione di *leaf-off* perché un'elevata densità di vegetazione con foglie comporta maggiori difficoltà nel distinguere le singole piante portando ad una fusione delle chiome e impedendo la rilevazione delle piante giovani presenti nel sottobosco (Latella et al., 2021) [32].

Il secondo algoritmo, a partire dai singoli alberi individuati precedentemente, ha lo scopo di associare ad ogni albero di note coordinate e altezze, la densità di biomassa corrispondente utilizzando le curve allometriche che rappresentano il legame tra l'altezza di una pianta e il suo diametro suddivise per specie. L'inventario forestale del torrente Orco fornisce, inoltre, informazioni precise sulle specie arboree presenti sul territorio (robinia pseudoacacia, quercia, salice, pioppo) e la loro disposizione spaziale.

Combinando la carta forestale all'algoritmo si riesce a caratterizzare ogni albero in termini di coordinate spaziali, altezza, biomassa e specie.

Per concludere, gli algoritmi proposti verranno applicati a tutta l'area di studio del torrente Orco di estensione di circa 30 km.

3.1 Studi in letteratura

Con riferimento al *sottocapitolo 2.1*, la tecnologia LiDAR permette di eseguire rilievi topografici: il segnale LiDAR, quando intercetta una superficie, fornisce i diversi ritorni del laser ottenendo una nuvola di punti georeferenziata che rappresenta la superficie terrestre e tutti gli oggetti su di essa, struttura degli alberi compresa.

Dagli studi in letteratura si comprende come l'analisi dei dati LiDAR per la definizione della spazialità degli alberi singoli o di foreste sia ampiamente trattato ed argomentato. In particolare, si sono osservati due tipi principali di approcci: *single tree-based* e *area-based*. Il primo metodo prevede di raccogliere informazioni dettagliate sui singoli alberi per poi estendere, successivamente, i dati riferiti al singolo, all'intera popolazione limitrofa tramite regressioni o metodi statistici. Il secondo, invece, consiste nell'individuare aree con popolamenti di arbusti ad altezza simile al quale associare caratteristiche medie quali diametro, volume, biomassa (Yu et al., 2010) [33].

I metodi proposti fino ad ora per l'individuazione dei singoli alberi, si possono classificare secondo il seguente schema riassuntivo (Latella et al., 2021) [32]:

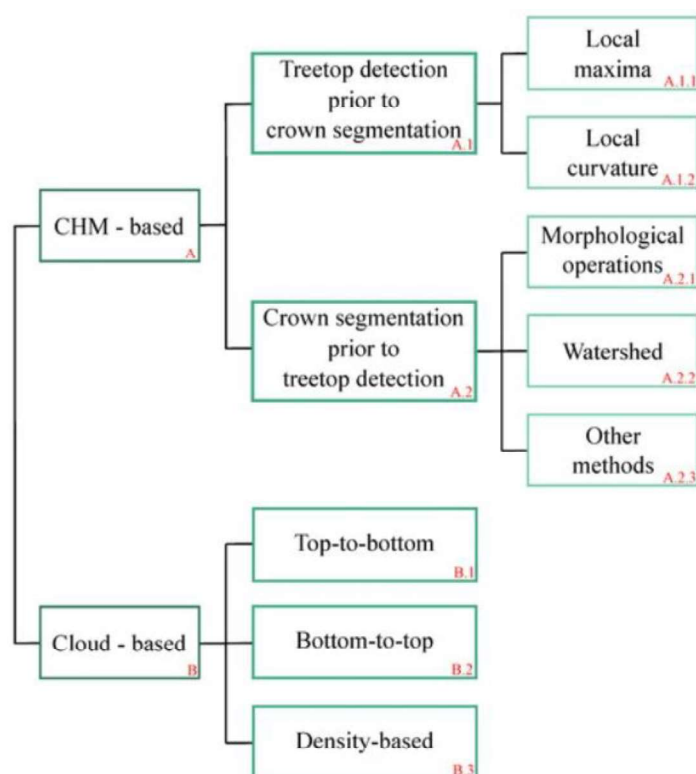


Figura 16 – Schema sui metodi raccolti in letteratura per l'individuazione dei singoli alberi (Latella, M. et al., 2021) [32].

CHM è l'acronimo di *Canopy Height Model*, anche chiamato DCM (*Digital Canopy Model*), ed è un elaborato ottenibile sottraendo localmente dal modello digitale di superficie (DSM) il modello digitale del terreno (DTM). Il Modello Digitale delle Chiome conterrà, quindi, i valori di altezza dei punti appartenenti alle chiome rispetto al terreno. Per l'individuazione dei singoli alberi, a partire da dati CHM-based, sono state individuate due metodologie: la prima, *treetop detection prior to crown segmentation*, esegue l'identificazione della cima dell'albero e successivamente individua i relativi confini della chioma; la seconda, *crown segmentation prior to treetop detection*, effettua il procedimento inverso, ovvero, individua prima la chioma e solo successivamente, entro i confini della chioma stessa, identifica la cima.

Nel dettaglio, chi ha utilizzato il metodo *treetop detection prior to crown segmentation*, ha scelto di basarsi o sulla curvatura locale, *local curvature*, ovvero sulla forma che ha la superficie della chioma localmente (Bian et al., 2014) [34], (Mongus et Žalik, 2015) [35], oppure, i più frequenti studi, sull'altezza massima locale, *local maxima*, (Koch et al., 2006) [36], (Hyypä et al., 2001) [37], (Persson et al., 2002) [38], (Chen et al., 2006) [39].

È stato interessante approfondire, quindi, l'approccio utilizzato più comunemente dagli autori in letteratura: Koch, Heyder and Weinacker [36], hanno utilizzato la scansione laser per raccogliere informazioni sugli alberi e un filtro locale massimo per individuare le possibili cime degli alberi stessi. Le chiome sono state individuate tramite la combinazione di un algoritmo, che si basa sulla forma degli alberi, e una rilevazione delle chiome con dei vettori a partire dalle cime degli alberi. Tali risultati sono stati confrontati con le proiezioni delle chiome e con alberi fotogrammetricamente delineati. Su 49 alberi misurati, l'algoritmo ne individua 47, l'87,3% dei quali è identificato correttamente. Il metodo da loro implementato funziona bene in presenza di conifere ma tende ad omettere alberi piccoli e a fondere chiome interconnesse e omogenee o di alberi caducifogli, portando ad una sottostima del numero di alberi.

Mongus and Zalik [35] hanno proposto un approccio secondo il quale le cime degli alberi vengono definite a partire dalle zone concave presenti all'interno del modello di altezza della chioma (CHM) con l'impiego di marcatori montati localmente per la segmentazione idrografica. La definizione dei singoli alberi avviene mediante la segmentazione di un modello di altezza della chioma (CHM) (Hyypä et al., 2001 [37]; Persson et al., 2002 [38]; Chen et al., 2006 [39]; Li et al., 2012 [40]). CHM fornisce le stime delle altezze degli alberi ad intervalli discreti mentre i massimi locali vengono utilizzati invece per definire le posizioni delle cime degli alberi: questa integrazione conduce ad una buona efficienza anche quando si è in presenza di una bassa densità di nuvole di punti. Tale studio mostra un aumento dell'efficienza del 6% rispetto ai punti di massima altezza locali tradizionalmente usati per la rilevazione delle cime degli alberi.

Gli autori che, invece, hanno utilizzato la metodologia *crown segmentation prior to treetop detection*, hanno sviluppato algoritmi basati su metodi a diradamento variabile, *watershed*, e successivo filtraggio delle altezze massime locali all'interno delle singole chiome individuate (Hirata et al., 2009) [41] oppure metodi definiti morfologici, *morphological operations*, che separano le chiome degli alberi e all'interno della segmentazione della chioma stessa associano al valore di quota più elevato l'altezza della pianta (Andersen et al., 2001) [42], (Kwak et al., 2007) [43] oppure altri approcci per l'identificazione delle chiome.

Come affermato in un po' tutti gli articoli sopra citati, l'approccio *CHM-based* è efficace per aree a vegetazione regolare soprattutto nei popolamenti di conifere ma può essere meno efficace laddove la densità di punti LiDAR sia bassa oppure dove le chiome abbiano forme geometriche complesse o ancora in presenza di foreste miste o sottobosco, tipico dei popolamenti di latifoglie. Per superare tali difficoltà si è provato ad utilizzare il secondo metodo, *cloud-based*, di figura 16. Lavorando sull'intera nuvola di punti e non solo sul CHM, tale approccio risulta avere una precisione maggiore anche se richiede un'elaborazione dei dati LiDAR più macchinosa.

L'approccio *cloud-based* si suddivide ulteriormente in due principali sottogruppi: *top-to-bottom*, cioè metodi dall'alto verso il basso, dove prima viene rilevata la cima degli alberi e successivamente tutti i punti nell'intorno dello stesso appartenenti allo stesso albero (Richardson et al., 2011) [44], (Li et al., 2012) [40], (Ma et al., 2020) [45], e *bottom-to-top*, metodi dal basso verso l'alto.

3.1.1 Definizione del metodo proposto

Si nota come in letteratura gli studi esistenti si concentrino soprattutto sull'individuazione di piante appartenenti alla specie delle conifere, le cui caratteristiche peculiari sono, oltre a mantenere la chioma durante il periodo invernale, il tipo di foglia ed in particolare la forma ad ago e il fatto che il tronco cresce molto in altezza rispetto alle ramificazioni laterali portando ad una forma a piramide complessiva dell'albero, tipica di abeti, larici e alcune specie di pini e cipressi. Per tale motivo nel caso delle conifere si hanno dei picchi ben visibili in corrispondenza della cima degli alberi stessi (Koch, Heyder and Weinacker, 2006 [36]) e questa caratteristica, insieme alla geometria aghiforme della foglia, facilita la loro singola individuazione.

Nel caso delle latifoglie, le loro caratteristiche peculiari sono il fatto che la maggior parte di esse sono decidue, ovvero perdono le foglie nelle stagioni autunno/inverno, le foglie hanno una forma larga e hanno un tronco che tende ad aprirsi ad ombrello con una chioma a forma di globo o ovoidale rigogliosa e frondosa. Nelle foreste di latifoglie i singoli alberi sono difficilmente distinguibili e individuabili perché le chiome tendono a fondersi le une alle altre (Richardson and Moskal, 2011 [44]; Lu et al., 2014 [31]). In *figura 17* si mostra il confronto tra conifere e latifoglie (Jean-Romain Roussel et al., 2017 [46]).

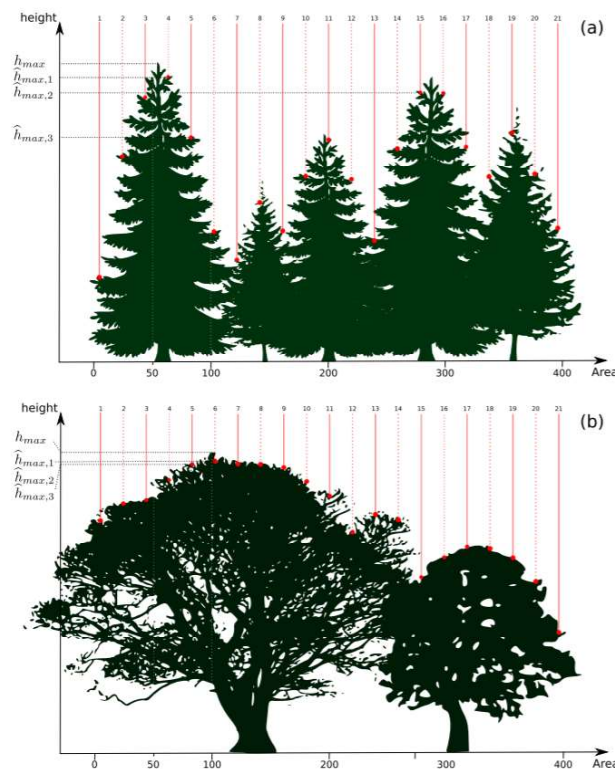


Figura 17 - Vista laterale di conifere (in alto) e alberi decidue (in basso) tratto da Jean-Romain Roussel et al., 2017 [46].

La sovrapposizione delle chiome rende difficile la penetrazione dei raggi laser del LiDAR, portando a commettere imprecisioni legate alla presenza del sottobosco.

Dalle precedenti considerazioni sulla vegetazione e tenendo conto degli studi pregressi dalla letteratura, si è scelto di utilizzare l'approccio *cloud-based* e basarsi su un algoritmo *density-based* (inserito in *figura 16*) che si basa sui punti a densità massima, una terza strada non ancora percorsa negli studi svolti finora. Da un'analisi della nuvola di punti, si è osservato che, ragionando in termini di

densità di punti, la densità è massima nell'intorno del centro dell'albero e man mano diminuisce allontanandosi da esso, *figura 18*, (Latella et al., 2021) [32].

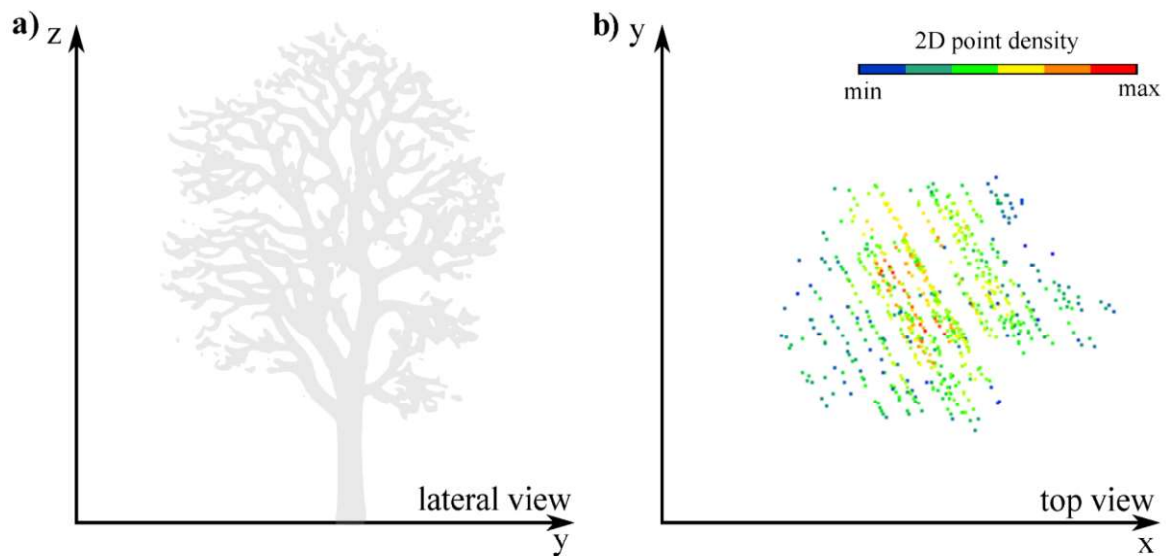


Figura 18 - a) vista laterale della nuvola di punti che costituisce un singolo albero; b) rappresentazione densità di punti: vista dall'alto (nel piano $z=0$) della nuvola di punti dell'albero in figura a). (Latella et al., 2021) [32].

Confrontando le caratteristiche tra gli approcci che si basano sui massimi locali (*figura 19* parte superiore del grafico, (Latella et al., 2021) [32]) e quello proposto sulla densità dei punti (*figura 19* parte inferiore del grafico, [32]) per diverse specie di vegetazione, graficamente si può osservare come la condizione di *leaf-off* (c) cioè la condizione senza foglie degli alberi di latifoglie tipica nei mesi autunnali/invernali, permette, in termini di densità, la rilevazione anche di alberi di altezza minore che caratterizzano il sottobosco. La presenza delle foglie (b) confonde l'identificazione delle specie mentre per il popolamento di aghifoglie (a) si evince come il rilevamento degli stessi avviene in maniera efficace per entrambi gli approcci.

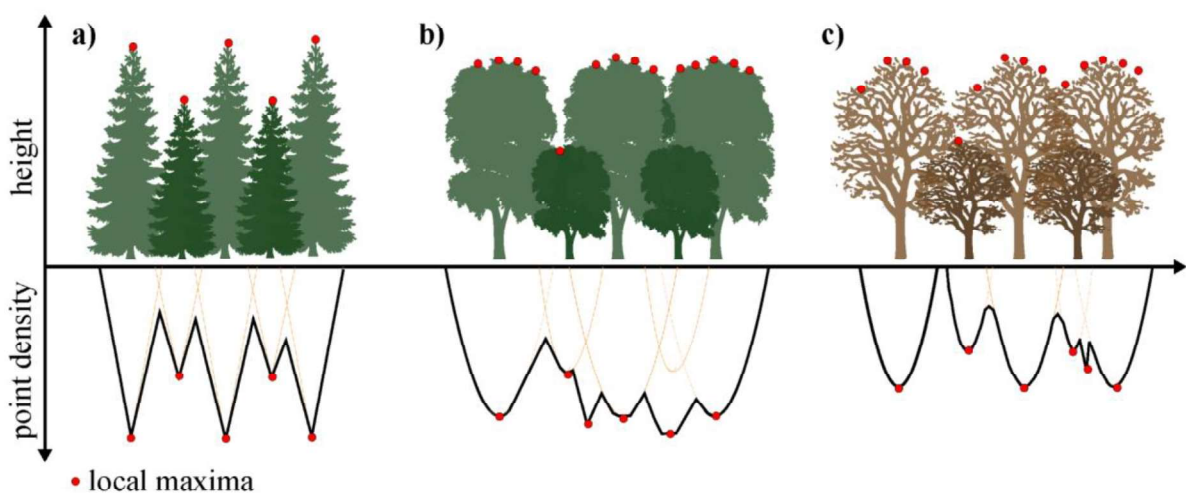


Figura 19 - Confronto tra approccio massimi locali (in alto) e approccio density-based (in basso) per a) popolazione di aghifoglie, b) bosco di latifoglie nei mesi primaverili/estivi (con foglie), c) bosco di latifoglie nei mesi autunnali/invernali (senza foglie), condizione *leaf-off*. (Latella et al., 2021) [32].

3.2 Identificazione dei singoli alberi a partire dai dati LiDAR

3.2.1 Prima versione dell'algoritmo: problemi e risoluzione

L'obiettivo è quello di creare un algoritmo in grado di estrarre il numero di piante al metro quadro a partire dall'analisi dei ritorni. In particolare, l'algoritmo proposto identifica il singolo albero all'interno di un'area in cui sono presenti diversi alberi, analizzando una nuvola di punti LiDAR in cui ogni punto è caratterizzato dalle coordinate x e y, che indicano la posizione, e dalla coordinata z, che descrive la quota relativa del punto.



Figura 20 - Flow chart prima versione dell'algoritmo per l'individuazione dei singoli alberi.

Con riferimento alla *figura 20*, per prima cosa l'algoritmo legge il file in ingresso contenente la nuvola di punti LiDAR. Per capire a quale distanza sono localizzati gli alberi l'uno dall'altro, l'algoritmo calcola, per ogni punto, la frequenza spaziale delle distanze rispetto agli altri punti all'interno della nuvola per definire il raggio più frequente. In base al raggio più frequente appena calcolato, si calcola la densità spaziale dei punti che si trovano nell'area intorno a quel punto. Per capire dove sono posizionati gli alberi, si individuano come tronchi quei punti che hanno una densità di punti attorno e sé, come se fossero dei cluster di punti. L'algoritmo poi procede con il confronto tra la densità di un punto e quella dei punti che si trovano all'interno del raggio massimo precedentemente calcolato e si ricava così il punto con la massima densità a cui si attribuisce, in un primo momento, la posizione del tronco della

pianta. Per determinare il numero di alberi è corretto dire che il centro dell'albero è il punto di massima densità ma per altre applicazioni, ad esempio la stima della biomassa, è meglio identificare la punta della pianta. Infine, quindi, si trovano le posizioni delle punte degli alberi relative al punto più alto nella zona di massima densità, ovvero alla punta dell'albero corrisponderà la massima altezza della pianta.

L'algoritmo di Matlab restituisce come file output coordinate dei punti che individua, ovvero proprio degli alberi. Per la gestione del dato LiDAR, la trasposizione in un formato accessibile e per la visualizzazione, sono stati utilizzati i software CloudCompare e QGIS.

Al fine di verificare il funzionamento dell'algoritmo, i test preliminari sono stati svolti su un'area campione quadrata (500m x 500m) di 250'000 m² che si trova presso San Benigno Canavese, *figura 21*.



Figura 21 - Area campione presso San Benigno Canavese: immagine satellitare (Google Maps) e immagine LiDAR. La posizione dell'area campionata rispetto al sistema di riferimento EPSG:32632 ha coordinate, latitudine 45°14'38.63"N e longitudine 7°48'42.47"E, rispetto al centroide dell'area stessa.

L'output di Matlab, nella prima versione del codice, ha fornito le coordinate di 1453 alberi complessivi del quale però:

- 60 punti, pari al 4.2% del totale, rappresentano alberi conteggiati due volte cioè di quei 60 punti, solo 30 sono alberi effettivi;



Figura 22 - Esempio 1: vista dall'alto di alberi conteggiati due volte.

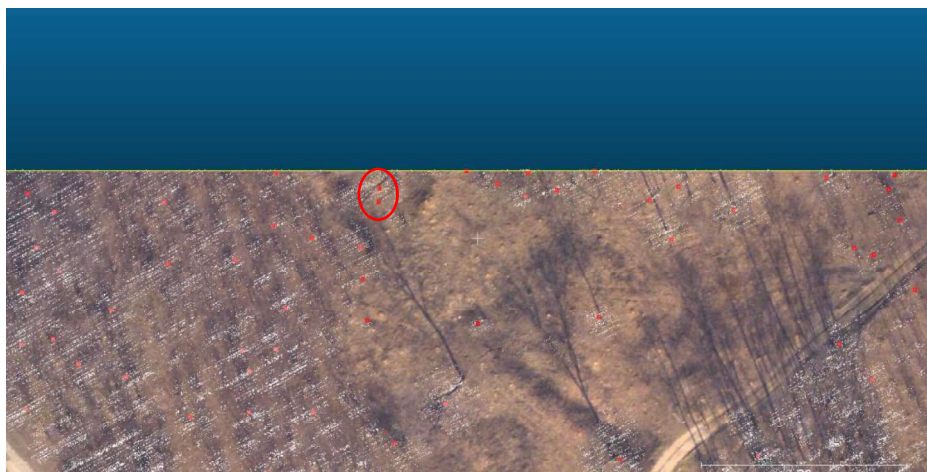


Figura 23 - Esempio 2: vista dall'alto di alberi conteggiati due volte.



Figura 24 - Esempio 2: rappresentazione tridimensionale di alberi conteggiati due volte.

- 20 punti, pari all'1.37% del totale, vengono identificati come alberi ma in realtà non lo sono;
- 258 punti, pari al 17.75% del totale, sono individuati come alberi in corrispondenza delle barre ma dalla nuvola di punti LiDAR non è chiaro se si trattino di alberi, cespugli o vegetazione bassa ed omogenea;

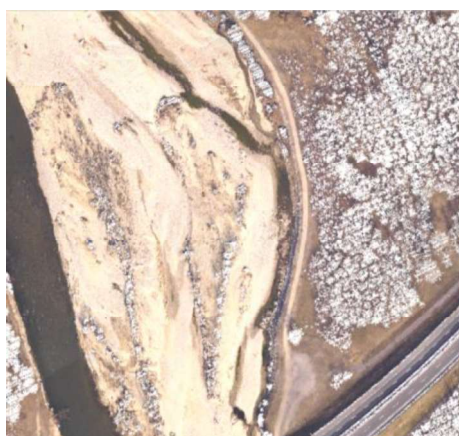


Figura 25 - Esempio: Vista dall'alto (sovrapposizione immagine LiDAR con dati acquisiti LiDAR).

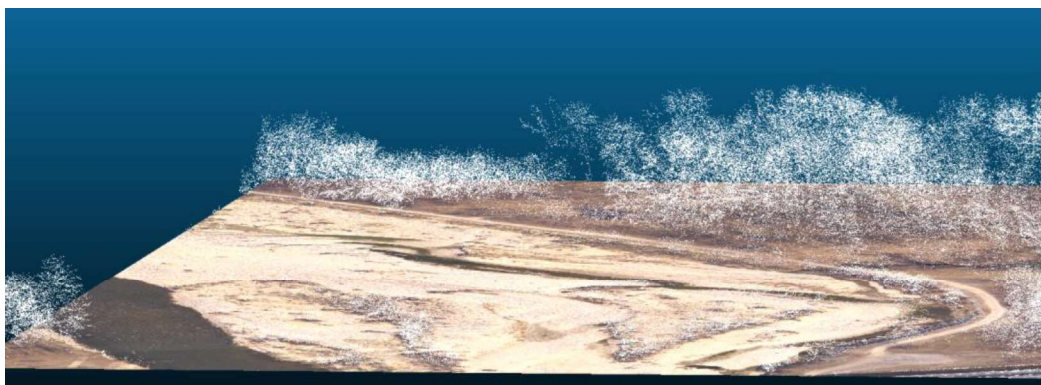


Figura 26 - Esempio: visualizzazione tridimensionale (sovrapposizione immagine LiDAR con dati acquisiti LiDAR).

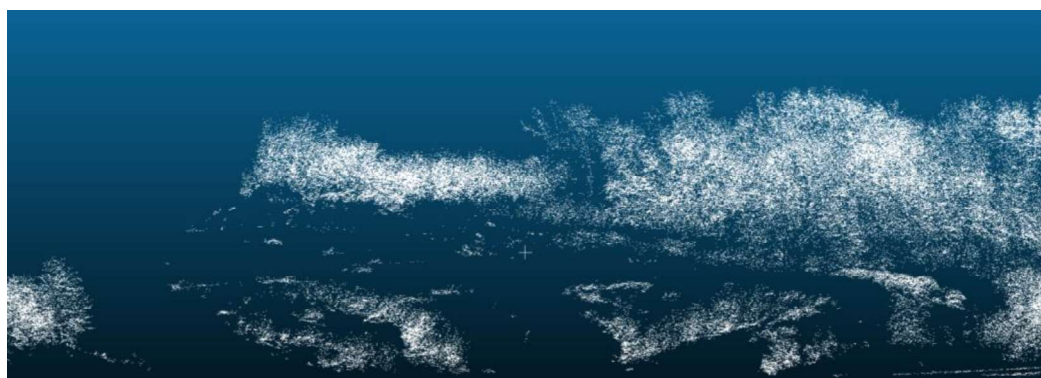


Figura 27 - Esempio: visualizzazione tridimensionale.

Dalle figure sopra riportate si nota la grande differenza di quota e densità dei punti, tale da creare incertezze;

- 30 alberi, pari al 2% del totale, non vengono identificati.



Figura 28 - Esempio: bassa densità di punti pertanto non vengono individuati punti.

In conclusione, dalla prima versione del codice, si è ricavato che circa il 75% degli alberi è stato individuato correttamente. Inoltre, dal sopralluogo presso San Benigno Canavese il 27/05/2020, si è potuta confermare la presenza di veri e propri alberi nelle barre, punti individuati correttamente dall'algoritmo e rappresentanti il 17.75% degli alberi complessivamente individuati.

Da una prima valutazione, si riportano in sintesi, in *tabella 7*, le principali criticità con le relative soluzioni proposte.

PRINCIPALI CRITICITA' RISCONTRATE	SOLUZIONI ADOTTATE	NOTE
Conteggio doppio di una stessa pianta	Inserimento di un filtro: se uno stesso albero viene conteggiato più volte, tra quei punti si considera come albero il punto ad altezza massima mentre gli altri punti verranno chiaramente eliminati.	Spesso in corrispondenza dei bordi delle nuvole di punti.
Individuazione punti che però non sono alberi (probabilmente si tratta di pali, recinzioni o staccionate)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Trattamento a priori della nuvola di punti prima di processarla; ○ Inserimento di un filtro per eliminare questi outliers valutando la loro altezza rispetto ad una altezza media locale. 	Si verifica spesso in presenza di vegetazione bassa ed omogenea.
Incertezze sul tipo di vegetazione (alberi o cespugli) presenti nelle barre	È stato necessario effettuare un sopralluogo presso San Benigno Canavese il 27/05/2020	Si verifica quando dalle nuvole di punti Lidar non si è in grado di comprendere la natura dei punti restituiti.
Incertezze sui bordi delle nuvole di punti	<ul style="list-style-type: none"> ○ Trattamento a priori della nuvola di punti prima di processarla; ○ Introduzione del filtro riguardante la rimozione di punti doppi. 	Alcuni alberi vengono identificati correttamente e altri no e spesso un albero viene conteggiato due volte proprio in corrispondenza dei bordi.
Non vengono identificati alberi in alcuni tratti dei bordi e nelle aree a bassa densità e a bassa qualità dei dati LiDAR	-	Criticità complessa da risolvere in quanto dipende dall'immagine e dalla scansione LiDAR. Laddove possibile, l'unico modo per risolvere questa problematica è pianificare, tracciare ed eseguire un nuovo piano di volo.

Tabella 7 – Principali criticità riscontrate nella prima versione dell'algoritmo e relative soluzioni proposte.

3.2.2 Versione definitiva

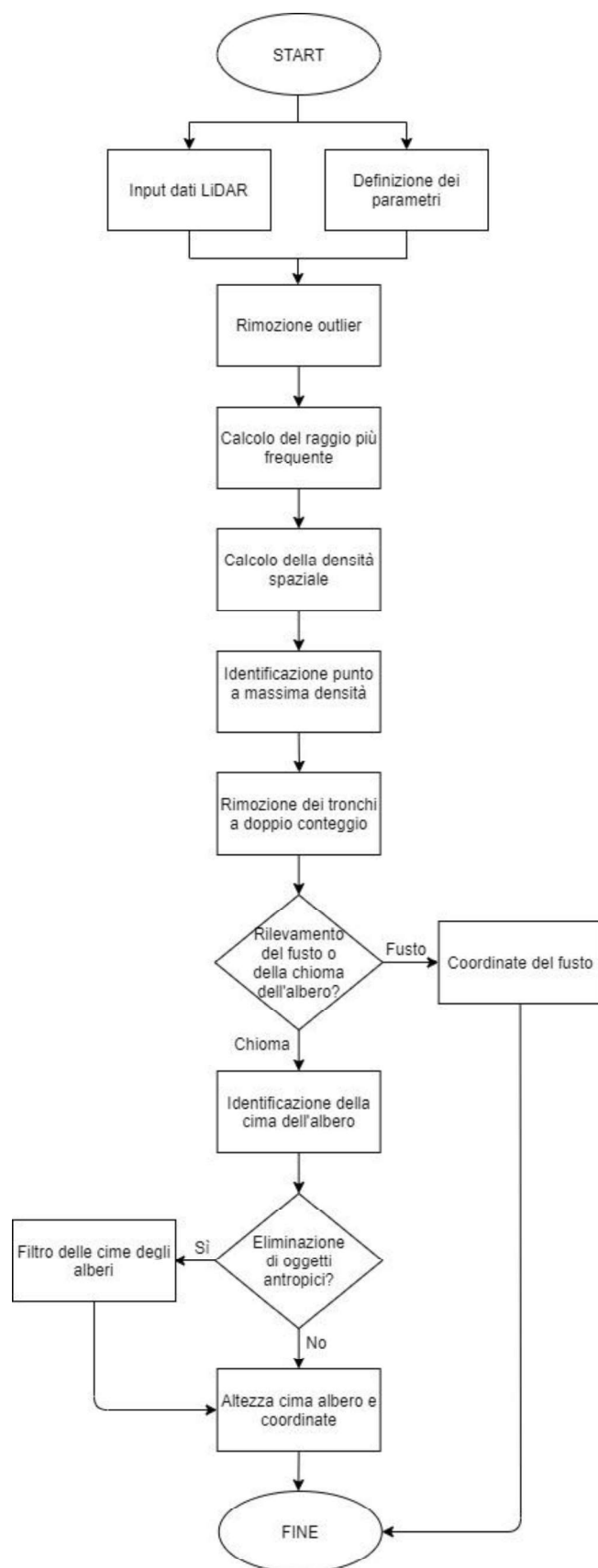


Figura 29 - Flow chart della versione definitiva dell'algoritmo per l'individuazione dei singoli alberi.

Grazie allo studio preliminare, si è riusciti a risolvere le problematiche rilevate con l'algoritmo proposto in *figura 29*.

Il file in input necessario al funzionamento dell'algoritmo è una nuvola di punti LiDAR in formato *.txt*, contenente per ogni punto le coordinate x e y, che indicano la posizione, e la coordinata z, relativa alla quota, espressa come altezza relativa. L'altezza relativa si ricava sottraendo dall'altezza assoluta la quota del suolo. In realtà gli aggettivi "relativa" ed "assoluta" si riferiscono, alla posizione dei tronchi e alla posizione della punta per capire l'altezza massima della pianta rispettivamente. L'utente può scegliere, grazie ad un settaggio iniziale, se identificare solo la posizione dei tronchi o se calcolare anche altezza delle relative punte (quindi le cime degli alberi).

Per quanto riguarda la sola individuazione della posizione dei tronchi, l'algoritmo procede nel seguente modo: per ridurre i tempi di computazione, la nuvola di punti in input originale è stata sfoltita da tutti quei punti al di sopra di una quota di soglia impostata dall'utente (oltre il quale il punto è impostato di default come un outlier) e al di sotto di una soglia inferiore per rimuovere la bassa vegetazione (arbusti, cespugli, rovi, ecc.). Si considera come soglia inferiore, una altezza caratteristica utilizzata nelle scienze forestali, in particolar modo nella dendrometria, per convenzione pari a 1.40m dal suolo che coincide anche con quel valore a cui si misurano i diametri delle piante. Come nella prima versione dell'algoritmo, si procede con il calcolo del raggio più frequente e della densità dei punti attorno ad ogni punto nell'area del raggio più frequente. Si identifica la posizione del tronco come il punto a massima densità all'interno dell'area definita dal raggio più frequente. Infine, si individuano gli eventuali punti vicini che conteggiano più piante ma che, in realtà, appartengono alla stessa, con l'apposito filtro di rimozione dei tronchi a doppio conteggio.

Se, invece, l'utente sceglie di calcolare anche le cime degli alberi, il procedimento è analogo a quello precedentemente descritto ma con l'accortezza di spostare le coordinate al di sotto del punto di massima altezza per individuare proprio la punta dell'albero (è ciò che si era svolto nella prima versione dell'algoritmo).

3.2.3 Discussione dei risultati dell'algoritmo applicato alle 12 aree campione

Al fine di esplorare più condizioni possibili, sono state selezionate 12 aree campione:

- 6 aree con alberi disposti in maniera regolare: solitamente si tratta di arboricoltura;
- 4 aree con alberi disposti non regolarmente: sono le aree prevalenti ma nonostante questo sono state selezionate meno aree rispetto al caso precedente perché laddove gli alberi sono posizionati senza un criterio logico, l'individuazione di essi dalle ortofoto risulta essere più complessa con il rischio di sottostimare o sovrastimare gli stessi. Le aree appartenenti a questa categoria si trovano lungo le sponde del torrente Orco ma tale caratteristica è puramente casuale;
- 2 aree miste ovvero con alberi in parte regolari e in parte no.

In *figura 30* si mostra la posizione spaziale delle 12 aree campionate mentre in *tabella 8*, si riportano le loro caratteristiche principali.

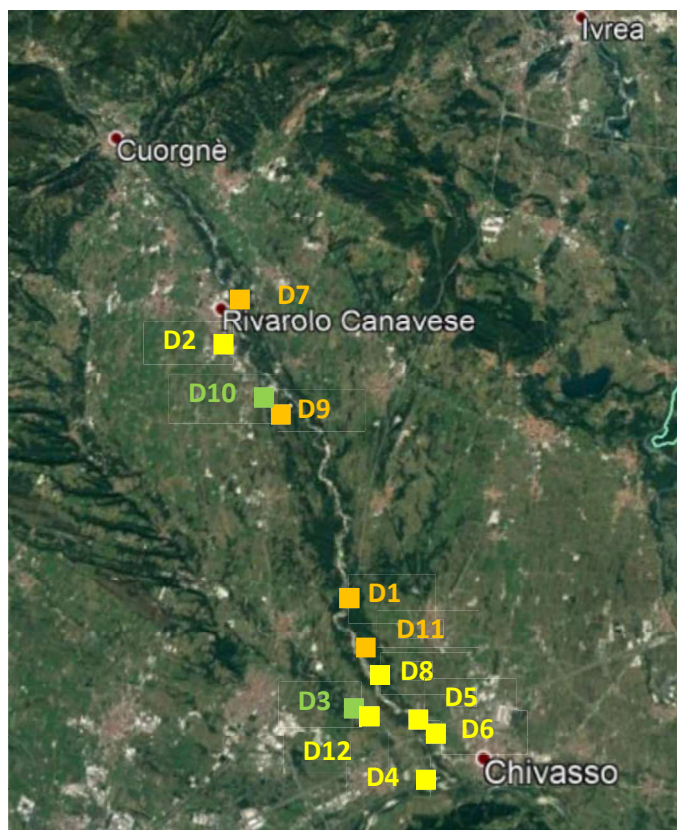


Figura 30 – Vista satellitare dell'area di studio (fonte Google Earth) con localizzazione delle 12 aree campione: in arancione aree non regolari, in giallo aree regolari e in verde aree miste.

NOME AREE	COORDINATE	DISPOSIZIONE ALBERI	PERIMETRO [m]	SUPERFICIE [m ²]
D1	45°14'22.09"N; 7°48'45.11"E	Non regolare	244	4.200
D2	45°19'01.61"N; 7°44'17.00"E	Regolare	621	24.000
D3	45°12'05.92"N; 7°50'26.65"E	Mista	834	43.900
D4	45°10'58.48"N; 7°52'07.21"E	Regolare	332	6.800
D5	45°11'43.95"N; 7°51'36.32"E	Regolare	308	5.700
D6	45°11'40.56"N; 7°51'38.08"E	Regolare	313	4.000
D7	45°20'02.54"N; 7°44'01.07"E	Non regolare	339	6.200
D8	45°12'25.12"N; 7°50'31.98"E	Regolare	316	4.100
D9	45°18'05.90"N; 7°46'03.55"E	Non regolare	250	2.700

D10	45°18'08.10"N; 7°45'59.99"E	Mista	358	8.100
D11	45°12'33.95"N; 7°50'06.50"E	Non regolare	435	12.000
D12	45°12'03.04"N; 7°50'36.59"E	Regolare	572	19.300

Tabella 8 - Caratteristiche principali delle 12 aree campione.

Le coordinate, latitudine e longitudine, riferite rispetto al sistema di riferimento EPSG:32632, indicano la posizione dell'area rispetto al centroide, cioè al centro geometrico di un poligono, della stessa area.

L'algoritmo precedentemente descritto è stato applicato alle 12 zone oggetto di studio e il risultato da esso fornito è stato confrontato con il numero reale di alberi, *tabella 9*. Quest'ultimo è stato ricavato dal conteggio manuale degli alberi stessi in campo e tramite l'utilizzo delle ortofoto acquisite durante l'esecuzione del piano di volo e di immagini in vista dall'alto reperite da Google Earth Pro delle aree investigate.

NOME AREE	DISPOSIZIONE ALBERI	NUMERO REALE DI ALBERI	NUMERO ALBERI INDIVIDUATI DALL'ALGORITMO
D1	Non regolare	98	76
D2	Regolare	284	166
D3	Mista	543	620
D4	Regolare	102	133
D5	Regolare	132	144
D6	Regolare	151	123
D7	Non regolare	130	125
D8	Regolare	109	97
D9	Non regolare	65	60
D10	Mista	185	147
D11	Non regolare	210	210
D12	Regolare	305	317

Tabella 9 – Confronto numero effettivo di alberi con quello fornito dall'algoritmo.

Dai risultati ottenuto si evince come nove aree su dodici (D1, D4 → D11) individuano correttamente la posizione e il numero degli alberi.

Si analizzano in seguito, le problematiche riscontrate nelle 3 aree escluse:

- D2: la bassa densità e quindi la scarsa qualità del dato LiDAR, non permettono la corretta individuazione degli alberi nonostante la disposizione di questi ultimi sia regolare. In *figura 31* si nota come nell'area campione, nella porzione evidenziata in rosso e non solo, non vi sia proprio alcun punto appartenente alla nuvola di punti LiDAR nonostante vi siano visibilmente dei tronchi.



Figura 31 – Visualizzazione tramite il software QGIS della nuvola di punti (in rosa) e degli alberi individuati dall'algoritmo (in verde) sovrapposti all'ortofoto con legenda.

Gli alberi che appartengono a questa categoria (cioè reali ma non individuati dalla nuvola di punti LiDAR nemmeno con un punto) sono 180 ma non sono stati conteggiati negli alberi reali perché non avrebbe avuto senso contare alberi del quale nemmeno il dato LiDAR di partenza contiene.

- D3 è un'area mista. I problemi principali di quest'area sono due: il dato LiDAR è poco denso di punti e in alcune zone non rileva alcun punto quando in realtà vi è un albero e la distanza inter-albero è molto variabile. La prima questione non è risolvibile, o meglio si può risolvere pianificando ed eseguendo un nuovo volo, mentre per la seconda si sono fatte le seguenti considerazioni: nella porzione di alberi disposti in maniera regolare gli alberi sono equispaziati con distanze l'uno dall'altro di 8-9m, mentre nella parte irregolare gli alberi sono più fitti e tale distanza è nettamente inferiore e variabile, *figura 32*. Questa diversità all'interno della stessa area, porta ad un calcolo errato della spaziatura tra i tronchi e in particolare, ciò induce ad una diminuzione complessiva di questa distanza. La porzione di area che più risente di questa diminuzione è quella regolare e il filtro che individua, e successivamente rimuove, i tronchi conteggiati più volte, non funziona come dovrebbe. Nella *figura 32* vengono evidenziati alcuni esempi di alberi in cui il filtro sull'individuazione degli alberi doppi non funziona correttamente.

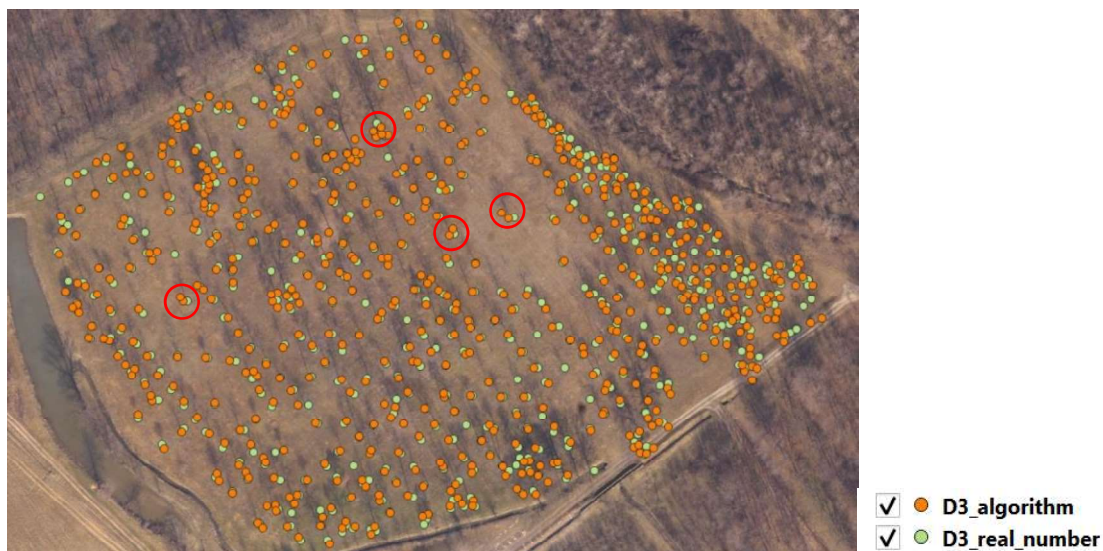


Figura 32 - Visualizzazione tramite il software QGIS degli alberi effettivi (in verde) e degli alberi individuati dall'algoritmo (in arancione) sovrapposti all'ortofoto con legenda.

In conclusione, se si applica l'algoritmo in una zona in cui la distanza inter-albero è estremamente variabile, potrebbero esserci problematiche, quindi se ci si imbatte in una zona ampia con alberi radi e alberi fitti in una sua sottoarea, è consigliato dividere il sito in due parti e processarle separatamente.

- In letteratura si è visto come uno dei limiti per l'individuazione dei singoli alberi sia il fatto che, laddove le chiome si fondono le une con le altre, la corretta determinazione del singolo tronco è molto complicata. Questa difficoltà è stata riscontrata in particolar modo nell'area D12. L'algoritmo, in presenza di chiome intrecciate e di punti a circa la stessa quota, non è in grado di identificare correttamente i valori massimi di ciascuna pianta, portando così ad una sottostima degli alberi effettivi.

In *figura 33*, si riportano per completezza i risultati dell'applicazione dell'algoritmo alle 12 aree campione.



Figura 33 – Visualizzazione grafica delle 12 aree campione a cui è stato applicato l'algoritmo: i punti rossi indicano le posizioni dei tronchi fornite come risultato da Matlab; i punti bianchi, invece, quelle misurate in campo (Latella et al., 2021) [32].

Se si inserisce una spaziatura tra gli alberi corretta, l'algoritmo individua correttamente gli stessi portando ad una maggiore precisione. Come dimostrato dal recente studio presentato nell'articolo di Latella, Sola e Camporeale [32], impostare un raggio di taglio pari a circa 20m conduce a risultati precisi e con tempi computazionali modesti indipendentemente dalla disposizione spaziale della vegetazione.

Successivamente ci si è chiesti se, diminuendo la densità di punti, l'algoritmo riuscisse a individuare ancora la vegetazione e, in caso affermativo, fino a quale percentuale di densità. La rimozione casuale dei punti è stata svolta attraverso il software CloudCompare e si è osservato come fino a 2 punti al metro quadro, gli alberi vengono individuati correttamente; al di sotto di tale valore, corrispondente ad un ricampionamento superiore all'80%, la precisione diminuisce drasticamente conducendo ad un errore di posizione elevato (per maggiori dettagli, il riferimento all'articolo è il seguente [32]).

Avendo testato l'algoritmo per ogni tipologia possibile di disposizione spaziale della vegetazione esistente, per densità di punti inferiore e siccome l'algoritmo non richiede l'inserimento di alcun parametro, esso si può utilizzare anche se non si è completamente a conoscenza delle caratteristiche ambientali del sito. È bene ricordare, però, che le missioni in campo sono sempre utili sia per comprendere la bontà dei dati LiDAR, sia per confrontare i siti rilevati dal LiDAR durante il volo con la conformazione attuale delle aree d'interesse, sia per paragonare i dati LiDAR con la disposizione

spaziale della vegetazione e verificare la presenza o meno di isole/barre laterali generate da più recenti fenomeni alluvionali.

Per estendere l'algoritmo riguardante l'identificazione dei singoli alberi a tutto il tratto di circa 30 km, è stato necessario normalizzare le altezze. Avendo a disposizione i DTM contenente le quote del terreno e i punti della vegetazione in formato *.las*, dalla differenza tra l'altezza assoluta e la quota del suolo, si ottiene l'altezza relativa.

L'algoritmo presentato è utile per il calcolo della biomassa e per successivamente impostare i parametri quali altezza degli alberi, diametri e numero di alberi a metro quadro per la simulazione su Delft3D (riferimento *Capitolo 4*).

3.3 Calcolo della biomassa arborea

La geometria della pianta è molto complessa perché il tronco tende ad aprirsi ad ombrello con i rami ma nel seguente studio si assume come un cilindro di base pari ad un cerchio, cioè il diametro della pianta, e di altezza pari all'altezza dell'albero. Si tratta della cosiddetta legge di Da Vinci [47] e successivamente dimostrata da Eloy nel 2011 [48], risalente al XV secolo, e secondo la quale, appunto, la somma delle sezioni dei rami coincide con la sezione stessa del tronco. Tale assunzione è necessaria per il calcolo della densità di biomassa e anche per caratterizzare correttamente la scabrezza in quanto sul software Delft3D si dovranno inserire i valori di scabrezza locali che sono funzione del numero di piante al metro quadro e del diametro delle piante.

3.3.1 Descrizione curva allometrica

Ricavata l'altezza delle piante dall'analisi dei dati LiDAR (ultimo ritorno meno il primo ritorno), si possono utilizzare le curve allometriche. Le curve allometriche sono delle relazioni descritte da leggi di potenza che permettono di descrivere le caratteristiche di una pianta.

Sulla base dei punti misurati in campo, viene realizzato un polinomio di regressione, ovvero un polinomio interpolante che non passerà esattamente per i punti ma ne effettuerà una approssimazione, solitamente nella forma:

$$y = A * y^B$$

Dove A e B sono due costanti caratteristiche: A è un parametro che varia in base alla tipologia di organismi considerati mentre B è l'esponente che modifica le dimensioni delle grandezze coinvolte (West et al. 1997 [49]).

Le curve allometriche che si utilizzeranno saranno quelle diametro-altezza, cioè quelle che legano l'altezza della pianta al diametro che mediamente presenta una pianta di quella altezza.

A causa della sito-specificità di tale legge, in letteratura non sono presenti curve allometriche relative all'area di studio o dati da poter utilizzare o integrare alle curve estrapolate in campo. Come anticipato nel *sottocapitolo 2.5*, sono state misurate le altezze e i diametri all'interno di aree campione, in prossimità delle sponde del torrente Orco, delle specie arboree incontrate, cioè salici, pioppi, querce e robinie. I dati misurati durante l'attività in campo del 21/02/2020 hanno permesso, quindi, di definire le curve allometriche che rappresentano il legame tra l'altezza di una pianta e il suo diametro suddivise per specie.

In *tabella 10* vengono riportati, in base alle diverse specie arboree, i valori dei parametri A, B e gwd, *green wood density* (Miles and Smith, 2009 [50]), che indica la densità di legno fresco necessari per calcolare la biomassa.

SPECIE	A	B	gwd [Mg/m ³]
Pioppo	1,4697	0,6431	0,9000
Quercia	3,7344	0,4539	1,2500
Robinia pseudoacacia	2,5509	0,5469	1,0100
Salice	1,9202	0,6073	0,9800

Tabella 10 - Parametri allometrici suddivisi per tipologia di specie arborea e gwd (Miles and Smith, 2009 [50]).

In *figura 34* vengono mostrate le curve allometriche per ogni specie arborea, trovate tramite la regressione dei dati di campo (in blu), a cui sono stati integrati i dati raccolti in campo del Rio Cinca in Spagna (Latella, 2018) [51], (Latella et al., 2020) [25]. Grazie alle similarità idrologica e climatica e alla presenza delle stesse specie arboree, è stato possibile effettuare tale integrazione.

Grazie alle similarità idrologica e climatica e alla presenza delle stesse specie arboree, si è provato ad includere in tali grafici anche il database del Rio Cinca in Spagna (in rosso). Si osserva come i dati seguano un trend e come l'integrazione con i dati raccolti in campo del Rio Cinca in Spagna (Latella et al., 2020 [25]) possa andare ad irrobustire il poco fornito database.

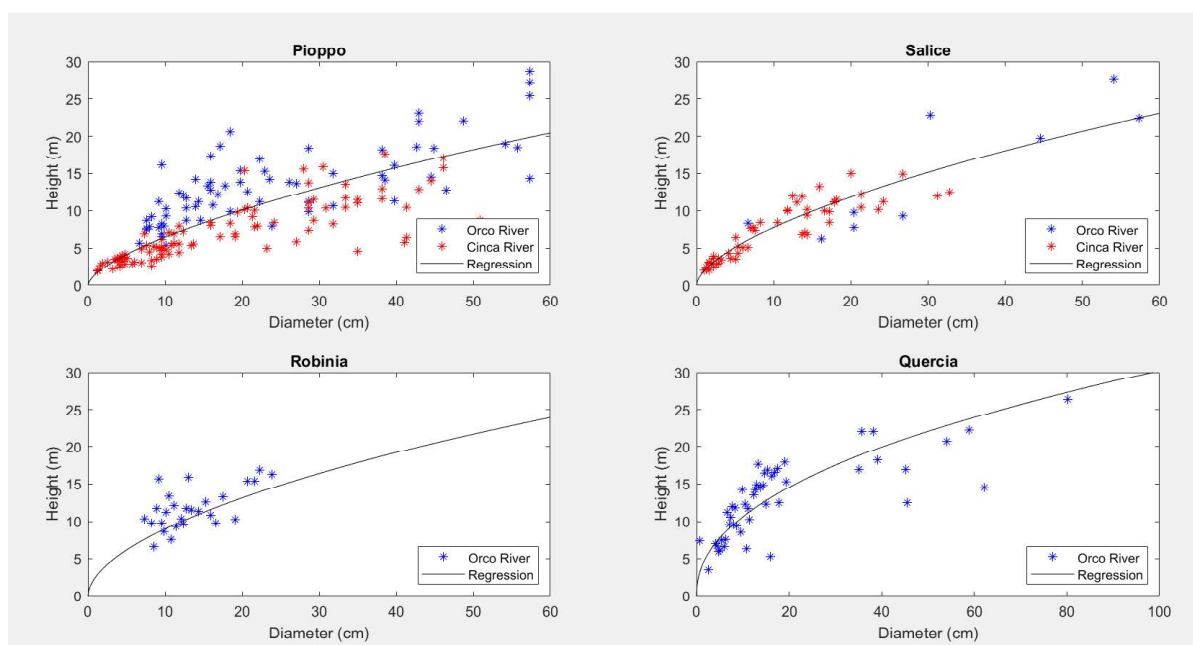


Figura 34 - Curve allometriche delle specie pioppi e salici (con integrazione del database del Rio Cinca), robinie e querce.

Nell'area di studio di interesse del torrente Orco, le specie arboree presenti sono:

- Castagneti;
- Alneti planiziali di ontano nero;
- Querceti di rovere;
- Quercu-carpineti;
- Robinieti;
- Saliceti e pioppeti.

Grazie all'INFC [52], Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi Forestali di Carbonio, è stato possibile effettuare una classificazione della vegetazione forestale, *figura 35*. Ricordando che la vegetazione forestale si suddivide principalmente in aghifoglie e latifoglie, successivamente verrà riportata l'analisi solamente di quest'ultima in quanto alcune sue specie sono parte della vegetazione riparia.

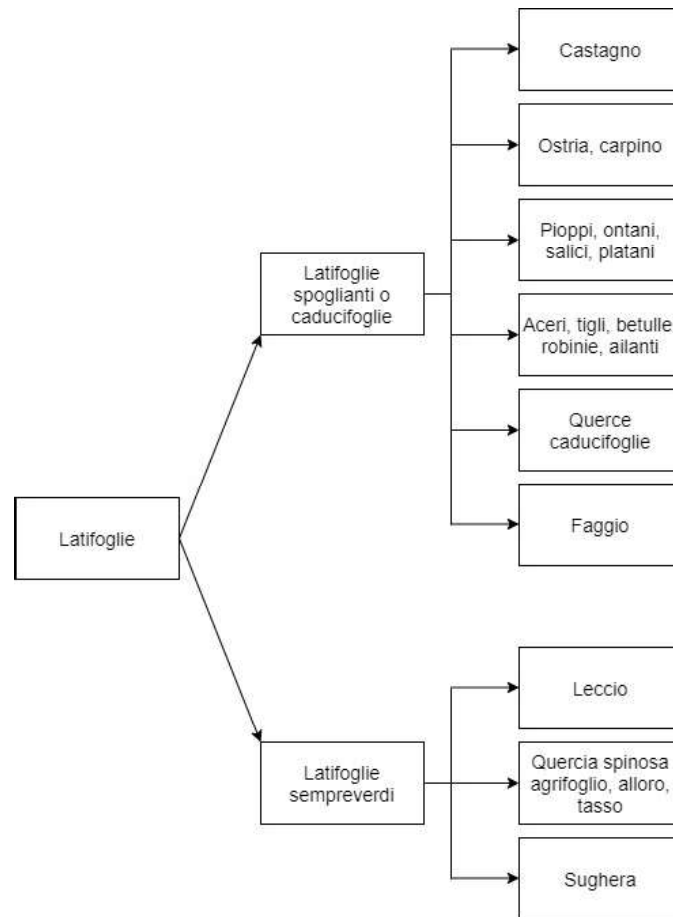


Figura 35 - Schema classificazione delle latifoglie (INFC, 2003 [52]).

Siccome non per tutte le specie si ha a disposizione una curva allometrica, è stato necessario effettuare una macro-distinzione:

- La curva allometrica delle robinie è stata utilizzata per robinia pseudoacacia e castagno: l'INFC rileva la presenza di castagneti in boschi misti e viene associato a vari tipi di latifoglie quali rovere, aceri e betulle;
- Le curve allometriche di salici e pioppi sono state unificate e quella ottenuta è stata utilizzata per le seguenti specie: salici, pioppi e alneti planiziali di ontano nero, in quanto l'INFC [52] classifica l'ontano nello stesso raggruppamento di salici e pioppi;
- La curva allometrica riguardante la specie della quercia è stata utilizzata per i querceti di rovere e i querceto-carpineti in quanto queste ultime si sviluppano in prossimità di querce adulte.

Riassumendo, i coefficienti dei sopra riportati macro-raggruppamenti che vengono utilizzati per la calibrazione della densità di biomassa sono:

SPECIE	A	B	gwd [Mg/m ³]
Salice e pioppo	1,6950	0,6252	0,94
Quercia	3,7344	0,4539	1,25
Robinia pseudoacacia	2,5509	0,5469	1,01

Tabella 11 - Parametri allometrici suddivisi per tipologia di specie arborea utilizzati nel calcolo della densità di biomassa.

A partire dall'output generato dal precedente algoritmo riguardante l'individuazione di singoli alberi e dalla carta forestale che individua le aree con le diverse specie arboree, si può procedere con il calcolo della biomassa sia del singolo albero, sia complessiva che tiene conto di tutti gli alberi e della specie a cui appartengono in una determinata area.

3.3.2 Descrizione algoritmo

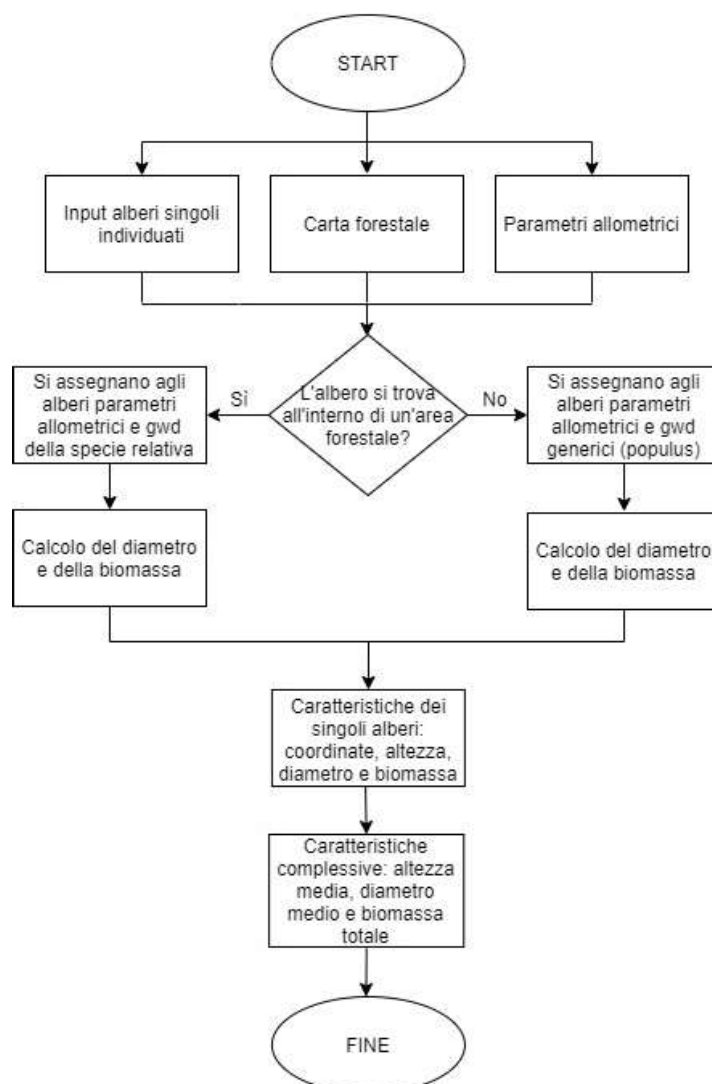


Figura 36 - Flow chart calcolo della densità di biomassa.

Come si evince dal flow chart in *figura 36*, all'algoritmo vengono forniti in ingresso:

- il file .txt contenente la posizione degli alberi ricavati dall'algoritmo precedente riguardante appunto l'individuazione dei singoli alberi a partire dalla nuvola di punti LiDAR;
- i parametri allometrici;
- le aree reperite dalla carta forestale (*figura 37*) suddivise per le specie riportate in *tabella 10*:



Figura 37 - Carta Forestale dell'intera area di studio del torrente Orco con visualizzazione dei macro-raggruppamenti (spp. Indica l'abbreviazione di sp. pl. (species plures)) e relativa legenda riprodotta con l'uso del software QGIS.

Grazie all'inventario forestale del torrente Orco si hanno a disposizione informazioni precise sulla disposizione spaziale delle specie arboree. Combinando la carta forestale all'algoritmo si riesce a caratterizzare ogni albero in termini di coordinate spaziali, altezza e specie.

Per ogni albero presente all'interno del file in ingresso, l'algoritmo verifica se è presente o meno all'interno delle aree forestali. In caso positivo assegna loro i parametri allometrici e la densità di legno verde (*gwd*) relativi alla specie appartenente; in caso negativo assegna agli alberi delle caratteristiche allometriche generiche assunte pari a quelle della specie dei pioppi. Successivamente si calcolano il diametro, *D*, in metri, e la densità di biomassa, *V*, in tonnellate.

L'espressione per il calcolo del diametro, si ricava dall'inverso della relazione allometrica:

$$H = A \cdot D^B$$

Si esplicita quindi il diametro:

$$D = \left(\frac{H}{A}\right)^{\frac{1}{B}}$$

Dove l'altezza *H* è espressa in metri.

Si prosegue con il calcolo della densità di biomassa, sia dei singoli alberi conoscendo l'altezza attraverso la relazione sottostante, sia la biomassa complessiva procedendo con la somma delle singole biomasse appartenenti alla stessa specie.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H \cdot \lambda \cdot \rho}{4}$$

Dove:

- D è il diametro misurato all'altezza del petto ovvero quel diametro calcolato ad una altezza dal suolo pari a 1,4m;
- H è l'altezza dell'albero;
- λ è il numero di tronchi al metro quadro;
- ρ è la densità di legno fresco, cioè il parametro gwd, green wood density.

Nella formula sopra riportata, il calcolo della densità di biomassa non comprende anche la biomassa fogliare perché, come si evince dalla tabella riepilogativa sottostante, si tratta di una piccola percentuale che può essere trascurata. La *tabella 12* riassume gli autori e le relative percentuali di fogliame trovate da studi in letteratura.

ARTICOLI IN LETTERATURA	LEGNI DURI (querce, abeti, frassini, etc.)	LEGNI DOLCI (betulle, castagni, pioppi, etc.)
Ker (1980) [53]	2%	8%
Freedman et al. (1982) [54]	dal 2% al 6%	dal 7% al 19%
Jerkins et al. (2003) [55]	dal 3% al 12%	dal 10% al 30%

Tabella 12 - Studi reperiti in letteratura sulle percentuali di fogliame in base al tipo di legno.

Per il calcolo della biomassa vi è quindi bisogno delle grandezze sopra riportate e in particolare della relazione che sussiste tra il diametro, D, e l'altezza, H, delle specie arboree.

I file di output generati sono due: uno fornisce le caratteristiche dei singoli alberi attraverso relazioni allometriche specie-dipendenti quali coordinate ed altezza di ogni albero (forniti dall'output dell'algoritmo precedente), il diametro (calcolato con la curva allometrica) e la biomassa (calcolata a partire da diametro e altezza); l'altro fornisce le caratteristiche generali e complessive dell'area in esame attraverso un file .txt contenente i punti che ricadono all'interno delle aree, l'altezza media degli alberi, il diametro medio, la densità e la biomassa totale espressa in tonnellate.

3.3.3 Discussione dei risultati del calcolo della biomassa applicato alle 12 aree campione
In *tabella 13* si riportano i risultati della biomassa calcolata per ogni area campionata.

NOME AREE	BIOMASSA [Mg]		
	Populus spp.	Robinia Pseudoacacia	Quercus spp.
D1	52.95	44.69	-
D2	18.50	-	-
D3	445.93	-	-
D4	20.58	-	-
D5	150.72	-	-
D6	150.51	-	-
D7	743.93	-	-
D8	1517.55	-	468.26
D9	-	82.80	-
D10	88.21	88.17	-
D11	1725.34	-	791.33
D12	323.57	-	-

Tabella 13 – Densità di biomassa calcolata per ogni area campione.

In presenza, all'interno della stessa area campione, sia della specie dei pioppi e sia di alberi al di fuori delle zone forestali a cui sono stati assegnati i parametri allometrici dei pioppi, il valore della biomassa riportata in *tabella 13* comprende la somma complessiva delle due quantità. In particolare, tale passaggio si è effettuato per l'area D11. In *figura 38* si riporta il plot generato dall'algoritmo:

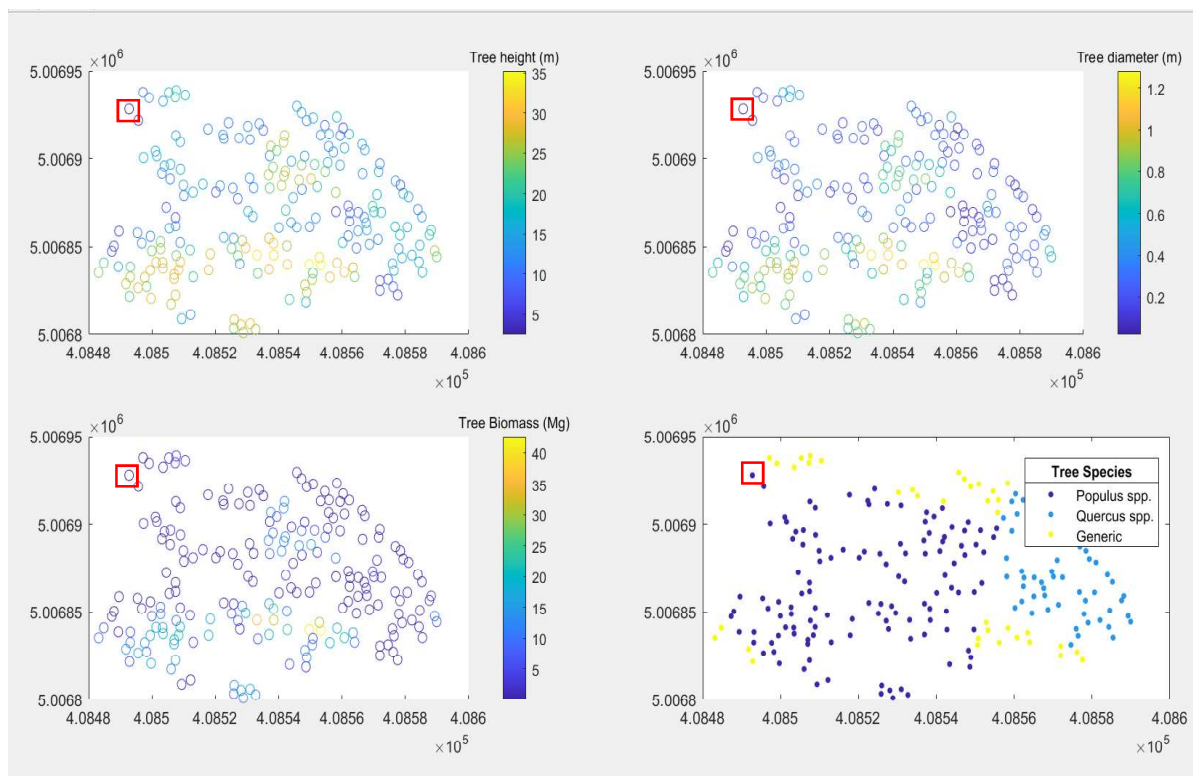


Figura 38 – Dettaglio plot Matlab area campione D11. In alto a sx: disposizione delle altezze degli alberi individuati; in alto a dx: disposizione dei diametri; in basso a sx: grafico biomassa arborea; in basso a dx: i punti rappresentano la posizione degli alberi individuati suddivisi per specie.



Figura 39 - Visualizzazione tramite il software QGIS dell'output generato dall'algoritmo relativo all'area D11 sovrapposto all'ortofoto con legenda.

Per verificare che la calibrazione della densità impostata (Miles and Smith, 2009 [50]) sia corretta, si sono cercati in letteratura i paper contenenti informazioni sul peso specifico e altre proprietà del legno. La maggior parte di essi fa riferimento a studi e misurazioni effettuati su alberi campione situati in America (Heath et al., 2009 [56]; Miles and Smith, 2009 [50]) dove le specie arboree e le condizioni di crescita possono essere diverse rispetto a quelle presenti nell'area di studio situata nel Nord Italia.

A livello del singolo angolo, dalla figura 38, si osserva, per esempio, come l'albero di pioppo selezionato nel quadrante in basso a destra, abbia un diametro di circa 20 cm, un'altezza di circa 5 m e a cui corrisponde una densità di biomassa di 1 Mg. Da un forum [57] riguardante lavori forestali si è riusciti a reperire una tabella che associa il peso di alcune specie legnose al diametro del tronco. La densità di biomassa del singolo albero è stata confrontata con il valore tabellato della massa relativa ad un albero della stessa specie e dello stesso diametro e ciò ha permesso di verificare che l'ordine di grandezza è leggermente sovrastimato. Osservando nello specifico le specie dei pioppi e delle querce, calibrare la densità di legno fresco (gwd) con i parametri, rispettivamente, 0.94 e 1.25 (Miles and Smith, 2009 [50]) porta ad una sovrastima della biomassa.

Calibrando la densità di legno fresco secondo i parametri (riportati in tabella 14) reperiti dall'istituto Agrario Sartor [58], la densità di biomassa del singolo albero risulta essere verosimile al valore effettivo, pertanto i risultati sulla biomassa complessiva in tabella 13 fanno riferimento a tali coefficienti.

SPECIE	gwd [Mg/s]
Salici e pioppi	0.78
Querce	1.05
Robinie	1.01

Tabella 14 – Green wood density calibrata.

Un'attenta osservazione dei grafici dei risultati ha portato alla seguente considerazione: indipendentemente dalla specie, per alberi con diametro maggiore di 0.9-1 metro, la densità di biomassa è sovrastimata probabilmente perché, come si osserva dalla figura 34, per elevati valori del diametro vi è una carenza di dati reperiti manualmente portando a una debolezza delle code delle curve allometriche. Sarebbe necessario effettuare più misurazioni su alberi con diametri elevati per irrobustire le curve allometriche delle diverse specie.

4. Modellazione idrodinamica fluviale mediante il software Delft3D

Il presente capitolo ha lo scopo di mostrare il procedimento relativo alla modellazione idrodinamica fluviale del tratto oggetto di studio del torrente Orco svolta attraverso il software Delft3D Flexible Mesh Suite 2021 HMWQ (Delft3D FM) sviluppato da Deltares [59].

Viene descritto, inizialmente, il funzionamento generale di Delft3D e, successivamente, si procede con la descrizione della costruzione del modello idraulico in tutte le sue fasi.

Le portate simulate sono state calcolate con i percentili. Sono state effettuate 20 simulazioni idrodinamiche bidimensionali per osservare le aree di inondazione, le profondità e i livelli raggiunti, variando la portata del tratto in esame. Il software utilizza le *Shallow Water Equations* per risolvere le equazioni in regime di moto vario e, pertanto, richiede l'impostazione di condizioni al contorno per la risoluzione delle equazioni differenziali.

Nel *sottocapitolo 4.1* vengono illustrate le principali impostazioni del software a livello generale mentre il *sottocapitolo 4.2*, riguarda la vera e propria applicazione per la realizzazione finale del modello del torrente Orco.

4.1 Delft3D Flexible Mesh e impostazioni del modello idrodinamico

4.1.1 Introduzione al software Delft3D Flexible Mesh

Delft3D Flexible Mesh è un programma di modellazione 3D leader a livello mondiale per studiare l'idrodinamica, il trasporto e la morfologia dei sedimenti e la qualità dell'acqua per ambienti fluviali, estuari e costieri, progettato sia per esperti che non.

Come illustrato nel manuale di istruzioni del software fornito durante la fase di download del medesimo, le aree di applicazione di Delft3D FM sono innumerevoli:

- Flussi causati da maree e dal vento;
- Flussi fluviali;
- Reti di canali rurali;
- Prese d'acqua e scarichi (fluviali o di acque reflue);
- Simulare tsunami, tempeste, uragani, flussi e livelli d'acqua, salti idraulici;
- Propagazione delle onde;
- Trasporto di materiale disciolto (sedimenti in sospensione e di fondo) e sostanze inquinanti;
- Morfologia dei sedimenti e dei fondali;
- Qualità dell'acqua ed ecologia;

Delft3D FM è inoltre in grado di gestire le interazioni tra questi processi grazie alla sua suddivisione in diversi moduli che possono interagire l'uno con l'altro siccome sono raggruppati intorno a un'interfaccia comune. Uno di questi moduli è D-Flow Flexible Mesh (D-Flow FM) e serve per effettuare simulazioni idrodinamiche (e di trasporto) multidimensionale (1D, 2D e 3D) su griglie strutturate e non strutturate (*figura 40*).

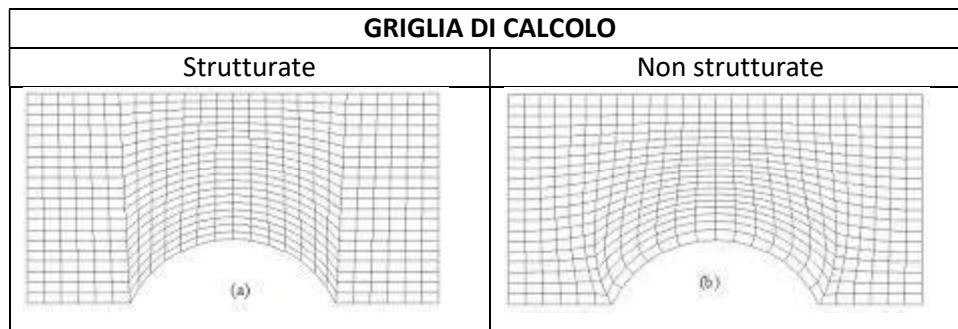


Figura 40 - Esempio di griglia strutturata (a) e non strutturata (b) [60].

Il carattere non strutturato della *mesh* non permette più di numerare i nodi della griglia in maniera razionale e ordinata come per quelle strutturate ma, l'utilizzo di una geometria (rettangolare) o la combinazione di più forme (triangolare e/o pentagonale per esempio) consente di realizzare *mesh* con geometrie più complesse e, come preannuncia il termine *Flexible Mesh*, flessibili conducendo ad una rappresentazione di migliore qualità.

Il principale file che comanda il modulo Delft3D FM è *.mdu* (*Master Definition Unstructured*) ed è il più importante documento perché è costituito da diverse sezioni comunicanti tra loro che presentano al loro interno rimandi a file presenti nella cartella di Input:

- Geometry: contiene riferimenti geometrici; in particolare, presenta riferimenti alla *mesh* non strutturata, file **_net.nc*, ai *LandBoundaryFile*, file **.ldb*, che rappresentano le polilinee utilizzate per la definizione dei limiti spaziali entro il quale effettuare il calcolo, file **_fxw.pliz*, **.pliz* e **.ini* per la modellazione delle strutture e altri;
- Numerics, Wind e Waves: sono sezioni che non sono state considerate in questo specifico caso studio e riguardano valori su turbolenza, soglie numeriche, parametri su vento e propagazione di onde;
- Physics: lista vari parametri fisici, il più importante è *Uniform friction coefficient* in cui è stato impostato il coefficiente di Manning pari a 0.03 calcolato nel *sottocapitolo 2.4*.
- Time: in questa sezione sono impostati i tempi di simulazione con i tempi corrispondenti di inizio e fine simulazione espressi in secondi;
- External forcing: file **.ext*, richiama le due condizioni al contorno impostate che sono: la portata per la sezione di monte, definita nel file *start.pli*. Aprendo tale file si individua la geometria, come è fatta e dove è posizionata la Boundary Condition start. Stesso discorso per *end.pli* in cui è stato impostato l'invariante di Riemann come condizione al contorno di valle (vedi *paragrafo 4.1.5* per spiegazione più dettagliata sulle condizioni al contorno).
- Trachytopes: si tratta di una sezione importante perché svolge il calcolo dell'attrito tramite la vegetazione aumentando, pertanto, la scabrezza del fondo.
- Output: si scelgono gli output che si vogliono ottenere dalla simulazione.

Le sezioni sopra riportate presentano una serie di parametri impostati di default che possono essere modificati dall'utente in base alle sue esigenze.

Il secondo modulo di riferimento è RGFGGRID in cui è possibile creare ed editare, a partire dai *LandBoundaryFile* la griglia non strutturata del canale e successivamente delle aree golenali (*paragrafo 4.1.3* per maggiori dettagli).

L'ultimo modulo utilizzato è Delft3D-QUICKPLOT che permette la visualizzazione e l'animazione dei risultati forniti dalla simulazione (*sottocapitolo 4.4* per maggiori dettagli). Quickplot è stato sviluppato

con Matlab (i file output si possono esportare, oltre alle più comuni estensioni, anche in formato compatibile con il software Matlab, .m) e presenta l'interfaccia in *figura 41*.

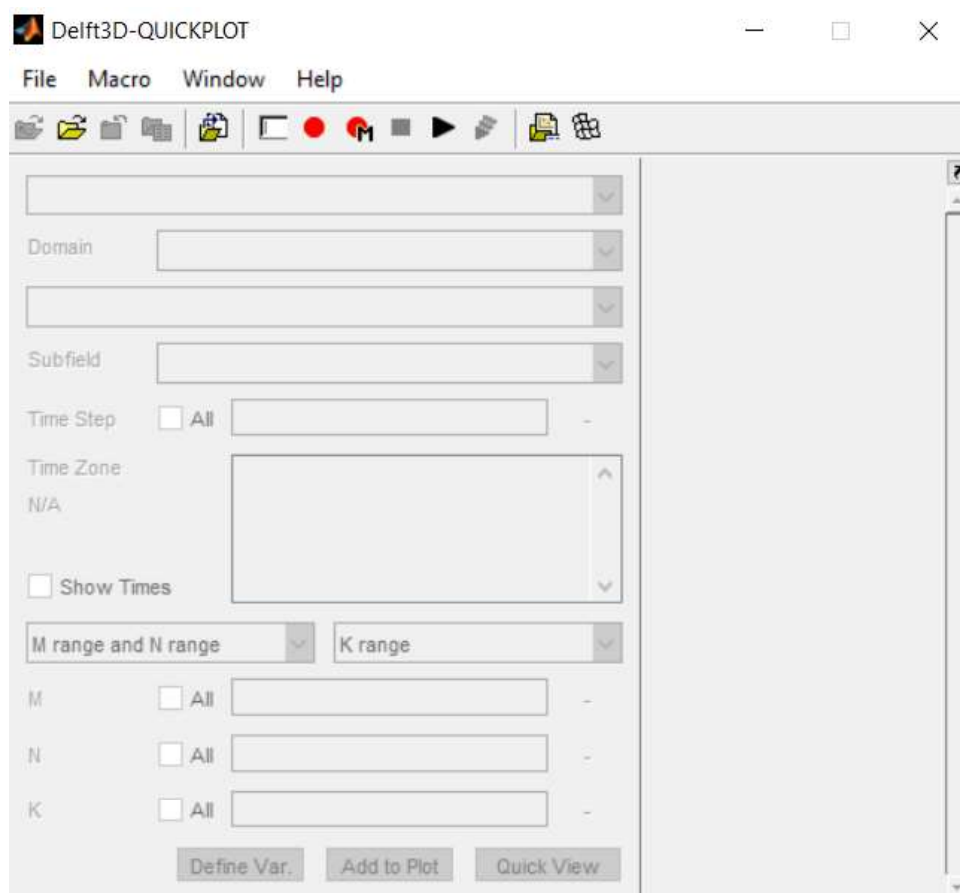


Figura 41 - Interfaccia Delft3D-QUICKPLOT.

4.1.2 Risoluzione equazioni del modello idrodinamico bidimensionale

Il modulo D-Flow Flexible Mesh risolve le equazioni idrodinamiche in ambito fluviale con l'approssimazione di acqua basse (*Shallow Water Equations*). Tali equazioni sono costituite da un'equazione di continuità o di conservazione della massa e da due equazioni del moto o di conservazione della quantità di moto.

Le equazioni del moto sono nella forma:

$$\begin{aligned}\widetilde{U}_{,t} + \widetilde{U}\widetilde{U}_{,x} + \widetilde{V}\widetilde{U}_{,y} &= -gh_{,x} + \frac{\tau_x^f + \tau_x^s}{\rho Y} + \frac{1}{\rho Y} \left[\frac{\partial}{\partial x} (Y\widetilde{T}_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (Y\widetilde{T}_{xy}) \right] \\ \widetilde{V}_{,t} + \widetilde{U}\widetilde{V}_{,x} + \widetilde{V}\widetilde{V}_{,y} &= -gh_{,y} + \frac{\tau_y^f + \tau_y^s}{\rho Y} + \frac{1}{\rho Y} \left[\frac{\partial}{\partial x} (Y\widetilde{T}_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (Y\widetilde{T}_{yy}) \right]\end{aligned}$$

In cui:

U e V sono le componenti della velocità;

h è il tirante idrico;

\widetilde{T}_{ij} sono gli sforzi di Reynolds;

τ_i sono le tensioni tangenziali che fanno riferimento alla superficie libera (apice s) oppure al fondo (apice f);

ρ è la densità del fluido;

g è l'accelerazione di gravità.

L'equazione di continuità si presenta come:

$$Y_{,t} + (Y\tilde{U})_{,x} + (Y\tilde{V})_{,y} = 0$$

Le *Shallow Water Equations* si presentano come un sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali del primo ordine non lineare: per essere risolte si procede tramite integrazione numerica, dopo averle applicate ad ogni cella della griglia di calcolo.

4.1.3 Maglia di calcolo

Delft3D Flexible Mesh intende per *mesh*, una griglia composta da celle flessibili di riferimento per il calcolo delle soluzioni delle equazioni idrodinamiche e morfodinamiche del modello matematico.

Delft3D FM permette di creare diversi tipi di *mesh* (triangolare, quadrangolare, pentagonale, esagonale per esempio) in funzione della zona, fluviale in questo caso, in cui si intende creare la griglia. Nel caso in esame, la suddivisione in elementi finiti viene definita ibrida in quanto è stata utilizzata:

- Una griglia a maglia rettangolare per il canale principale;
- Una griglia a maglia triangolare per le piane alluvionali.

Molto spesso, inoltre, vengono utilizzate *mesh* a diversa geometria come collegamento tra griglie poco fitte e griglie più fitte di celle ma nel presente elaborato non è stato necessario effettuare questo passaggio.

Dopo la creazione delle griglie, sarà necessario procedere con l'ortogonalizzazione della *mesh* in quanto le celle devono rispettare il requisito di ortogonalità definito come il coseno dell'angolo tra un lato di una cella e un collegamento di flusso. Il valore ideale sarebbe avere un angolo pari a 90° (figura 42) [61].

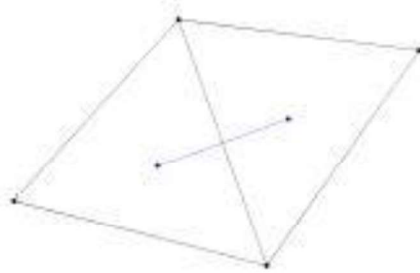


Figura 42 - Requisito di ortogonalità tra due celle triangolari adiacenti [61].

Con $\varphi = 90^\circ$ perfetta ortogonalità tra due celle triangolari adiacenti.

Affinchè l'ortogonalità tra le celle sia rispettata, sarà necessario controllare che essa sia al massimo pari a 0.05 (consigliato 0.02 per una maggiore affidabilità della risoluzione numerica).

4.1.4 Bed Level

Dopo aver realizzato la maglia di calcolo, è necessario associare ad ogni cella il relativo valore di elevazione. Il dato altimetrico che descrive la quota della superficie del terreno è fornito dal DTM: tramite una conversione del DTM stesso in un file di estensione .xyz, la nuvola di punti si presenterà come un insieme di coordinate x, y e z (la quota).

Nella sezione *Bed level* su Delft3D FM si possono inserire le quote del terreno: interpolando il DTM in formato .xyz, con la maglia di calcolo, si otterrà, per ogni cella della *mesh*, il relativo dato altimetrico.

4.1.5 Condizioni al contorno

Per la risoluzione delle equazioni differenziali sulle quali si basa il software Delft3D FM, è necessario inserire due condizioni al contorno (rispettivamente una a monte e una a valle del modello).

Delft3D FM permette di scegliere tra:

- *Water level*: tirante idrico;
- *Velocity*: velocità (normale e tangenziale);
- *Discharge*: portata;
- *Riemann Invariant*: l'invariante di Riemann valuta il gradiente longitudinale come una combinazione di velocità e profondità;
- *Neumann Gradient*: gradiente di Neumann ovvero il gradiente del tirante idrico.

Nel caso in esame, la condizione al contorno di monte è stata definita attraverso la portata in ingresso espressa in m^3/s . Si sono eseguite tante simulazioni quante le portate di riferimento selezionate in *figura 7 (sottocapitolo 1.3)*.

La condizione al contorno di valle, invece, è l'invariante di Riemann posto uguale a 0 in modo da annullare il gradiente longitudinale di velocità e livello idrico ovvero si intende annullare la riflessione dell'onda di piena sul bordo della cella di calcolo.

Per le simulazioni, il software necessita di una condizione iniziale. Di default è impostato un dato di tipo “dry” in cui si considera una condizione iniziale “asciutta” ovvero priva di acqua che, all'aumentare del tempo, gradualmente si riempirà grazie all'impostazione della portata come condizione al contorno nella sezione di monte.

4.1.6 Trachytape

Nelle simulazioni su Delft3D, la modellazione della vegetazione avviene mediante lo strumento dei trachytape che permette di effettuare il calcolo dell'attrito aggiuntivo dovuto alla vegetazione.

I *trachytapes* modellano la vegetazione tramite una rappresentazione cilindrica delle piante in cui l'altezza del cilindro è data dall'altezza massima della pianta e il diametro è pari al diametro del tronco: questo strumento assume la vegetazione come dei cilindri che ostruiscono il flusso dell'acqua aumentando pertanto la scabrezza del fondo. Noti quindi, curve allometriche classificate per specie, specie arboree, altezze e densità areale delle piante, è possibile quantificare la resistenza indotta dalla vegetazione per ogni singola cella della maglia di calcolo.

Nel modello idrodinamico utilizzato è stato scelto di calcolare la rugosità idraulica della vegetazione sommersa attraverso il coefficiente di Chezy indotto dalla vegetazione, tramite l'implementazione della formulazione di Barneveld basata sullo studio di Klopstra [62].

L'equazione che calcola la scabrezza idraulica è la seguente:

$$C = \frac{1}{h^{\frac{3}{2}}} \cdot \left\{ \frac{2}{\sqrt{2A}} \cdot \left(\sqrt{C_3 \cdot e^{k\sqrt{2A}} + u_{v0}^2} - \sqrt{C_3 + u_{v0}^2} \right) + \frac{u_{v0}}{\sqrt{2A}} \right. \\ \cdot \ln \left(\frac{\left(\sqrt{C_3 \cdot e^{k\sqrt{2A}} + u_{v0}^2} - u_{v0} \right) \cdot \left(\sqrt{C_3 + u_{v0}^2} + u_{v0} \right)}{\left(\sqrt{C_3 \cdot e^{k\sqrt{2A}} + u_{v0}^2} + u_{v0} \right) \cdot \left(\sqrt{C_3 + u_{v0}^2} - u_{v0} \right)} \right) + \frac{\sqrt{g \cdot (h - (k - h_s))}}{k} \\ \cdot \left((h - (k - h_s)) \cdot \ln \left(\frac{(h - (k - h_s))}{z_0} \right) - h_s \cdot \ln \left(\frac{h_s}{z_0} \right) - (h - k) \right) \left. \right\}$$

Equazione 1 - Equazione per il calcolo della scabrezza idraulica.

Dove:

- h è l'altezza idrica;

- $A = \frac{m \cdot D \cdot C_D}{2\alpha}$

In cui:

m = numero di steli a metro quadrato;

D = diametro del tronco [m];

C_D = coefficiente di resistenza [-];

α = scala caratteristica delle lunghezze [-];

- k è l'altezza della vegetazione [m];

- z_0 è la scala delle lunghezze per la rugosità del letto dello strato superficiale [m] che si calcola attraverso la formulazione:

$$z_0 = h_s \cdot e^{-F}$$

In cui h_s è la distanza tra la cima della vegetazione e il letto virtuale dello strato superficiale e si calcola come:

$$h_s = g \cdot \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E^2 \cdot k^2 \cdot (h - k)}{g}}}{2 \cdot E^2 \cdot k^2}$$

Dove E ed F si ricavano da:

$$E = \frac{\sqrt{2 \cdot A} \cdot C_3 \cdot e^{k\sqrt{2 \cdot A}}}{2 \cdot \sqrt{C_3 \cdot e^{k\sqrt{2 \cdot A}} + u_{v0}^2}}$$

$$F = \frac{k \cdot \sqrt{C_3 \cdot e^{k\sqrt{2 \cdot A}} + u_{v0}^2}}{\sqrt{g \cdot (h - (k - h_s))}}$$

In cui u_{v0} si ricava da u_{s0} :

$$u_{v0} = u_{s0} / \sqrt{i}$$

$$u_{s0} = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot i}{C_D \cdot m \cdot D}}$$

C_3 si ottiene dai coefficienti C_1 e C_2 :

$$C_1 = \frac{\frac{C_3 = C_2/i}{-2 \cdot g \cdot i \cdot (h - k)}}{\alpha \cdot \sqrt{2 \cdot A} \cdot (e^{k\sqrt{2 \cdot A}} + e^{-k\sqrt{2 \cdot A}})}$$

$$C_2 = -C_1$$

dove:

g = accelerazione di gravità [m/s^2];

i = gradiente di energia [-].

Infine, il parametro α si ricava da:

$$\alpha = \max(0,001; 0,01 \cdot \sqrt{h \cdot k})$$

L'equazione 1 calcola, quindi, la scabrezza idraulica a partire da caratteristiche della vegetazione (m , D , C_D , k), tirante idrico, h , e dalla scala di lunghezza caratteristica, α .

L'equazione viene, infine, applicata ad ogni cella di calcolo del modello realizzato. Per ogni cella sarà necessario quindi indicare due parametri:

- Altezza della vegetazione;
- Numero di piante al metro quadrato (dato ricavato nel *sottocapitolo 3.2* riguardante l'algoritmo sull'individuazione dei singoli alberi) moltiplicato per il diametro a corrispondente all'altezza della vegetazione.

4.1.7 Modellazione delle strutture

L'ultimo passaggio prima di effettuare le simulazioni è proprio quello di inserire nella progettazione del modello idrodinamico bidimensionale, strutture ed infrastrutture intercettate dal corso d'acqua e quindi presenti nell'area in esame. L'inserimento nel progetto delle strutture permette, pertanto, una corretta progettazione del modello. Le strutture presenti sono divise principalmente in due categorie in base alla diversa modalità di modellazione:

- ponti;
- opere idrauliche (scogliere, argini, prese irrigue e scolmatori).

Come in molti altri software di simulazione idraulica bidimensionale come HEC-RAS, anche con Delft3D FM, i ponti possono essere inseriti secondo due modalità:

- come pile di ponti in cui l'elemento pila è modellato come infinitamente alto dal software e si inserisce il relativo coefficiente di forma alla pila. In questo caso la portata deve essere moderata oppure l'impalcato del ponte non deve essere interessato dalla corrente;
- come elementi forati (*culvert*) dove è presente un foro all'interno della struttura quando l'impalcato viene sormontato dalla piena.

Le opere idrauliche sopra citate hanno principalmente la funzione di regimazione delle acque, cioè quel complesso di interventi che permette di ridurre le erosioni e funzione irrigua tramite la distribuzione delle acque per utilizzare al meglio la risorsa idrica.

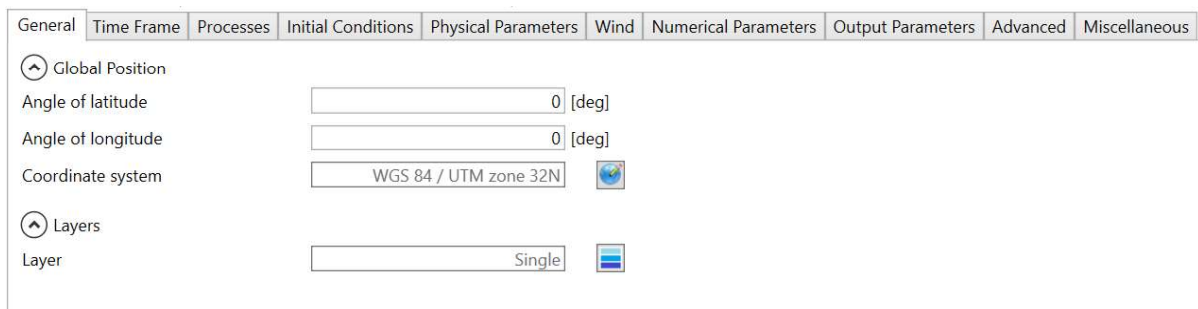
4.2 Costruzione del modello idrodinamico del torrente Orco

Per costruire il modello idrodinamico si sono seguiti i seguenti passaggi:

- 1) Definizione del sistema di riferimento;
- 2) Costruzione della *mesh*;
- 3) Definizione del *bed level* tramite importazione del DTM e successiva interpolazione con la *mesh*;
- 4) Realizzazione dei *Trachytopes*;
- 5) Inserimento di strutture e infrastrutture fisse intercettate lungo l'area di studio come, per esempio, ponti, scogliere, argini, prese irrigue e scolmatori;
- 6) Definizione delle *boundary conditions*.

Tutti gli step sopra elencati e seguiti per la costruzione del modello idraulico, vengono discussi in seguito.

Una volta inizializzato un progetto *.dsproj*, il primo step consiste nell'impostare, nella sezione *General* presente sull'interfaccia di Delft3D, il sistema di riferimento. Si decide di utilizzare il sistema WGS 84 / UTM zone 32 N (vedi figura 43) per compatibilità con il sistema di riferimento del DTM di progetto.



General | Time Frame | Processes | Initial Conditions | Physical Parameters | Wind | Numerical Parameters | Output Parameters | Advanced | Miscellaneous

Global Position

Angle of latitude: 0 [deg]

Angle of longitude: 0 [deg]

Coordinate system: WGS 84 / UTM zone 32N

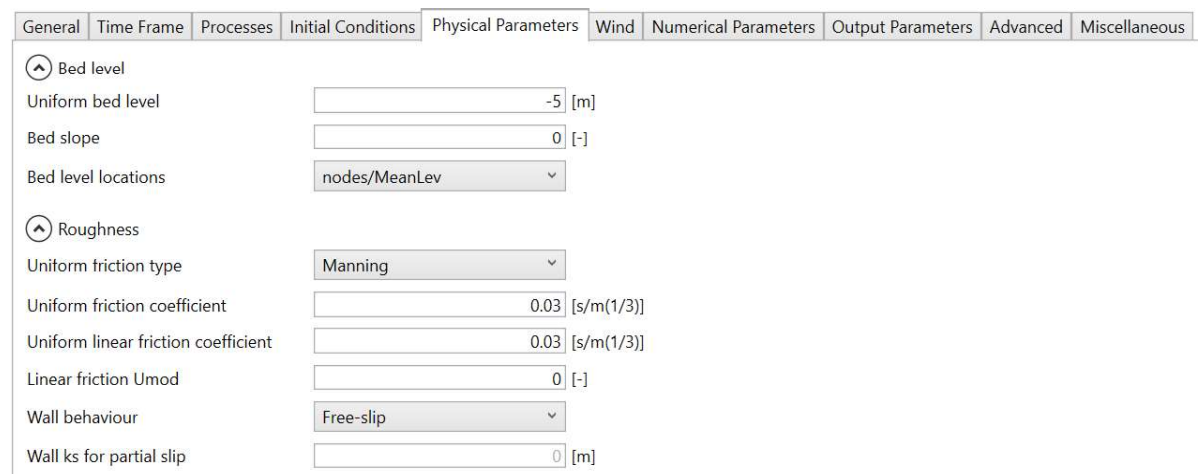
Layers

Layer: Single

Figura 43 - Delft3D, impostazione del sistema di riferimento nella sezione *General*.

Nella sezione *Time Frame*, il tempo di simulazione si imposta in maniera analoga al tempo presente nelle *Boundary Condition*.

Nella sezione *Physical Parameters* (vedi figura 44) si imposta, nella sottosezione *Roughness*, il coefficiente di Manning pari a 0,03 calcolato nel sottocapitolo 2.4.



General | Time Frame | Processes | Initial Conditions | Physical Parameters | Wind | Numerical Parameters | Output Parameters | Advanced | Miscellaneous

Bed level

Uniform bed level: -5 [m]

Bed slope: 0 [-]

Bed level locations: nodes/MeanLev

Roughness

Uniform friction type: Manning

Uniform friction coefficient: 0.03 [s/m(1/3)]

Uniform linear friction coefficient: 0.03 [s/m(1/3)]

Linear friction Umod: 0 [-]

Wall behaviour: Free-slip

Wall ks for partial slip: 0 [m]

Figura 44 - Delft3D, impostazione del coefficiente di Manning nella sezione *Physical Parameters*.

Il secondo passaggio consiste nella costruzione della *mesh* nella sezione *Grid* che deve, prima di tutto, tener conto del tracciato del corso d'acqua (zona di alveo attivo) e della sua fascia di divagazione (zone golenali). Nel presente lavoro, si è optato per una griglia dalle seguenti caratteristiche:

- ❖ maglia rettangolare di dimensioni 7x5 metri: la griglia curvilinea del canale principale è stata costituita da celle rettangolari (*aspect ratio* fino a 1:2 o 1:3) ricordando che lo sviluppo in lunghezza delle celle rettangolari è nella direzione del flusso.

La *mesh* del canale si realizza a partire da due *spline* che delimitano l'area entro il quale si sviluppa l'alveo. Si realizza una *regular grid*, una griglia a celle rettangolari regolare, e successivamente si corregge l'ortogonalità delle celle (tramite le operazioni sull'editor RGFGRID: *Operations* → *Orthogonalise Grid*), in modo che non si superi il valore 0,05 di ortogonalità (è consigliato non superare 0,02), *figura 45*.

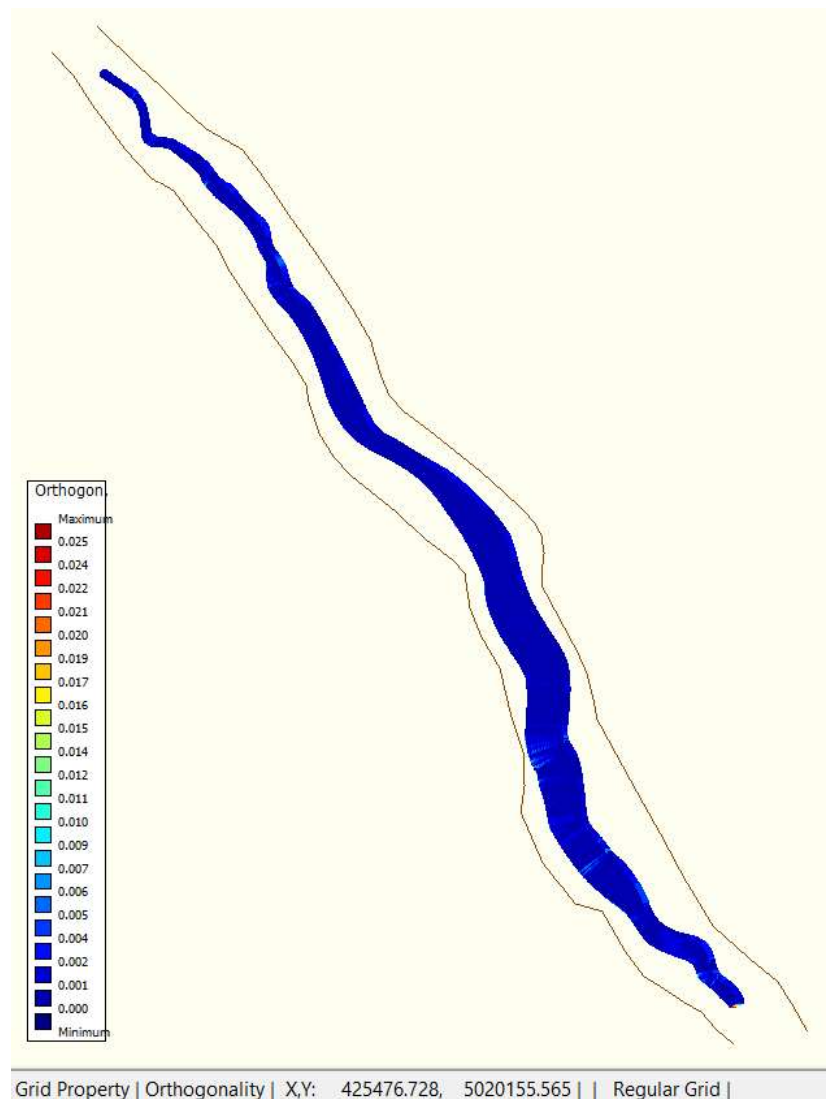


Figura 45 - Editor RGFGRID, visualizzazione della *mesh* rettangolare relativa al solo canale attivo.

Si converte in *Irregular grid* tramite i comandi: *Operations* → *Convert Grid* → *Regular to Irregular*.

Successivamente si procede con l'estensione della *mesh* alle aree golenali.

- ❖ maglia triangolare lungo lo sviluppo delle piane alluvionali. Si creano dei poligoni entro il quale si intende ottenere la griglia di calcolo triangolare. Si sceglie prima una sponda e poi si ripete lo stesso procedimento per l'altra. Il poligono si crea dal comando *Edit* → *Polygons* → *Polygon between grid boundaries*, si seleziona il primo punto della mesh rettangolare sulla sponda e l'ultimo (figura 46).

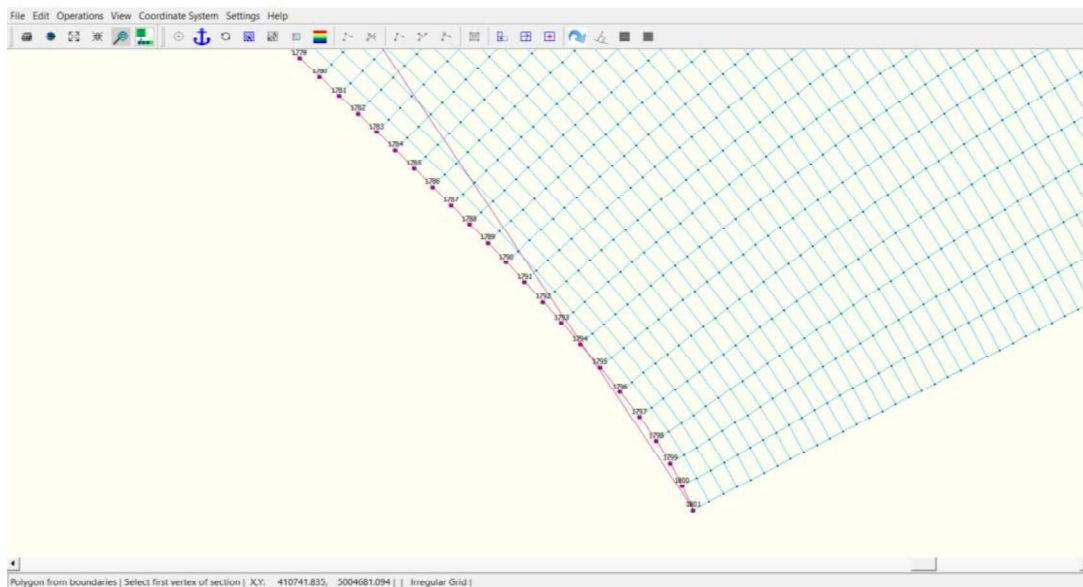


Figura 46 – Editor RGFGRID, dettaglio nella sezione di valle durante la creazione del poligono sponda destra orografica.

Si aggiungono successivamente altri punti per rappresentare circa la *spline* golenale. Il consiglio è quello di non creare un poligono troppo complicato perché questo potrebbe influenzare la mesh triangolare rendendola, in un secondo momento, difficilmente ortogonalizzabile. Si ottiene il seguente risultato:



Figura 47 - Editor RGFGRID, poligono sponda destra orografica entro il quale si realizzerà la mesh triangolare.

Successivamente *Edit* → *Polygon* → *Refine (equidistant)*: si seleziona l'ultimo punto della mesh rettangolare del canale, dopo il primo, si imposta un *Segment length* di circa la stessa dimensione della lunghezza delle celle rettangolari. Attraverso i comandi *Operations* → *Domain* → *New* e poi *Operations* → *Grow grid from Polygons*, si crea la mesh triangolare vera e propria. L'operazione richiederà un po' di tempo in quanto il tratto è di estensione pari a circa 30 km e soprattutto perchè in prossimità del canale i triangoli saranno più fitti mentre la loro dimensione si amplierà allontanandosi da essa. Si otterrà il seguente risultato:

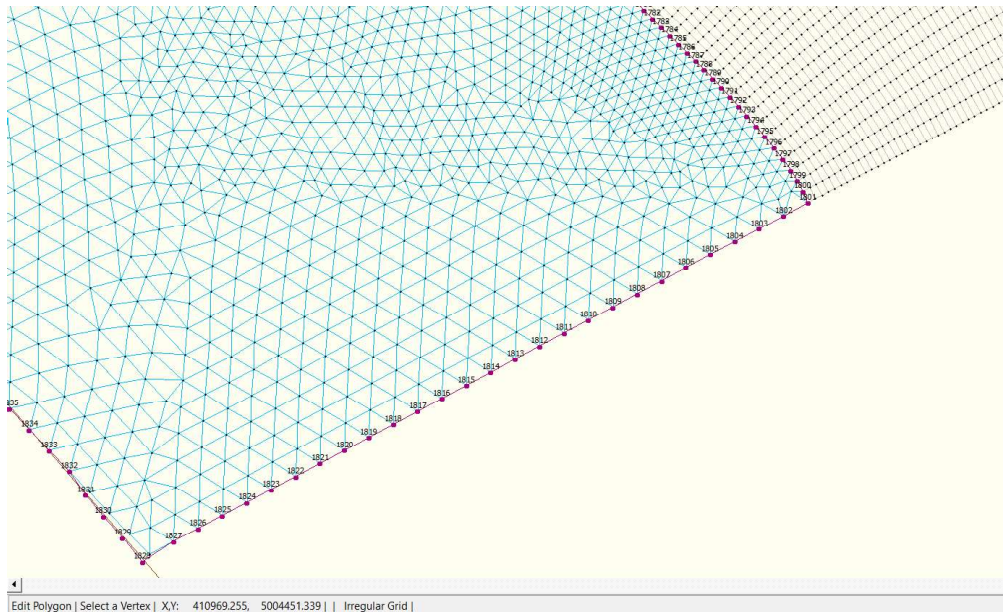


Figura 48 - Editor RGFGRID, dettaglio nella sezione di valle della creazione della mesh triangolare.

Si nota come l'area del canale è diventata inattiva (colore grigio). Per attivarla si usa il comando *Edit* → *Multiselect*, la si seleziona e successivamente con il comando *Operations* → *Grid* → *Merge grids*, si uniscono in una griglia unica in corrispondenza del canale (figura 49).

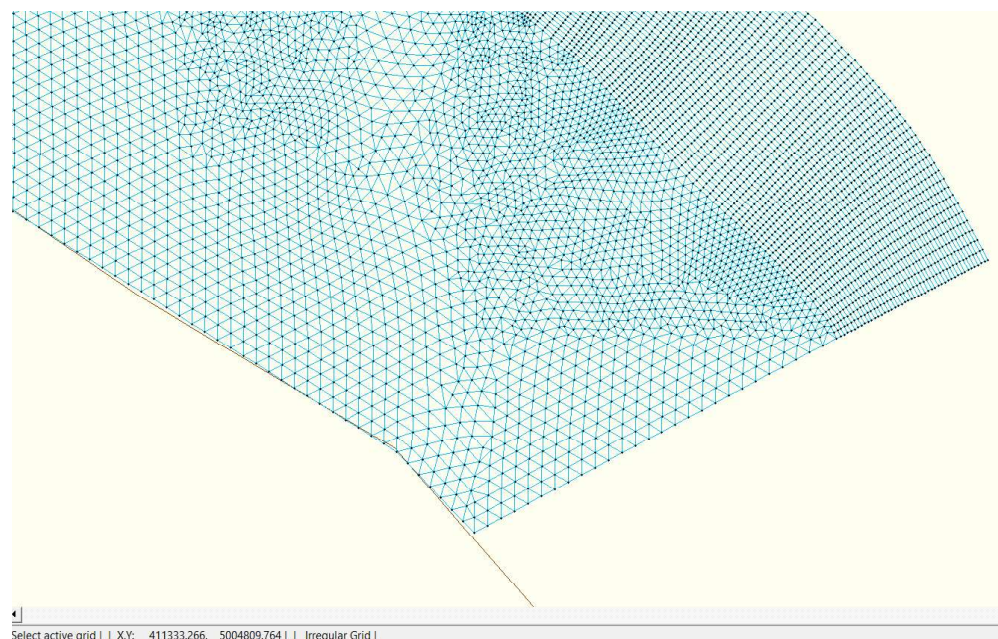


Figura 49 - Editor RGFGRID, dettaglio del tratto di valle delle mesh unite. Si notino la mesh rettangolare unita a quella triangolare.

Gli stessi procedimenti verranno ripetuti anche per la sinistra orografica del torrente Orco al fine di completare la maglia di calcolo.

Il terzo step riguarda l'importazione del DTM di progetto in formato .xyz. Tornando sull'interfaccia iniziale del software, nella sezione *Spazial Operations* si seleziona il layer *Bed Level* e, tramite il comando *Import*, si importa il file contenente i dati altimetrici. Con riferimento al *paragrafo 2.1.4*, è necessario interpolare il DTM con la griglia di calcolo mediante il comando *Interpolate*. Delft3D FM permette di selezionare il metodo in interpolazione per il *bed level*, cioè permette di scegliere tra:

- Triangulation: esegue una triangolazione Delauney sul set di punti campione prima di proiettare sulla griglia. Dato un gruppo di punti in un piano di triangoli, una triangolazione viene detta di Delaunay quando si creano delle circonferenze circoscritte ai triangoli e se all'interno di tali circonferenze non vi giace alcun punto [63];
- Averaging: effettua una media dei valori presenti nella cella di dimensioni definite dall'utente).

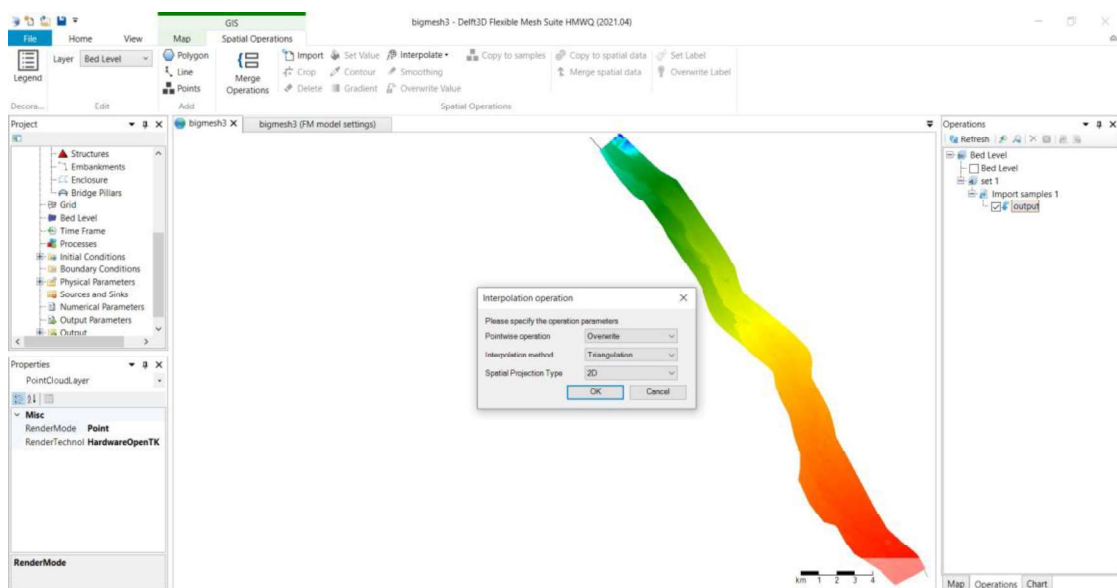


Figura 50 - Delft3D FM, operazione di interpolazione tra DTM e celle della maglia di calcolo.

Si è scelto di utilizzare il metodo della triangolazione per interpolare l'altimetria alla maglia di calcolo, ottenendo:

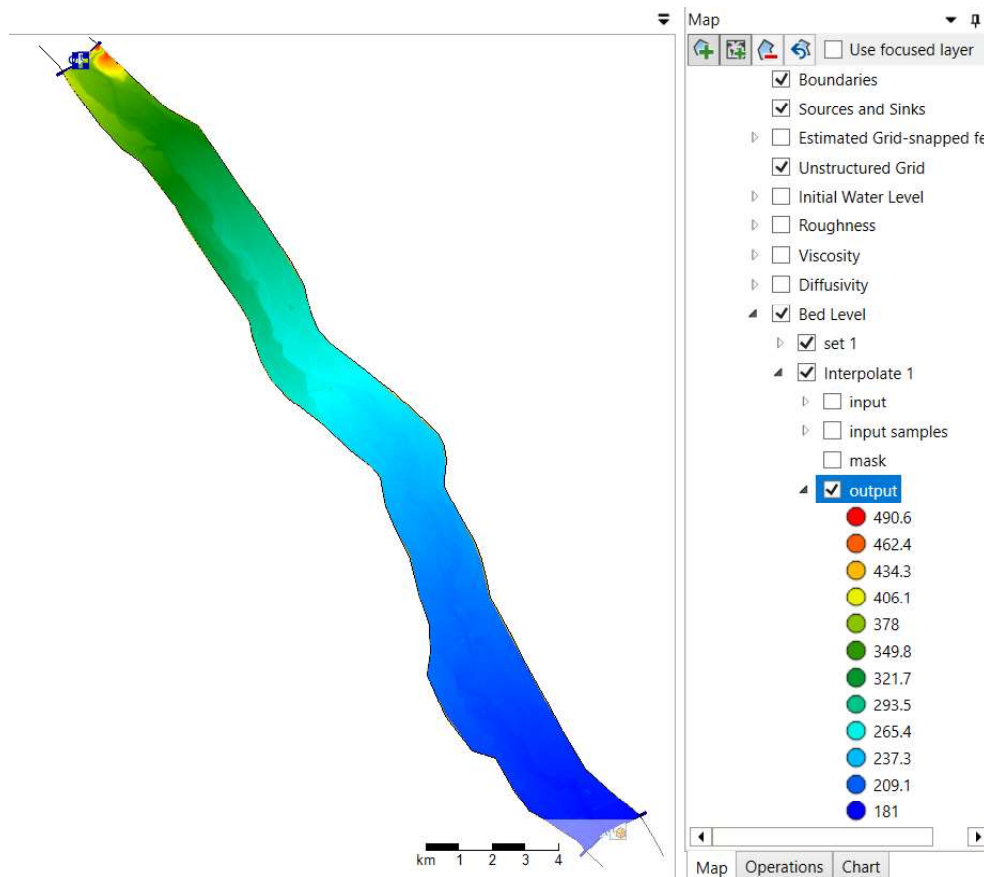


Figura 51 - Delft3D FM, bed level interpolato.

Nel file *.mdu*, per quanto concerne il *Bed Level*, si impostano due parametri: *Conveyance2D* e *BedLevType*. *Conveyance2D* può assumere valori da -1 a 1 se si intende considerare il livello del terreno costante a tratti nello spazio oppure $1 < \text{Conveyance2D} \leq 3$ per assumere la variazione lineare delle quote del terreno. Nella realizzazione del modello si è scelto di non mantenere il valore di default pari a -1 ma il parametro *Conveyance2D* è stato impostato pari a 3 (*analytic-2D conv*). *BedLevType*, invece, riguarda la specifica della batimetria ed è stato mantenuto il valore di default pari a 3 (può variare da 1 a 6): indica che ai nodi, i livelli delle facce sono la media dei valori dei nodi.

All'interno del file *.mdu* si possono impostare anche, nella sezione *Trachytopes*, i medesimi. I *trachytopes* vengono definiti tramite due file: il primo di estensione *.ttd* e il secondo *.arl*.

- *.ttd* contiene la definizione dei trachytopes.
In particolare, si presenta come un documento di 4 colonne (*figura 52*). Analizzando la prima riga della *figura 52* (da sinistra verso destra): 1 indica il valore del trachytopes che identifica che all'interno di una determinata cella, c'è una vegetazione alta 5 metri (terzo dato), che ha un diametro da 0 a 10 metri (quarto dato) e l'equazione che si intende utilizzare è la 151¹ (secondo termine) che si ricava dal manuale di Delft3D FM.



File	Modifica	Formato	Visualizza ?
1	151	5	0.10
2	151	10	0.20
3	151	15	0.30
4	151	20	0.35
5	151	25	0.40
6	151	30	0.40

Figura 52 - File .ttd utilizzato per la definizione dei trachytopes.

- *.arl* contiene la distribuzione dei trachytopes definiti nel file *.ttd*.
In particolare, si presenta come un documento a 5 colonne (*figura 53*) in cui vi sono rispettivamente da sinistra verso destra: le coordinate x e y del centro di ogni cella, la coordinata z (pari a 0), il valore del trachytopes corrispondente definito nel file *.ttd* mentre l'ultimo valore indica che si intende considerare il 100% della cella (1).



File	Modifica	Formato	Visualizza ?	
395485.157336	5027348.567767	0	2	1
395483.512674	5027351.474047	0	4	1
395492.945258	5027343.051236	0	3	1
395491.109041	5027348.729615	0	3	1
395497.902335	5027339.556049	0	1	1
395496.212298	5027342.460341	0	0	1
395505.676932	5027334.063796	0	3	1

Figura 53 - Estratto del file .arl contenente la distribuzione dei trachytopes.

Per quanto concerne lo step successivo, reperire dati sui ponti e in particolare sulle dimensioni e sulle forme delle pile dei ponti, informazioni necessarie per l'inserimento di strutture e infrastrutture fisse nel modello, è complesso. Il non inserimento non pregiudica la qualità del risultato della simulazione con Delft3D FM in quanto le portate simulate sono contenute e soprattutto il modello idrodinamico è stato definito a fondo fisso. Per quanto riguarda scogliere ed argini, essi risultano già compresi nel rilievo, pertanto è possibile non inserirli.

Il passaggio conclusivo della realizzazione del modello idraulico riguarda l'inserimento delle *Boundary Conditions*, ovvero le condizioni al contorno che permettono la risoluzione delle equazioni differenziali su cui si basa il modello idrodinamico bidimensionale.

¹ L'equazione 151 è la formula di Barneveld 1 (pag. 257 del manuale d'uso di Delft3D FM [61]).

Vengono definite a partire dal tracciamento di due polilinee che ne definiscono la posizione, rispettivamente una per monte e la seconda per la sezione di valle, linee blu osservabili in *figura 51*.

Per la sezione di monte si è scelto di utilizzare come condizione al contorno la portata. In particolare, le portate oggetto di simulazione sono state selezionate attraverso il metodo dei percentili nella sezione idrologica (*sottocapitolo 1.3, figura 7*) ma per completezza vengono nuovamente riportate in forma tabellare:

PERCENTILI	PORTATE SIMULATE
0.05	3.29
0.1	4.38
0.15	4.94
0.2	5.63
0.25	6.43
0.3	7.28
0.35	8.26
0.4	9.34
0.45	10.3
0.5	11.7
0.55	14.2
0.6	16.7
0.65	21.8
0.7	27.9
0.75	33.4
0.8	44.2
0.85	55.6
0.9	72.5
0.95	99
Tempo di ritorno 1 anno	221
Tempo di ritorno 5 anni	858
Tempo di ritorno 10 anni	1050
Tempo di ritorno 20 anni	1249
Tempo di ritorno 50 anni	1496
Tempo di ritorno 100 anni	1800

Tabella 15 - Riepilogo portate simulate nel modello idraulico.

L'interfaccia di Delft3D FM per l'inserimento della condizione al contorno di monte si presenta come in figura 54:

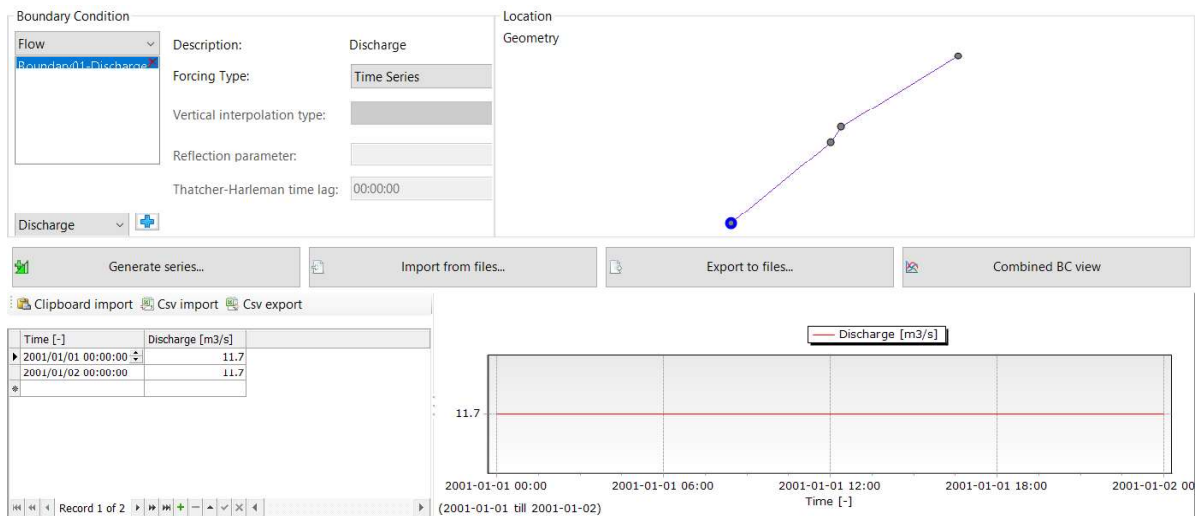


Figura 54 - Interfaccia condizione al contorno di monte (portata).

Le portate, *Discharge*, in tabella sono state inserite, una alla volta in funzione del tempo, *Time*.

Per quanto riguarda la condizione al contorno di valle, invece, si è impostato l'invariante di Riemann pari a 0 per annullare la riflessione dell'onda di piena.

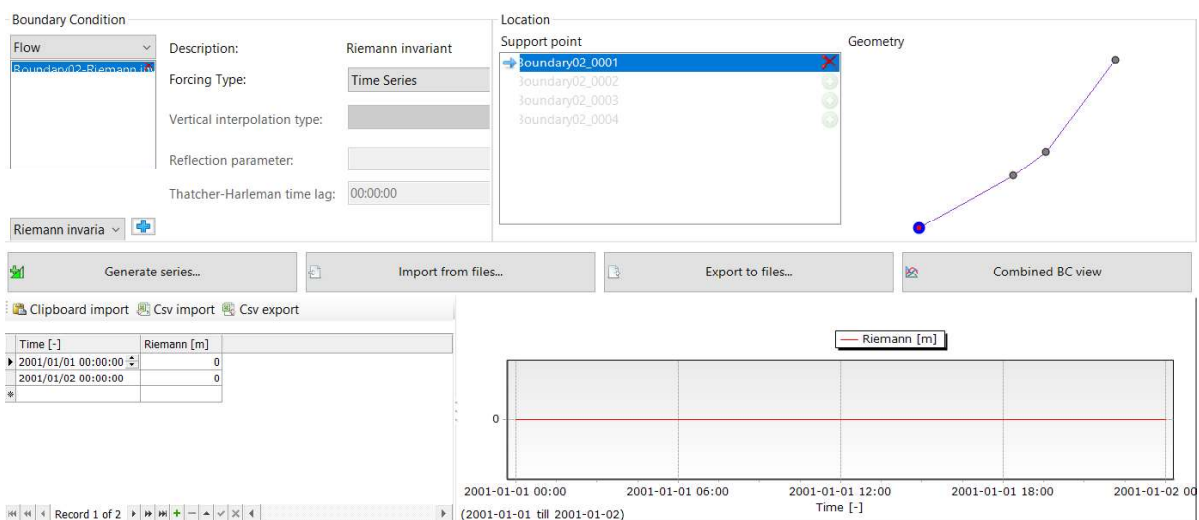


Figura 55 - Interfaccia condizione al contorno di valle (invariante di Riemann).

4.3 Validazione del modello numerico

Una volta completata la modellazione bidimensionale, per appurare la bontà dei risultati ottenuti, si procede con il confronto tra le aree allagate di un evento reale di noti portata media e livelli medi raggiunti e quelle generate dal modello numerico.

L'evento preso come riferimento è quello del 13/06/2021 del quale sono noti:

- immagini satellitari resi disponibili da Sentinel [64];
- stazione di misura, livelli giornalieri e portate giornaliere reperiti dall'archivio dei bollettini emessi da Arpa Piemonte [65]. I bollettini idrologici di sintesi contengono dati sulle stazioni di misura principali per i più significativi corsi d'acqua ottenendo, quindi, a livello giornaliero, un costante monitoraggio e quadro idrologico [66].

					
BOLLETTINO N	DATA EMISSIONE	VALIDITA'	AGGIORNAMENTO	SERVIZIO A CURA DI	AMBITO
164/2021	14/06/2021	13/06/2021	Giornaliero (feriali)	ARPA - Rischi Naturali e Ambientali	Regione Piemonte

CORSO D'ACQUA	STAZIONE	LIVELLI GIORNALIERI [m]			PORTATE GIORNALIERE [mc/s]			NOTE
		Min	Max	Med	Min	Max	Med	
Chisone	San Martino	-0.28	-0.1	-0.17	14.9	25.8	21.3	
Pellice	Villafranca	0.94	1.01	0.98	8.5	15.1	12.3	
Chisola	Vinovo	0.15	0.24	0.2	0.5	0.9	0.7	
Sangone	Torino	0.05	0.11	0.09	1.5	2.6	2.1	
Dora Riparia	Susa (Via Mazzini)	0.95	1.14	1.05	31.7	44.6	38.1	
Dora Riparia	Torino	1.58	1.65	1.61	34.8	41.3	37.8	
Stura di Lanzo	Lanzo	0.22	0.33	0.27	20.8	26.2	23.4	
Stura di Lanzo	Torino	0.28	0.34	0.3	22.8	31.5	26.2	
Malone	Front	0.31	0.38	0.35	N.D.	N.D.	N.D.	(8)
Orco	Spineto	0.48	0.65	0.56	55.9	100.7	77.4	
Orco	San Benigno	0.82	0.95	0.88	12.3	20.5	16.0	

Figura 56 - Dati su livelli giornalieri e portate giornaliere del 13/06/2021, bollettino idrologico Arpa Piemonte [66].

Sapendo che nella giornata del 13/06/2021 la portata media è stata di $16 \text{ m}^3/\text{s}$, si è utilizzato il software QGIS per sovrapporre l'immagine satellitare di Sentinel del torrente Orco e i livelli ottenuti dalla simulazione idrodinamica bidimensionale su Delft3D FM per una portata analoga (figura 57). Nel caso in esame la portata che più si avvicina tra quelle simulate è pari a $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$ (percentile 60).

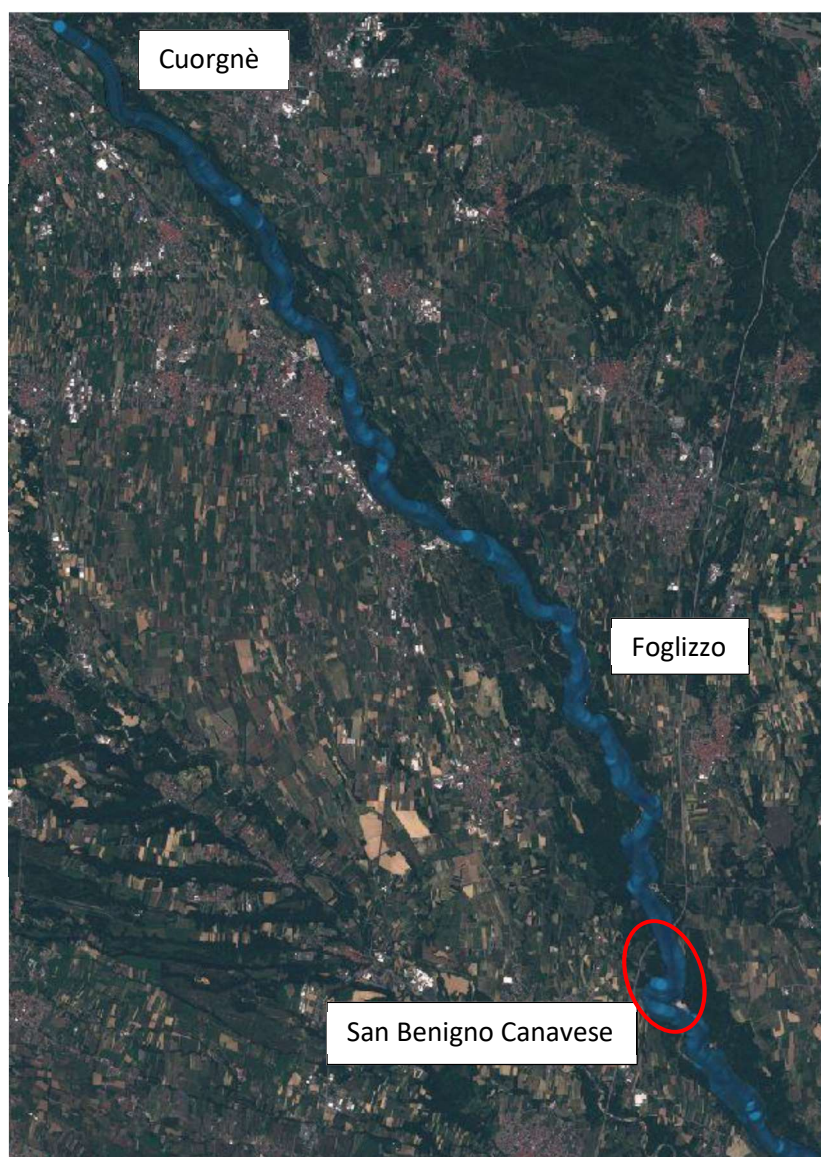


Figura 57 - Visualizzazione su QGIS dell'immagine satellitare (Sentinel) con sovrapposizione delle aree allagate (in blu) restituite dalla simulazione idrodinamica di portata $16,7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Successivamente, essendo noto il livello medio giornaliero nella stazione di San Benigno pari a 0,88 m, si è effettuata una media di 25 valori casuali di livelli (*figura 58*) nei pressi di San Benigno ed è risultata pari a 0,86 m (*tabella 16*). Come si osserva dal dettaglio della figura sottostante, si ottiene una quasi perfetta sovrapposizione delle aree perché i dati LiDAR, dal quale è iniziato lo studio, risalgono all'anno 2019 mentre i dati di riferimento sono quelli del 13/06/2021.

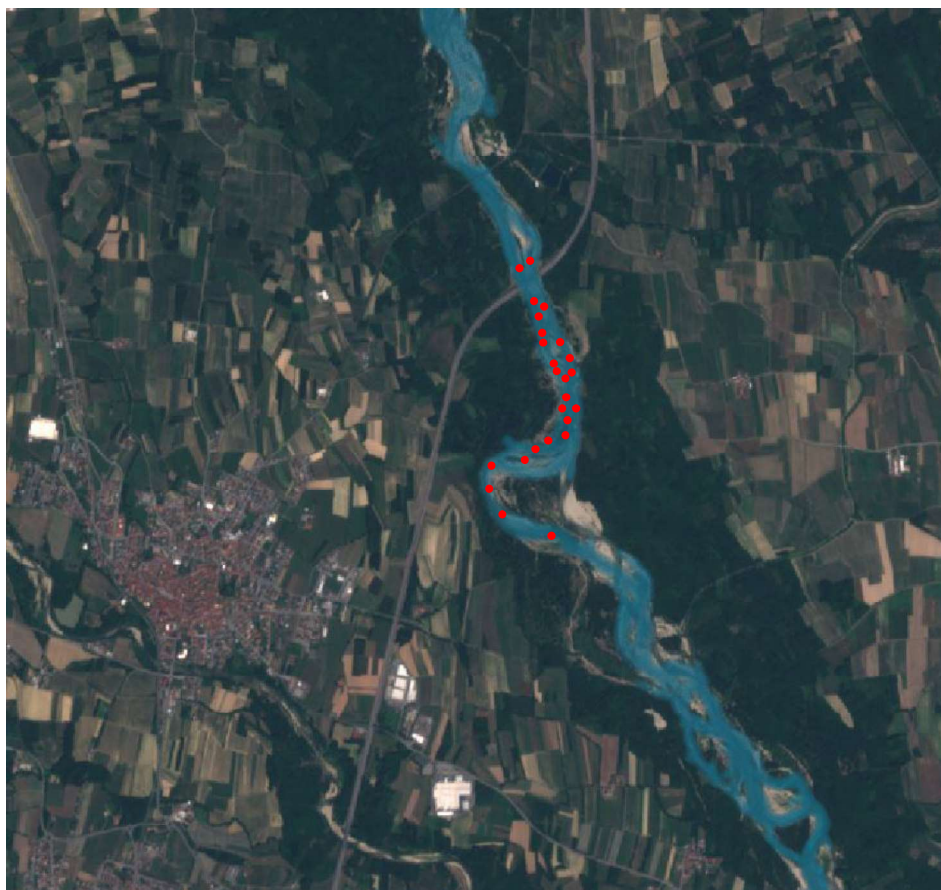


Figura 58 – Area bagnata restituita dalla simulazione idrodinamica (in azzurro) per una portata pari a 16,7 m³/s e selezione di 25 valori casuali (punti in rosso) per ottenere la media dei livelli nei pressi di San Benigno.

Le caratteristiche dei punti in rosso in *figura 58* sono riassunte in *tabella 16*:

COORDINATE		
x	y	LIVELLO Delft3D FM
406567,359313318	5010467,76116108	0,64245766243323
406653,441641413	5010506,64393185	0,899658725290237
406685,140732701	5010237,24279536	0,682803314023886
406764,188776559	5010190,75828	0,576453197308524
406687,086857019	5010150,78743785	0,944306816180699
406703,083676503	5010108,018126	1,19194881066579
406739,314434463	5010066,60123693	0,457963552514769
406857,827815848	5010018,03693555	0,498364766639781
406893,691919843	5009900,58094476	0,621553498304252
406734,167170176	5009946,62781339	0,630753189971074
406891,735685805	5009845,33160039	1,69293747079433
406853,74390736	5009831,58046872	1,32117438473429

406844,738014999	5009761,468443606	0,57947325295649
406849,160613618	5009657,27439023	0,646060807704373
406851,147872776	5009639,04750318	0,352371467924229
406870,423949967	5009641,0027203	0,991559280237226
406885,877220607	5009577,40533591	0,697664022447213
406869,422528179	5009545,34481702	0,707433994097443
406763,48902892	5009454,34536811	0,551700066671799
406611,325305742	5009444,36870875	0,453505240094643
406528,045784507	5009418,86510399	0,741730647088758
406364,13820527	5009291,23407211	2,21011629876139
406408,895925181	5009093,76282811	1,7364459304091
406477,541855987	5009021,18606825	0,851445742330384
406822,764104102	5008867,48220477	0,913015145970263

Tabella 16 – Coordinate spaziali e livello idrico associato ad ogni punto individuato in maniera random.

È, quindi, importante sottolineare che la simulazione ha fornito un risultato confrontabile in termini di estensione delle aree allagate e larghezza media bagnata con l'evento di riferimento.

Lo stesso procedimento è stato svolto per le giornate del 23/06/2020 e 06/04/2020 di cui Arpa Piemonte fornisce i dati necessari e il cui confronto tra portate e livelli è riassunto in *tabella 17*:

STAZIONE DI MISURA	DATA	PORTATA REALE MEDIA [m³/s]	PORTATA SIMULATA [m³/s]	LIVELLO MEDIO GIORNALIERO [m]	LIVELLO MEDIO RAGGIUNTO DALLA SIMULAZIONE [m]
T. Orco a San Benigno	13/06/2021	16,00	16,7	0,88	0,86
T. Orco a San Benigno	23/06/2020	29,5	27,9	1,06	1,04
T. Orco a San Benigno	06/04/2020	6,2	6,43	0,69	0,67

Tabella 17 – Tabella di sintesi sulla validazione del modello numerico.

In conclusione, si può affermare che il modello idrodinamico bidimensionale realizzato rappresenta, in buona maniera, le dinamiche del torrente in quanto, non solo le aree allagate reali sono coerenti con quelle modellate ma lo sono anche i livelli.

Per completezza vengono riportati per il 23/06/2020 e il 06/04/2020 gli estratti dei bollettini di Arpa Piemonte e le coordinate spaziali di 25 punti presso San Benigno Canavese per il calcolo del livello medio ottenuto dalla simulazione idraulica in *Appendice C*.

4.4 Risultati del modello

I risultati del modello vengono interpretati indagando le condizioni nello stato stazionario.

Delft3D FM produce due output:

- una serie temporale nei punti di osservazione e nelle sezioni trasversali;
- un file di estensione *_map.nc* contenente gli output sull'intero dominio del modello.

Grazie al modulo DELFT3D-Quickplot, è possibile visualizzare ed esportare gli output restituiti dalle simulazioni. Nelle figure successive si osservano gli allagamenti provocati dalle portate simulate rispettivamente per 1800 m³/s, 1496 m³/s e 99 m³/s.



Figura 59 – Visualizzazione aree allagate con portata simulata di 1800 mc/s.



Figura 60 - Visualizzazione aree allagate con portata simulata di 1496 mc/s.

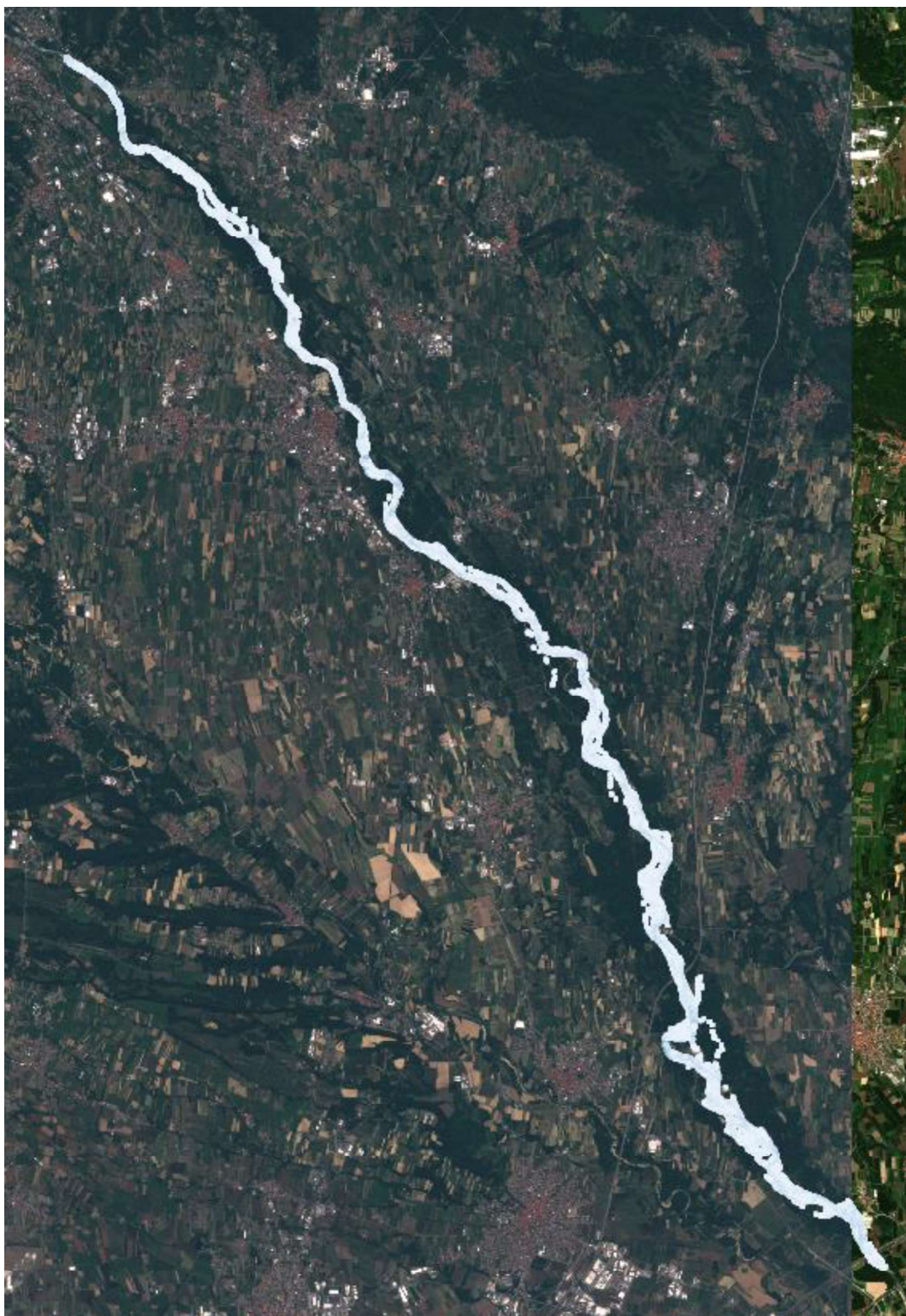


Figura 61 – Visualizzazione aree allagate con portata simulata di 99 mc/s.

5. Calibrazione modello stocastico

La morfodinamica fluviale è l'interazione tra l'evoluzione nel tempo del corpo idrico, causato da erosione/deposito del fondo e delle pareti laterali che caratterizzano un alveo, e meccanica dei fluidi, associata al trasporto solido. Se a questo scenario (corso d'acqua e sedimenti), si aggiunge anche la componente biotica, ovvero la vegetazione, si parla di eco-morfodinamica. Nell'ecosistema fluviale, quindi, i tre principali componenti che interagiscono ed evolvono sono il corso d'acqua, i sedimenti e la vegetazione.

La vegetazione ripariale è un complesso di piante che nascono e crescono nell'ambiente circostante a fiumi e torrenti e in particolare nelle loro rive [67].

Per quanto riguarda i corsi d'acqua, la loro dinamicità è dovuta a forzanti esterne come, per esempio, la regolazione delle portate, le arginature e i cambiamenti climatici che favoriscono la repentina transizione plano-altimetrica indebolendo la crescita della vegetazione riparia.

Lo sviluppo della vegetazione dipende dalla disponibilità di acqua (intervento di Roberto Bassi al Convegno della XX GIORNATA MONDIALE DELL'ACQUA [68]), dalla posizione spaziale in cui nasce la pianta stessa cioè, per esempio, se si trova su barre migranti o su barre stazionarie [69], dall'approfondimento delle radici e dalla densità aerea della vegetazione [69], dai processi di erosione e deposito dei sedimenti [25], nonché dalle caratteristiche delle piene (intensità, durata e variabilità). Più una portata è variabile, meno la vegetazione riesce a svilupparsi e crescere [70].

Nei diversi processi che caratterizzano la dinamica di un ecosistema fluviale, vi sono molte variabili coinvolte, ciascuna con un carattere non lineare e con una propria scala temporale e spaziale: risulta evidente la complessità delle interazioni che conduce alla difficile realizzazione di modelli matematici.

L'obiettivo di questo capitolo è quello di calibrare un modello stocastico di crescita della vegetazione ripariale applicato al torrente Orco per ottenere uno strumento in grado di prevedere come l'ambiente ripariale risponde al variare della portata, per esempio, indotta dal cambiamento climatico.

5.1 Applicazione di un modello stocastico all'ambiente ripariale del T. Orco

In letteratura, per descrivere il comportamento fisico della dinamica di un ecosistema fluviale, sono presenti studi basati sia su approcci deterministici che stocastici. Gli studi deterministici, ovvero studi che non tengono in conto dell'incertezza associata alle variabili in gioco, furono i primi ma con il crescente interesse e l'approfondimento del tema, si è osservato come le componenti casuali, tipiche di un approccio stocastico, giocano un ruolo importante nei processi fluviali e ambientali fornendo dei risultati in termini probabilistici [71].

Gli approcci stocastici per la modellazione delle dinamiche della vegetazione sono molteplici: si è scelto di utilizzare il lavoro svolto da Camporeale e Ridolfi nel 2006 [72]. Di seguito vengono riportati i principali concetti del modello stocastico (consultare l'articolo completo per maggiori informazioni).

Come tutti i modelli stocastici, anche quello di Camporeale e Ridolfi (denominato C&R per semplicità) è basato su ipotesi semplificative per rendere il modello trattabile:

- i. si considerano le caratteristiche delle diverse specie ma vengono trascurate le interazioni tra esse;

- ii. viene adottata una morfologia fluviale costante, ovvero si trascurano sedimentazione ed erosione;
- iii. si trascura il ritardo temporale tra le oscillazioni verticali provocate sul pelo libero del corso d'acqua e il livello delle acque sotterranee nella falda acquifera non confinata adiacente.

Lo studio inizia prendendo come riferimento un generico transetto ripariale, la cui geometria è riportata in *figura 62*, per la definizione delle variabili che verranno adottate.

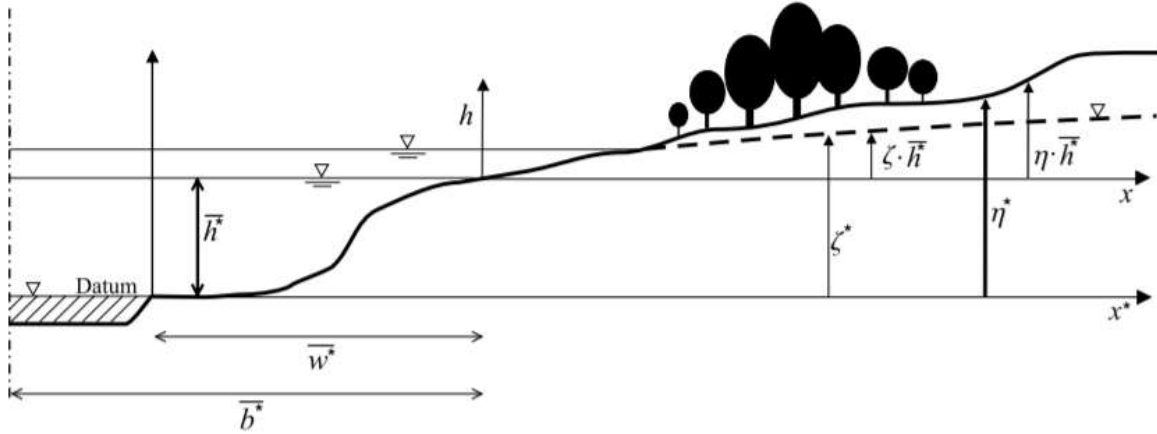


Figura 62 - Schematizzazione di un generico transetto ripariale con indicazione delle variabili utilizzate [72].

In cui:

- \bar{b}^* è la metà della larghezza media del corso d'acqua;
- x^* è la coordinata trasversale che crea l'origine degli assi con il valore minimo del livello dell'acqua;
- \bar{w}^* è la larghezza del transetto;
- \bar{h}^* è il livello medio dell'acqua nel transetto;
- $\zeta^*(x, h)$ è la posizione della superficie freatica (linea tratteggiata in *figura 62*);
- $\eta^*(x)$ è la quota topografica del letto del corso d'acqua;
- $\delta^*(x, h) = \eta^*(x) - \zeta^*(x, h)$ indica la profondità della falda freatica.

Si introducono le seguenti variabili adimensionalizzate rispetto all'altezza media dell'acqua:

$$x = \frac{x^* - \bar{w}^*}{\bar{w}^*}, \quad h = \frac{h^* - \bar{h}^*}{\bar{h}^*}, \quad \zeta = \frac{\zeta^* - \bar{h}^*}{\bar{h}^*}, \quad \eta = \frac{\eta^* - \bar{h}^*}{\bar{h}^*}$$

Le equazioni cardine dello studio sulla dinamica della vegetazione ripariale sono:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt^*} = -\alpha_1 v^n, & h \geq \eta \\ \frac{dv}{dt^*} = \alpha_2 v^m (V_c - v)^p, & h < \eta \end{cases}$$

Equazione 2 - Processo dicotomico

La prima rappresenta il decadimento della biomassa vegetale qualora fossimo nella condizione di inondazione ($h \geq \eta$); la seconda indaga come la vegetazione si sviluppa quando ($h < \eta$), cioè quando l'area è esposta.

Le caratteristiche della vegetazione vengono descritte dai seguenti parametri:

- $V_c \rightarrow$ capacità di carico locale adimensionale, anche chiamata *carrying capacity*: è la massima dimensione che una pianta può assumere in condizioni ottimali;
- $\alpha_1 \rightarrow$ tasso di decadimento, cioè quel parametro che descrive il danno provocato da un evento alluvionale nei confronti della vegetazione;
- $\alpha_2 \rightarrow$ tasso di crescita della pianta che rappresenta la velocità di crescita. Viene calcolato tenendo conto che la crescita è il tempo che impiega una pianta ad aumentare la sua biomassa dal 5% al 95%, quindi una biomassa che normalizzata alla *carrying capacity*;
- Gli esponenti (n, m, p) sono costanti numeriche dipendenti dalle caratteristiche della vegetazione;
- v , invece, indica la biomassa vegetale.

L'effetto casuale sulla dinamica della vegetazione è tenuto in conto da due fattori: dal segno di $(h - \eta)$ che denota il passaggio tra le fasi di inondazione e quelle di esposizione e da α_1 e V_c che dipendono dalla variabile casuale h .

Mentre nozioni sui tempi di crescita delle piante, in letteratura, sono presenti, sui tempi di decadimento a causa dell'inondazione no, pertanto il tasso di decadimento α_1 si ricava a partire da:

$$\alpha_1 = \frac{K}{P_I} \int_{\eta(x)}^{\infty} (h - \eta) p(h) dh$$

Equazione 3 – Espressione analitica del tasso di decadimento α_1 .

Dove:

- K è un coefficiente empirico che dipende dal tipo di vegetazione;
- P_I è la probabilità media ponderata di inondazione;
- $p(h)$ è la funzione di densità di probabilità, anche chiamata *pdf (probability density function)*;

ed è proporzionale al tirante $(h - \eta)$, cioè all'altezza dell'acqua in fase di inondazione.

Per quanto concerne la *carrying capacity* V_c , dipende dalla profondità della falda freatica.

$$V_c = V_c(\delta) = \begin{cases} 1 - a(\delta - \delta_{opt})^2 & \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \\ 0 & \delta < \delta_1 \text{ or } \delta > \delta_2 \end{cases}$$

Equazione 4 – Equazione della carrying capacity.

Viene assunto che la *carrying capacity* sia 0 nelle zone dove la falda è troppo bassa oppure troppo alta, quindi in condizioni di estrema aridità o estrema umidità, mentre all'interno di un range ottimale intermedio tra δ_1 e δ_2 , le piante hanno possibilità di crescita e sviluppo. All'interno di questo range, però, la capacità di carico non è sempre uguale, in particolare viene modellata attraverso un'equazione di secondo grado in cui il picco della parabola è 1 (si tiene conto della *carrying capacity* normalizzata) ed è sull'altezza di falda ottimale. L'espressione analitica si ricava sostituendo l'espressione dell'equazione 4 nella successiva:

$$\langle V_c \rangle = \frac{1}{P_E} \int_{-1}^{\eta(x)} V_c p(h) dh$$

Equazione 5 – Espressione analitica della carrying capacity.

In cui P_E è la probabilità di esposizione.

$$P_I(x) = \int_{\eta(x)}^{\infty} p(h)dh$$

$$P_E(x) = \int_{-1}^{\eta(x)} p(h)dh$$

Per semplicità analitica, il processo dicotomico descritto nell'equazione 2 viene normalizzato scalando i tempi di decadimento e di crescita secondo il fattore α_2 ,

$$\alpha = \frac{\langle \alpha_1 \rangle}{\alpha_2} = \frac{K \langle h - \eta \rangle}{\alpha_2} = k \langle h - \eta \rangle \quad \beta = \langle V_c \rangle$$

Equazione 6 – Fattore di decadimento normalizzato.

ottenendo:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt^*} = -\alpha v^n, & h \geq \eta \\ \frac{dv}{dt^*} = v^m(\beta - v)^p, & h < \eta \end{cases}$$

Equazione 7 – Processo dicotomico normalizzato.

L'equazione 7 descrive il comportamento nel tempo della biomassa ed è strettamente condizionato dal fatto che h è una variabile stocastica, cioè che il suo comportamento è casuale. Il fatto che ci siano delle stagionalità, per esempio nei corsi d'acqua alpini il livello h aumenta durante la fusione dei ghiacciai oppure durante i mesi più piovosi, non influenza la stocasticità del livello dell'acqua sia perché il valore assoluto di h è casuale e sia perché il suo valore è strettamente dipendente dalle precipitazioni, che è a sua volta un fenomeno stocastico non prevedibile.

Se fosse sempre $h \geq \eta$, condizione di inondazione, la vegetazione sarebbe sempre in una situazione decandete (vegetazione circa nulla ed è ciò che accade nel letto del corso d'acqua); se fosse sempre $h < \eta$, condizione di esposizione, ipotizzando una buona condizione di umidità del suolo, si avrebbe sempre vegetazione. Nella fascia riparia dove si è in presenza di un'alternanza tra due possibili stati, esposizione e inondazione, e del quale non si sa mai la durata di ciascuna fase, C&R hanno osservato come un problema di questo tipo viene descritto in maniera adeguata da un fenomeno dicotomico dipendente da un valore di soglia, η . Si può pensare di scrivere $\frac{dv}{dt}$ come fosse un'equazione stocastica, ovvero costituita da una funzione deterministica $f(v)$ (nota) e da una parte stocastica $g(v)$ (moltiplicata per un rumore dipendente dal tempo, $\xi(t)$):

$$\frac{dv}{dt} = f(v) + \xi(t)g(v)$$

Equazione 8 – Equazione stocastica.

Nella pubblicazione di Ridolfi, D'Odorico e Laio del 2011 [73] tali termini sono definiti come:

$$f(v) = \frac{\Delta_I v^m (\beta - v)^p + \alpha \Delta_E v^n}{\Delta_I - \Delta_E}$$

$$g(v) = \frac{\alpha v^n + (\beta - v)^p v^m}{\Delta_E - \Delta_I}$$

Dove:

- Δ_I rappresenta i valori di inondazione;
- Δ_E rappresenta i valori di esposizione.

Ipotizzando che il rumore dicotomico $\xi(t)$, abbia un valore medio nullo, si può scrivere:

$$T_E \Delta_E + T_I \Delta_I = 0, \quad \frac{P_{\Delta I}}{P_{\Delta E}} = \frac{T_I}{T_E}, \quad \frac{1}{\tau_{DP}} = \frac{1}{T_E} + \frac{1}{T_I}$$

Dove:

- T_I rappresenta il periodo di inondazione;
- T_E rappresenta il periodo di esposizione;
- $P_{\Delta I}$ indica la probabilità del processo dicotomico di trovarsi nella fase Δ_I ;
- $P_{\Delta E}$ indica la probabilità del processo dicotomico di trovarsi nella fase Δ_E ;
- τ_{DP} è la scala integrale.

Si assume:

$$\tau_{DP} = \tau \quad P_{\Delta I} = P_I$$

Siccome l'equazione 8 è un'equazione differenziale stocastica, la soluzione non è numerica (deterministica) ma la soluzione è una *probability density function (pdf)*.

Da successive sostituzioni, C&R forniscono anche la formulazione della pdf dello stato stazionario della biomassa vegetale:

$$p(v) = \frac{N}{\alpha} v^{\frac{\beta(1-\alpha\tau) - (\alpha+\beta)P_I}{\alpha\beta\tau}} (\beta - v)^{\frac{P_I}{\beta\tau} - 1} (\alpha + \beta - v)$$

Equazione 9 – Funzione di densità di probabilità.

Dove N è una costante di normalizzazione.

L'equazione 9 è valida se:

$$P_I < \frac{\beta}{\alpha + \beta}$$

Questi risultati teorici vengono applicati all'area del torrente Orco per comprendere gli effetti idrologici sulla vegetazione ripariale.

Una volta calibrato, il modello può essere usato per previsioni future su come risponde la vegetazione ripariale al variare del regime idrologico indotto, per esempio, dal cambiamento climatico.

5.2 Implementazione del modello stocastico

Il modello stocastico di crescita della vegetazione ripariale viene calibrato a partire dai dati ottenuti tramite caratterizzazione della vegetazione da dati di tipo LiDAR e dalla modellazione idrodinamica bidimensionale.

In particolare, l'algoritmo di identificazione delle piante (*sottocapitolo 3.2*) entra in gioco nella valutazione della biomassa. Quell'algoritmo, di per sè, identifica solo dove si trova pianta ma attraverso leggi allometriche (*paragrafo 3.3.1*) per ogni singolo albero, è stata calcolata la sua biomassa. In questa fase, quindi, è stato definito un algoritmo in grado di creare autonomamente dei cluster di alberi con

caratteristiche omogenee sia per dimensione che per vicinanza spaziale, al fine di ottenere una densità reale di alberi a metro quadro all'interno del cluster generato.

Nel capitolo 4, invece, sono state fatte una serie di simulazioni e si sono ottenuti, per ogni portata simulata, i livelli raggiunti dall'acqua. Per ogni cella di calcolo, quindi, si hanno diversi livelli in base alla portata simulata e una scala delle portate locale che permette di ricostruire l'altezza in funzione della portata in ingresso. La serie di portate utilizzate è quella degli anni dal 2005 al 2019 che ha permesso di calcolare, non solo la pdf ma anche i tempi di esposizione e inondazione necessari per la definizione della scala integrale Tau per ogni cella di calcolo.

Quanto mostrato nel sottocapitolo 5.1 è stato implementato al torrente Orco. Melissa Latella, nel suo progetto di tesi del 2018 [51], aveva realizzato gli algoritmi propedeutici alla calibrazione del modello con il supporto di Matlab, pertanto sono stati revisionati, adattati ed infine utilizzati per questo lavoro.

Nella fase di calibrazione è stato realizzato un campionamento per classi di probabilità di inondazione, discriminando inoltre le specie di vegetazione riparia presenti lungo il tratto d'analisi di 30 km.

5.3 Analisi dei risultati della calibrazione

Per quanto riguarda la distribuzione della vegetazione reale al variare della probabilità di inondazione, in figura 63 e figura 64 vengono riportati i risultati del modello stocastico calibrato per le tre specie arboree prese in considerazione (paragrafo 3.3.2, figura 37): *Salicacea*, comprensiva delle specie dei pioppi e di quel tipo di alberi classificati, nel seguente lavoro di tesi, come "generici", *Robinia*, *Pseudoacacia* e *Quercus*.

È stato assunto un valore della scala integrale τ costante e pari al tempo di autocorrelazione delle portate per ogni fascia di inondazione, in accordo con il modello di C&R.

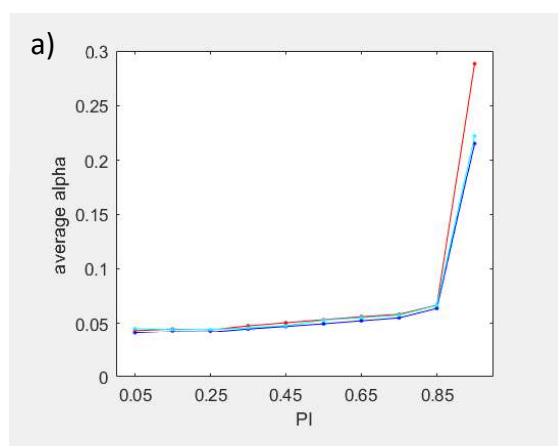


Figura 63 – Come si distribuisce la vegetazione in funzione del fattore di decadimento al variare delle fasce di probabilità di inondazione. Il colore rosso rappresenta le salicacee, il blu la specie delle robinie e l'azzurro le querce.

In figura 63, il grafico a) mostra come il fattore di decadimento α varia all'aumentare della probabilità di inondazione. Ricordando che α rappresenta la magnitudine del decadimento mediata sulla probabilità di inondazione (equazione 6), l'andamento generale è simile per tutte e tre le specie arboree. In particolare, all'aumentare di PI, il fattore di decadimento risulta crescere lentamente fino a $PI < 0.85$, per poi crescere più drasticamente in presenza di inondazioni frequenti perché le aree con probabilità di inondazione alta sono a quota inferiore e quindi in condizione di inondazione, il tirante d'acqua è maggiore.

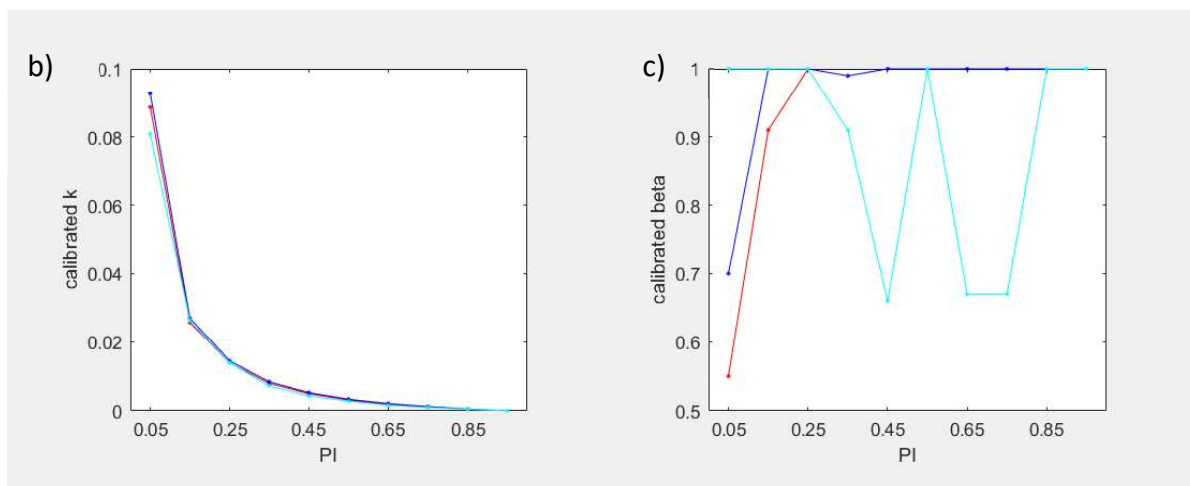


Figura 64 - Come si distribuisce la vegetazione in funzione di b) tasso di decadimento; c) capacità di carico, al variare delle fasce di probabilità di inondazione. Il colore rosso rappresenta le salicacee, il blu la specie delle robinie e l'azzurro le querce.

Il *grafico b)*, invece, mostra come il tasso di decadimento k varia all'aumentare della probabilità di inondazione e l'andamento risulta essere simile per le tre specie analizzate. All'aumentare della PI, la curva decade a 0 molto velocemente. Al diminuire della velocità di decadimento, il tempo che impiega la vegetazione a decadere è lungo (siccome velocità e tempo sono inversamente proporzionali) e quindi ciò porta a reputare la vegetazione resistente e in grado di sopportare frequenti inondazioni (per $PI \geq 0.85$ infatti $k \approx 0$), tipica della vegetazione riparia. Inoltre, per PI bassi ci si trova ad una certa distanza dal corso d'acqua: in questa condizione, rilevare una velocità di decadimento alta significa che per quelle aree che vengono inondate con tempi di ritorno molto alti, la vegetazione decade più velocemente a causa del fatto che probabilmente è nata e cresciuta in condizioni più aride.

Osservando la capacità di carico β al variare della probabilità di inondazione (*grafico c)*), robinie e salicacee presentano, nelle aree più esposte a inondazioni, una capacità di carico pari a 1 in cui la pianta può svilupparsi in condizioni ottimali, mentre allontanandosi dal corso d'acqua la condizione peggiora. Ciò conferma che le salicacee e la robinia pseudoacacia, che si trovano in prossimità dei corsi d'acqua, presentano un comportamento in completa sinergia con le dinamiche ambientali e il corso d'acqua stesso.

Il comportamento delle querce (*grafico c)* in azzurro), può essere discusso nel seguente modo. Le querce che si trovano lontano dal corso d'acqua, le cui aree vengono inondate con una probabilità bassa fino a 0.25, presentano una capacità di carico pari a 1 (pianta in condizioni ottimali per la crescita). Per probabilità di inondazione alti, cioè per gli alberi di quercia localizzati sempre più vicino al canale, la crescita di tali piante è fortemente rallentata dalle inondazioni. La quercia, infatti, non è una specie ripariale ma in condizioni favorevoli di umidità del suolo per lei ottimale riesce a svilupparsi raggiungendo anche altezze elevate.

Per quanto riguarda il confronto tra la pdf teorica ottenuta tramite calibrazione e quella reale, i risultati per la specie delle salicacee, vengono riportati in *figura 65*:

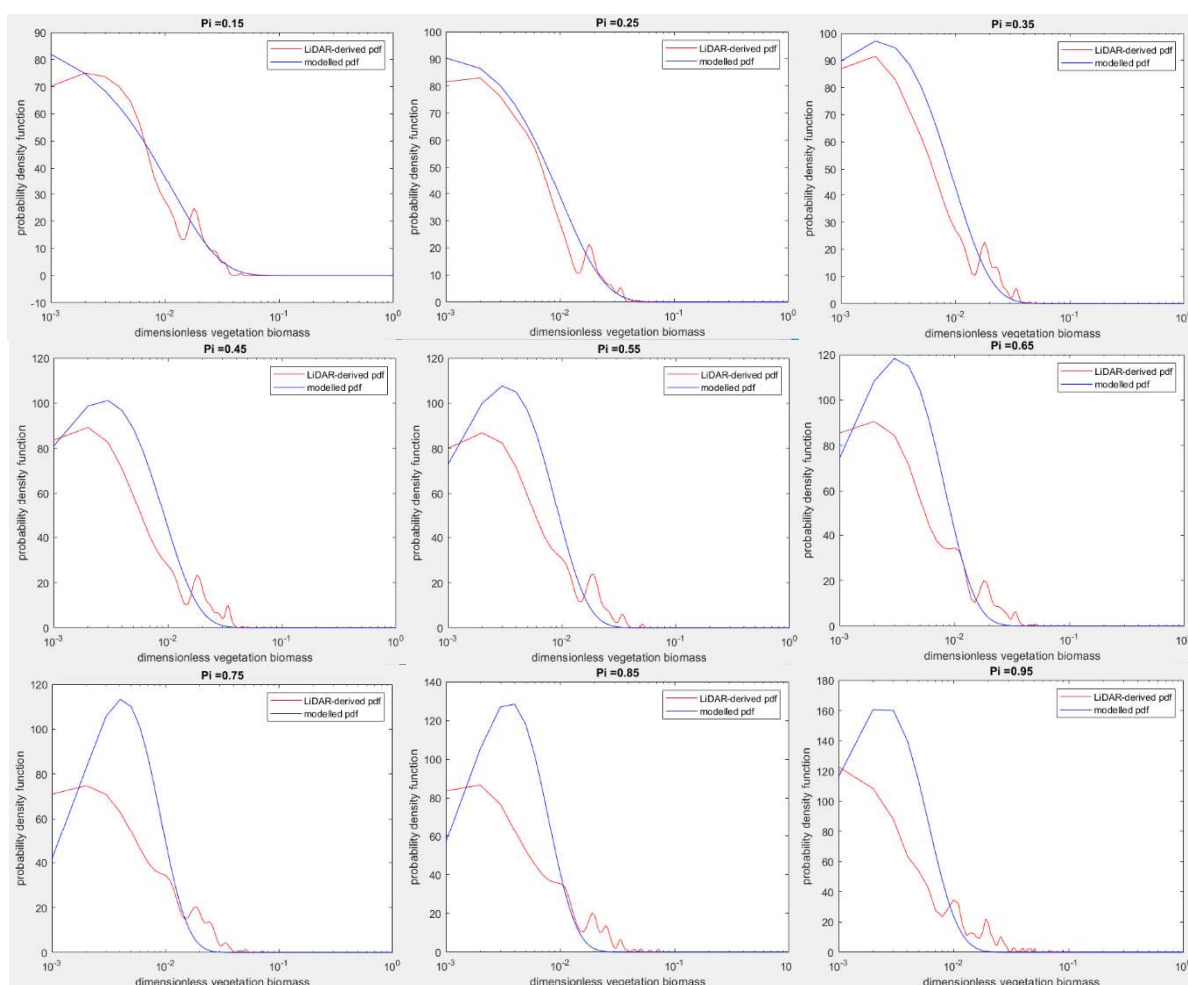


Figura 65 - Confronto di densità di probabilità di frequenza tra la rappresentazione reale per salicacee.

Dall'osservazione grafica si evince come le pdf modellate siano rappresentative e confrontabili con quelle reali lungo tutte le fasce di probabilità di inondazione. Si possono inoltre notare dei picchi verso le code delle distribuzioni reali che tengono conto della complessità della fascia ripariale che non è possibile rappresentare.

Discorso analogo per la specie delle robinie:

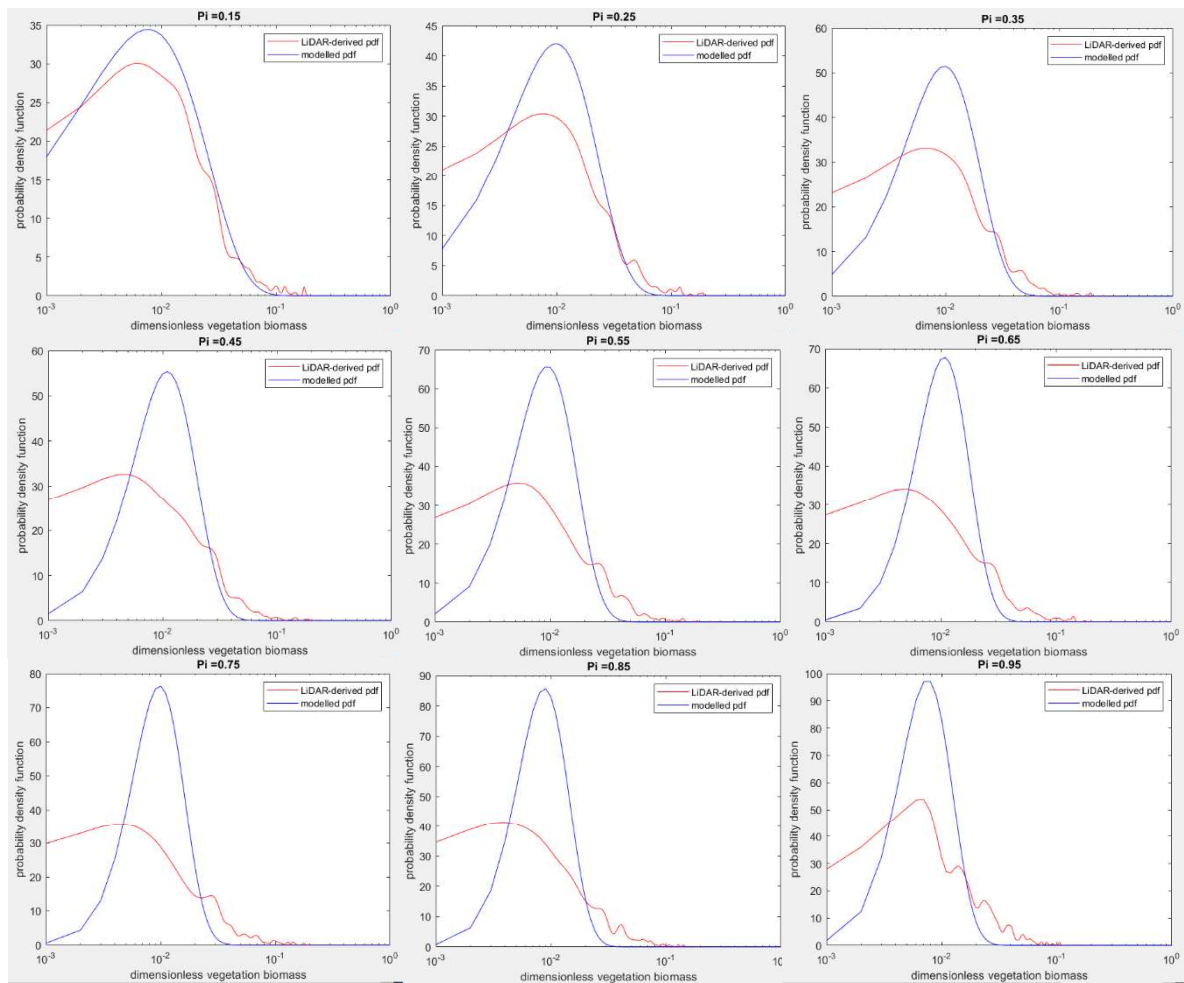


Figura 66 - Confronto di densità di probabilità di frequenza tra la rappresentazione reale per robinie.

La differenza rispetto alle specie delle salicacee è che la pdf modellata per le robinie presenta una forma a campana più accentuata che ben rappresenta la media ma non la varianza della distribuzione di biomassa e quindi non del tutto rappresentativa della realtà, soprattutto per $PI \geq 0.45$.

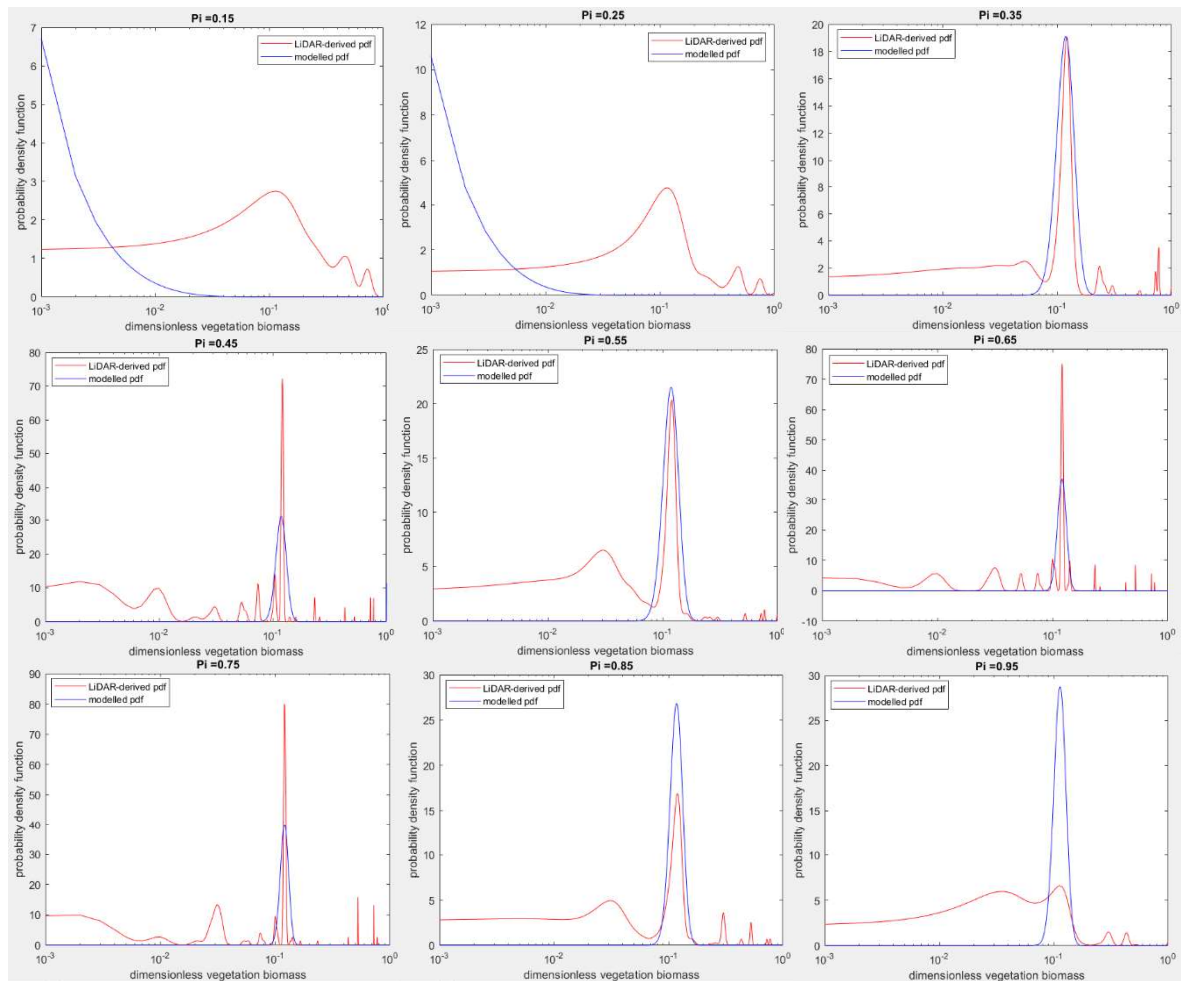


Figura 67 - Confronto di densità di probabilità di frequenza tra la rappresentazione reale per *Quercus*.

Infine, confrontando la pdf modellata tramite calibrazione e quella reale, si osservano, per le specie delle salicacee e delle robinie, una buona corrispondenza mentre per le querce i risultati non sono soddisfacenti. In *figura 37 (paragrafo 3.3.2)* si può osservare come le querce siano presenti per il solo 7% dello sviluppo, pertanto, le pdf non corrispondono perchè il campione non è rappresentativo.

Nonostante vengano trascurate dal modello di Camporeale e Ridolfi [72] le evoluzioni morfologiche, è comunque dimostrato che, partendo da un campione statistico rappresentativo, la calibrazione del modello stocastico applicato al torrente Orco è in grado di riprodurre bene le dinamiche della vegetazione ripariale su dati reali.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi è una continuazione degli studi pregressi e, al contempo, può essere un punto di partenza per futuri studi e sviluppi per effettuare previsioni sulla risposta della vegetazione e non solo.

Lo studio teorico di lavori pregressi in letteratura, lo sviluppo di un approccio innovativo e la successiva implementazione degli algoritmi sull'individuazione dei singoli alberi a partire da dati di tipo LiDAR, hanno permesso di superare limiti e difficoltà iniziali, ottenendo risultati molto soddisfacenti. Tra essi si cita la sua capacità di elaborare nuvole di punti in base ai massimi locali della densità di punti, rilevando correttamente posizione e altezza dei singoli alberi di latifoglie fino ad una densità della nuvola in ingresso di 2 punti al metro quadrato.

Bisogna ricordare che l'Orco è un torrente poco antropizzato e anche molto dinamico, capace di modificare nettamente l'assetto plano altimetrico in breve tempo e, di conseguenza, con l'assetto plano altimetrico e morfologico, viene anche modificata la distribuzione di biomassa. Unendo tale considerazione al fatto che nei prossimi 10-20 anni ci sarà anche un cambiamento consistente del regime idrologico a seguito di cambiamenti climatici, il modello che si è testato ha una capacità previsionale in quest'ottica. Si tratta di un modello che, basandosi su considerazioni teoriche viene applicato in campo per fare previsioni, in questo caso si parla di previsioni biomorfologiche.

Un tema attuale, impossibile da non citare, è l'impatto del cambiamento climatico che non solo riguarda tutti da vicino, ma condiziona in maniera importante il mondo dell'idraulica.

Come preannuncia il titolo dell'articolo relativo allo studio di Alfieri et al. (2015) [74], il riscaldamento globale aumenta la frequenza delle inondazioni dei fiumi europei. Alfieri et al. hanno ideato un modello idrologico basato su variazioni di magnitudo e frequenza degli eventi e delle precipitazioni utilizzando un approccio stocastico. Il loro studio ha riscontrato una diminuzione dei picchi estremi di portata nell'Europa orientale entro il 2100 ma, per il resto dell'Europa, è stato previsto un aumento della portata media a causa della maggiore frequenza di accadimento di fenomeni che attualmente presentano elevati tempi di ritorno. Secondo tale modello, quindi, si prevede che la portata del torrente Orco e della maggior parte dei corsi d'acqua europei, tenderà ad aumentare nei prossimi anni.

In linea con il progetto di tesi di Latella [51] svolto nell'anno 2018 e l'articolo relativo [25] pubblicato nel 2020, si potrebbe effettuare un'operazione analoga quella fatta nell'elaborato sul Rio Cinca chiedendosi: cosa cambierebbe se si impostassero scenari idrologici diversi? Cambierebbe il comportamento della vegetazione. In particolare, al posto di simulare una serie di portate reali, si potrebbe lavorare su una serie di portate in maniera più raffinata, affidandosi ad uno studio mirato di un idrologo per effettuare una generazione sintetica delle portate future. In questo modo, tramite un modello di previsione sarebbe possibile creare una serie storica di portate fittizia che rappresenti però le condizioni aspettate per il futuro. Applicando il modello ad una serie di portate fittizia che tenga conto del futuro aumento della portata media (Alfieri et al. [74]), non solo si potrebbero ottenere le distribuzioni qualitative della biomassa vegetale nell'area di studio ma potrebbe essere utile per studiare la resilienza della vegetazione soggetta a forzanti esterne.

In questo lavoro di tesi si è osservato come il corso d'acqua e la vegetazione ripariale costituiscono un grande ed unico ecosistema intercomunicante. Il fatto che, quindi, sia prevista una variazione degli apporti idrici, porta a presagire, un cambiamento anche da parte della vegetazione riparia [75] perché è particolarmente sensibile alle oscillazioni di portata del corso d'acqua in cui si sviluppa [76].

Appendici

Appendice A

ANNO	Q_{colmo} [m³/s]
1928	327
1929	310
1930	274
1931	138
1932	387
1933	373
1934	396
1935	489
1936	157
1937	293
1938	970
1939	200
1940	354
1941	542
1942	622
1943	244
1945	1140
1946	471
1947	1410
1948	1070
1949	310
1950	130
1951	470
1952	87
1953	325
1954	223
1955	220
1956	376
1957	620
1958	482
1959	250
1960	410
1961	760
1962	1260
1963	232
1964	846
1965	616
1966	376
1967	70
1968	466
1969	359

1970	327
1971	240
1974	208
1975	307
1976	385
1977	1883
1993	1500
2000	1800

Tabella 18 - Serie storica delle portate al colmo di piena per la stazione presso Pont Canavese. In rosso vengono evidenziate due portate che corrispondono ad eventi straordinari.

Appendice B

ANNO	Q_{colmo} [m³/s]
2000	1500
2001	180
2002	590
2003	135
2004	515
2005	240
2006	750
2007	180
2008	530
2009	520
2010	825
2011	850
2012	285
2013	490
2014	425
2015	245
2016	710

Tabella 19 - Serie storica delle portate al colmo di piena per la stazione presso San Benigno Canavese.

Appendice C

Per l'evento del 23/06/2020:

		BOLLETTINO IDROLOGICO DI SINTESI				
BOLLETTINO N	DATA EMISSIONE	VALIDITA'	AGGIORNAMENTO	SERVIZIO A CURA DI	AMBITO	
175/2020	25/06/2020	23/06/2020	Giornaliero (feriali)	ARPA - Rischi Naturali e Ambientali	Regione Piemonte	

CORSO D'ACQUA	STAZIONE	LIVELLI GIORNALIERI [m]			PORTATE GIORNALIERE [mc/s]			NOTE
		Min	Max	Med	Min	Max	Med	
Chisone	San Martino	-0.2	-0.09	-0.14	18.3	25.0	22.1	
Pellice	Villafranca	0.75	0.94	0.83	0.0	5.0	1.4	
Chisola	Vinovo	0.41	0.5	0.45	2.2	2.8	2.5	
Sangone	Torino	0.14	0.19	0.17	3.2	4.7	4.1	
Dora Riparia	Susa (Via Mazzini)	0.82	1.1	0.94	24.2	42.8	31.7	
Dora Riparia	Torino	1.59	1.86	1.69	33.3	60.0	43.1	
Stura di Lanzo	Lanzo	0.39	0.49	0.44	28.6	35.1	32.0	
Stura di Lanzo	Torino	0.31	0.37	0.34	24.7	33.7	28.8	
Malone	Front	0.57	0.65	0.62	N.D.	N.D.	N.D.	(2)
Orco	Spineto	0.44	0.56	0.49	35.3	49.9	41.0	
Orco	San Benigno	1.03	1.1	1.06	26.7	33.2	29.5	

Figura 68 - Dati su livelli giornalieri e portate giornaliere del 23/06/2020, bollettino idrologico Arpa Piemonte [77].



Figura 69 - Area bagnata restituita dalla simulazione idrodinamica (in rosa) per una portata pari a 27,9 mc/s e selezione di 25 valori casuali (punti in rosso) per ottenere la media dei livelli nei pressi di San Benigno.

COORDINATE		
x	y	LIVELLO Delft3D FM
406556,944539761	5010505,81705663	0,859503406799803
406643,447412498	5010503,97024064	0,606816943442482
406690,854144492	5010387,92020279	0,914019834367963
406700,292612047	5010336,56736269	0,806009159561057
406693,283770332	5010180,9547671	0,556342593058275
406712,249655322	5010116,78005377	1,14052779294499
406734,93195279	5010019,02292934	0,859778819529424
406808,069108399	5010090,76211027	0,410014255487511
406879,581019748	5009928,98072869	0,760809362107779
406740,856746727	5009971,81809228	0,544547636040647
406845,429284175	5009885,84397183	1,56184363281088
406852,306998288	5009710,42598608	0,730324583418337
406926,372620113	5009745,95652283	1,07027295777772
406934,681989304	5009678,46305997	1,34044392732213
406854,651484474	5009692,95959587	0,862513949680647
406875,035849289	5009591,87205942	0,8815814104588
406890,542083791	5009417,81437735	1,98795114111383
406818,438400398	5009315,01390698	1,28492149445006
406720,870266077	5009271,79935912	0,790819147207088
406587,452965995	5009272,09515847	1,17118213392138
406461,862816372	5009343,74880983	0,710228676622819
406372,343807341	5009300,2208503	1,61957648476601
406386,225643852	5009135,96742765	2,56531780776592
406438,3787963	5008977,91155024	1,22598397363745
406590,493624978	5008977,67396668	0,746593916453747

Tabella 20 - Coordinate spaziali e livello idrico associato ad ogni punto individuato in maniera casuale.

Per l'evento del 06/04/2020:

PIEMONTE

Arpa

Agenda Regionale
per la Protezione Ambientale

BOLLETTINO

25591235862213522546875468

IDROLOGICO DI SINTESI

REGIONE PIEMONTE

BOLLETTINO N	DATA EMISSIONE	VALIDITA'	AGGIORNAMENTO	SERVIZIO A CURA DI	AMBITO
97/2020	07/04/2020	06/04/2020	Giornaliero (feriali)	ARPA - Rischi Naturali e Ambientali	Regione Piemonte

CORSO D'ACQUA	STAZIONE	LIVELLI GIORNALIERI [m]			PORTATE GIORNALIERE [mc/s]			NOTE
		Min	Max	Med	Min	Max	Med	
Chisone	San Martino	-0.44	-0.34	-0.39	7.4	11.3	9.3	
Pellice	Villafranca	0.73	0.77	0.75	N.D.	N.D.	N.D.	(2)
Chisola	Vinovo	0.36	0.43	0.4	1.8	2.3	2.1	
Sangone	Torino	0.02	0.05	0.03	0.8	1.3	1.0	
Dora Riparia	Susa (Via Mazzini)	0.38	0.83	0.65	5.4	24.8	16.4	
Dora Riparia	Torino	1.32	1.54	1.42	13.3	29.1	20.4	
Stura di Lanzo	Lanzo	0.09	0.14	0.11	12.1	14.5	12.9	
Stura di Lanzo	Torino	0.11	0.17	0.15	4.2	8.7	7.1	
Malone	Front	0.52	0.58	0.56	3.2	4.3	3.9	
Orco	Spineto	-0.46	0.4	0.0	4.5	32.1	16.4	
Orco	San Benigno	0.59	0.78	0.69	3.1	9.9	6.2	

Figura 70 - Dati su livelli giornalieri e portate giornaliere del 06/04/2020, bollettino idrologico Arpa Piemonte [78].

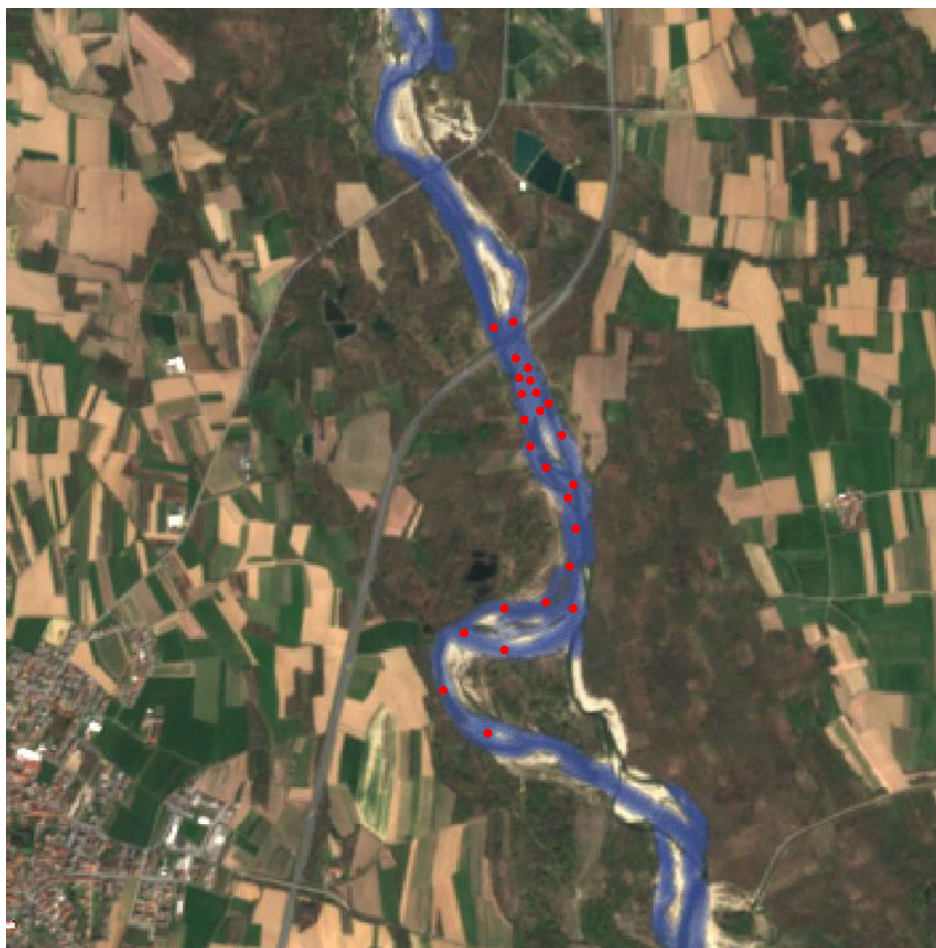


Figura 71 - Area bagnata restituita dalla simulazione idrodinamica (in blu) per una portata pari a 6,43 mc/s e selezione di 25 valori casuali (punti in rosso) per ottenere la media dei livelli nei pressi di San Benigno.

COORDINATE		
x	y	LIVELLO Delft3D FM
406564,785310492	5010477,6216503	0,440337018997411
406658,902859077	5010485,48962993	0,708854109901068
406683,432376936	5010313,32154743	0,257798574356002
406729,447132892	5010286,32310714	0,68798463325254
406672,902629004	5010249,47844376	0,334435837532482
406725,686816875	5010243,30566748	0,656802920636068
406690,271181755	5010202,26567581	0,515078472398159
406765,181155713	5010183,51535437	0,391026377658136
406688,06562084	5010143,52279353	0,664227735779491
406769,258644907	5010228,0567667	0,460384401994844
406729,59976463	5010141,59859788	0,362751257908855
406736,838881921	5010003,38242568	0,645310668266717
406820,059381468	5010076,66724495	0,414914754540064
406797,726675624	5009932,45754895	0,343259342099856
406879,581019748	5009928,98072869	0,496887492152524
406837,905822718	5009869,09847116	0,565313597290896
406912,519906329	5009840,40594029	0,650555621049222
406891,182313518	5009782,96918792	1,46260075955982
406896,120687289	5009674,36345598	1,41140077594358
406883,282691343	5009607,61809784	1,25093518334808
406832,421444549	5009350,35227009	0,864739257606544
406796,181840803	5009508,90213899	0,315419826834528
406656,162494481	5009260,50976258	1,34163750234222
406405,407290466	5009335,34694985	0,340188199155278
406483,178716166	5008989,06008129	1,17046261820349

Tabella 21 - Coordinate spaziali e livello idrico associato ad ogni punto individuato in maniera casuale.

Ringraziamenti

Questa sezione mi è cara perché reputo i ringraziamenti uno spazio personale di grande valore.

Ringrazio il professor Carlo Camporeale per aver scelto di affidare a me questo incarico.

Ringrazio Melissa Latella per essere stata disponibile, per avermi insegnato a lavorare in autonomia e per avermi seguita e corretta in ogni fase del lavoro, e Fabio Sola per avermi insegnato ad utilizzare i principali programmi adottati nelle fasi iniziali del progetto quando tutto mi era nuovo.

Desidero ringraziare anche quei professori universitari che, non hanno fatto parte dello sviluppo in sé del lavoro di tesi, ma che mi hanno profondamente fatto crescere non solo come studentessa ma come persona, in particolare il professor Paolo Cortese e il professor Gennaro Bianco, e il professor Roberto Revelli per avermi trasmesso la passione per l'idraulica.

Ringrazio la mia famiglia, mia mamma Antonella e mio papà Franco, per tutti i sacrifici che hanno fatto per me, per avermi dato l'opportunità di vivere a Torino e per avermi sopportata nei miei continui sbalzi d'umore tra gioie e periodi bui. Vi ringrazio per l'amore incondizionato che mi date ogni singolo giorno, vi ringrazio per avermi trasmesso quella forma mentis e determinazione necessarie per intraprendere e portare a termine, un percorso di studi come quello di ingegneria civile.

Ho la fortuna di avere una nonna e una zia che mi vogliono molto bene e che, nel vedermi sempre concentrata nello studio, spesso si sono preoccupate. Nonna, te l'avevo promesso che saremmo tornate al Politecnico.

Ringrazio, inoltre, i nonni paterni e Carlo per essersi sempre voluti informare sui miei progressi, così come hanno fatto anche Margherita e Claudia.

Un ringraziamento speciale va a Fabio, che ha affrontato con me tutto il percorso universitario, sempre pronto ad ascoltarmi e ad esserci: grazie per starmi accanto e per aver saputo, fin dal primo giorno, che ce l'avrei fatta.

Ho la fortuna di avere nella mia vita molte persone che hanno scelto di darmi il loro supporto, ognuno in maniera diversa e unica.

Ringrazio le amicizie di una vita, in particolare colei che reputo energia pura, le nostre gite a Stresa, le camminate in vigna e le nostre cene mi fanno sempre sentire a casa, e chi conosco da quando ero in culla: siamo lontani, eppure, vi ho sempre sentito vicino.

Ringrazio le amicizie arrivate poco dopo e che, con il tempo, sono diventate essenziali. In particolare, colei che ha sempre voluto capire cosa studiassi, che mi ha fatto innamorare della montagna portandomi al Jervis e che ho scoperto essere una grande compagna di viaggi; ringrazio quel compagno di classe di liceo che durante il periodo universitario è stato ancora più presente, e ringrazio colui che ho conosciuto per caso, ma non a caso, ad una lezione universitaria di metodi numerici, mi pareva di conoscerlo da sempre: il tempo condiviso e il vostro supporto in ogni momento di questo percorso l'ho apprezzato tanto.

Ringrazio chi non vedo molto spesso ma il cui tempo condiviso l'ho sempre reputato prezioso. In particolare, ringrazio colei che tra poco si sposa, chi ho conosciuto ad un corso di nuoto e chi a scuola guida e quel compagno di classe di liceo che durante il periodo universitario è stato ancora più presente.

Ringrazio colei con la quale ho studiato e superato gli ultimi, e forse più impegnativi, esami universitari e quei compagni di corso disponibili e sempre pronti all'aiuto reciproco.

Ringrazio, quindi, chi ha condiviso con me propri momenti di vita, magari cene, feste o camminate in montagna perché senza momenti di svago sarebbe risultato tutto più difficile.

E, infine, ringrazio me per avercela fatta. Qui si conclude la mia carriera universitaria ma non la voglia di continuare ad imparare.

Bibliografia

- [1] G. Lollino, G. Nigrelli e C. Audisio, «Bacino idrografico del Torrente Orco: analisi integrata evento-fenomeno-danno.,» *Quaderni di Geologia Applicata*, pp. 49-62, 2005.
- [2] A. d. b. d. f. Po, «Linee generali di assetto idrogeologico e quadro degli interventi Bacino dell'Orco,» [Online]. Available: <http://www.adbpo.it/PAI/3%20-%20Linee%20generali%20di%20assetto%20idraulico%20e%20idrogeologico/3.3%20-%20Elaborato%20Piemonte/Orco.pdf>. [Consultato il giorno 28 Luglio 2020].
- [3] C. Audisio, «Analisi geomorfologica dei conoidi di deiezione della Val Soana.,» *Tesi di laurea inedita, Università degli Studi di Torino*, p. 240, 2002.
- [4] «Approfondimenti sul bacino del torrente Orco,» [Online]. Available: https://www.arpa.piemonte.it/approfondimenti/temi-ambientali/geologia-e-dissesto/pubblicazioni/immagini-e-files/quaderni-geologici-1/Q12_ParteGenerale.pdf. [Consultato il giorno 2 Agosto 2020].
- [5] «Programma di gestione dei sedimenti per il torrente Orco,» [Online]. Available: http://www.regione.piemonte.it/ambiente/valutazioni_ambientali/dwd/vas/proposta%20piano%20gestione%20sedimenti%20orco.pdf. [Consultato il giorno 3 Agosto 2020].
- [6] «Arpa Piemonte,» [Online]. Available: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html. [Consultato il giorno 10 Gennaio 2021].
- [7] «Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po,» [Online]. Available: http://www.adbpo.it/PDGA_Documenti_Piano/Attuazione_del_Piano/Varianti_fasce_fluviali/Orco/Relazione%20Schema%20Variante%20Orco.pdf. [Consultato il giorno 10 Gennaio 2021].
- [8] «Banca dati idrologica - Arpa Piemonte,» [Online]. Available: https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html. [Consultato il giorno 6 aprile 2021].
- [9] «Open data di idrologia del Politecnico di Torino,» [Online]. Available: <http://www.idrologia.polito.it/web2/open-data/>. [Consultato il giorno 3 Gennaio 2021].
- [10] «Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po,» [Online]. Available: http://www.adbpo.it/PAI/z_Da%20eliminare/Varianti_successive2001_geo/ORCO/9_10_2019_dec285/allegato_1.pdf. [Consultato il giorno 20 Dicembre 2020].
- [11] «Elementi di statistica - Ing. Salvatore Sorce,» 2010/2011. [Online]. Available: http://www1.unipa.it/sorce/didattica/diet1011/diet1011_05_Statistica.pdf. [Consultato il giorno 7 Dicembre 2020].
- [12] C. Moraca, «Il LiDAR e le sue capacità di rilievo,» [Online]. Available: <https://rivistageomedia.it/2016011913803/Rilievo-e-localizzazione/il-lidar-e-le-sue-capacita-di-rilievo>. [Consultato il giorno 29 Luglio 2020].

- [13] N. Camarretta, «Uso di dati telerilevati LiDAR e IKONOS per la caratterizzazione delle coperture forestali di Monte Morello,» [Online]. Available: <https://www.rivistadiagraria.org/articoli/anno-2015/uso-di-dati-telerilevati-lidar-e-ikonos-per-la-caratt.> [Consultato il giorno 29 Luglio 2020].
- [14] J. Carter, K. Schmid, K. Waters, L. Betzhold, B. Hadley, R. Mataosky, J. Halleran e NOAA Coastal Services Center, «Lidar 101: An Introduction to Lidar Technology, Data, and Applications,» *NOAA Coastal Services Center, Charleston, SC*, 2012.
- [15] A. Floris, F. Clementel, C. Farruggia e G. Scrinzi, «Stima su base LiDAR delle provvigioni legnose forestali: uno studio per la Foresta di Paneveggio,» *Rivista Italiana di Telerilevamento*, pp. 15-32, 2010.
- [16] A. Cina, «Principi di: fotogrammetria, raddrizzamento e ortofoto,» Torino, Corso di Geomatica 2016-2017, p. slide 50.
- [17] G. Scrinzi, «Precisione degli inventari assestamentali per cavallettamento totale: un'analisi di trent'anni di esperienza applicativa in Trentino,» *Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e l'Alpicoltura*, vol. XI, pp. 143-186, 1989.
- [18] J. White, M. A. Wulder, M. Vastaranta, N. C. Coops, D. Pitt e M. Woods, «The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning,» *Forests*, vol. 4, n. White, J.C.; Wulder, M.A.; Vastaranta, M.; Coops, N.C.; Pitt, D.; Woods, M. The utility of image-based point clouds for forest inventory: A comparison with airborne laser scanning. *Forests* 2013, 4, 518–536., p. 518–536, 2013.
- [19] J. U. Eitel, T. S. Magney, L. A. Vierling, T. T. Brown e D. R. Huggins, «LiDAR based biomass and crop nitrogen estimates for rapid, non-destructive assessment of wheat nitrogen status,» *Field Crops Res.*, n. 159, pp. 21-32, 2014.
- [20] P. A., «Impiego di dati LiDAR per la creazione di mappe tematiche a supporto del tecnico forestale,» 2011. [Online]. Available: http://tesi.cab.unipd.it/41155/1/PENASA_ANDREA.pdf. [Consultato il giorno 27 Maggio 2021].
- [21] H. E. Andersen, S. E. Reutebuch e G. F. Schreuder, «Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model,» *In Proceedings of the 1st International Precision Forestry Symposium, Seattle, WA, USA*, pp. 11-21, 17–20 June 2001.
- [22] M. Vastaranta, T. Kantola, P. Lyytikäinen-Saarenmaa, M. Holopainen, V. Kankare, M. A. Wulder, J. Hyypä e H. Hyypä, «Area-based mapping of defoliation of Scots pine stands using airborne scanning LiDAR,» *Remote Sens.*, vol. 5, pp. 1220-1234, 2013.
- [23] S. E. Reutebuch, R. J. McGaughey, H. E. Andersen e W. W. Carson, «Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy,» *Can. J. Remote Sens.*, n. 29, pp. 527-535, 2003.
- [24] M. A. Brovelli, A. Cina, M. Crespi, L. Garretti, A. Lingua e A. Manzino, «Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala,» [Online]. Available: <http://centrointerregionale->

gis.it/ortoimmagini/cisis_ortofoto_dtm_grande%20scala_v8.pdf. [Consultato il giorno 29 Luglio 2020].

- [25] M. Latella, M. B. Bertagni, P. Vezza e C. Camporeale, «An Integrated Methodology to Study Riparian Vegetation Dynamics: From Field Data to Impact Modeling.,» *Journal of Advances in Modeling Earth Systems (JAMES)*, n. 12, 2020.
- [26] A. Strickler, «Beiträge zur frage der geschwindigkeits formel und der rauigkeitszahlen für ströme,kanale und geschlossene leitungen (Some contributions to the problem of the velocity formula and roughness factors for rivers, canals and closed conduits),» *Mitteilungen des Eidgenossischen Amtes für Wasserwirtschaft, No. 16, Bern Switzerland.*, 1923.
- [27] P. Y. Julien, «River mechanics.,» *Cambridge, UK: Cambridge University Press.*, 2018.
- [28] FHWA, «Design charts for open-channel flow.,» *Washington, DC: US Department of Transportation.*, 1979.
- [29] E. Meyer-Peter e R. Müller, «Formulas for bed-load transport. In Proceedings of the 2nd Meeting of International Association for Hydraulic Research,» *Stockholm, Sweden: IAHR.*, pp. 39-64, 1948.
- [30] «Caratteristiche Laser Rangefinder TruPulse 200,» [Online]. Available: <https://www.lasertech.com/TruPulse-Laser-Rangefinder.aspx>. [Consultato il giorno 24 luglio 2020].
- [31] X. Lu, Q. Guo, W. Li e J. Flanagan, «A bottom-up approach to segment individual deciduous trees using leaf-off lidar point cloud data.,» *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, n. 94, p. 1–12, 2014.
- [32] M. Latella, F. Sola e C. Camporeale, «A Density-Based Algorithm for the Detection of Individual Trees from LiDAR Data,» *Remote Sens*, n. 13, p. 322, 2021.
- [33] X. Yu, J. Hyypä, M. Holopainen e M. Vastaranta, «Comparison of area-based and individual tree-based methods for predicting plot-level forest attributes.,» *Remote Sens*, n. 2, p. 1481–1495, 2010.
- [34] Y. Bian, P. Zou, Y. Shu e R. Yu, «Individual tree delineation in deciduous forest areas with LiDAR point clouds,» *Can. J. Remote Sens*, n. 40, p. 152–163, 2014.
- [35] D. Mongus e B. Žalik, «An efficient approach to 3D single tree-crown delineation in LiDAR data,» *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens*, n. 108, p. 219–233, 2015.
- [36] B. Koch, U. Heyder e H. Weinacker, «Detection of individual tree crowns in airborne lidar data,» *Photogramm. Eng. Remote Sens*, n. 72, p. 357–363, 2006.
- [37] J. Hyypä, O. Kelle, M. Lehtikainen e M. Inkinen, «A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners,» *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, n. 39, p. 969–975, 2001.

- [38] A. Persson, J. Holmgren e U. Soderman, «Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner.,» *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, n. 68, p. 925–932, 2002.
- [39] Q. Chen, D. Baldocchi, P. Gong e M. Kelly, «Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data,» *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, n. 72, p. 923–932, 2006.
- [40] W. Li, Q. Guo, M. K. Jakubowski e M. Kelly, «A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud.,» *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, n. 78, p. 75–84, 2012.
- [41] Y. Hirata, N. Furuya, M. Suzuki e H. Yamamoto, «Airborne laser scanning in forest management: Individual tree identification and laser pulse penetration in a stand with different levels of thinning,» *For. Ecol. Manag.*, n. 258, p. 752–760, 2009.
- [42] H. E. Andersen, S. E. Reutebuch e G. F. Schreuder, «Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model,» *In Proceedings of the 1st International Precision Forestry Symposium, Seattle, WA, USA*, pp. 11-21, 17–20 June 2001.
- [43] D. A. Kwak, W. K. Lee, J. H. Lee, G. S. Biging e P. Gong, «Detection of individual trees and estimation of tree height using LiDAR data,» *J. For. Res.*, n. 12, p. 425–434, 2007.
- [44] J. J. Richardson e L. M. Moskal, «Strengths and limitations of assessing forest density and spatial configuration with aerial LiDAR,» *Remote Sens. Environ.*, n. 115, p. 2640–2651, 2011.
- [45] Z. Ma, Y. Pang, D. Wang, X. Liang, B. Chen, H. Lu, H. Weinacker e B. Koch, «Individual Tree Crown Segmentation of a Larch Plantation Using Airborne Laser Scanning Data Based on Region Growing and Canopy Morphology Features,» *Remote Sens.*, n. 12, p. 1078, 2020.
- [46] J.-. R. Roussel, J. Caspersen, M. Béland, S. Thomas e A. Achim, «Removing bias from LiDAR-based estimates of canopy height: Accounting for the effects of pulse density and footprint size.,» *Remote Sensing of Environment*, n. 198, pp. 1-16, 2017.
- [47] P. Daina, «Architettura idraulica,» [Online]. Available: http://www.architetturadeglialberi.it/architettura-idraulica/#_ftn1. [Consultato il giorno 28 Luglio 2020].
- [48] C. Eloy, «Leonardo's rule, self-similarity, and wind-induced stresses in trees,» *Physical Review Letters*, n. 107, 2011.
- [49] G. West, J. Brown e B. Enquist, «A general model for the origin of allometric scaling laws in biology.,» *Science*, n. 267, pp. 122-126, 1997.
- [50] P. D. Miles e W. D. Smith, «Specific Gravity and Other Properties of Wood and Bark for 156 Tree Species Found in North America.,» *U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station.*, vol. 38, 2009.
- [51] M. Latella, «Webthesis,» 2018. [Online]. Available: <https://webthesis.biblio.polito.it/view/creators/Latella=3AMelissa=3A=3A.default.html>. [Consultato il giorno 30 marzo 2021].

- [52] «INFC,» [Online]. Available: https://www.inventarioforestale.org/sites/default/files/datiinventario/Cla_veg.pdf. [Consultato il giorno 8 Ottobre 2020].
- [53] M. F. Ker, «Tree biomass equations for seven species in Southwestern New Brunswick,» *Maritimes Forest Research Centre, Fredericton, New Brunswick. Canadian Forestry Service, Environment Canada. Information Report M-X-114*, 1980.
- [54] B. Freedman, P. N. Duinker, H. J. Barclay, R. Morash e U. Prager, «Forest biomass and nutrient studies in Central Nova Scotia.,» *Maritimes Forest Research Centre, Fredericton, New Brunswick. Canadian Forestry Service, Environment Canada. Information Report M-X-134*, 1982.
- [55] J. C. Jerkins, D. C. Chojnacky, L. S. Heath e R. A. Birdsey, «National-Scale Biomass Estimators for United States Tree species.,» *Forest Science*, p. 12–35, 2003.
- [56] L. Heath, M. Hansen, J. Smith e P. Miles, «Investigation into calculating tree biomass and carbon in the FIADB using a biomass expansion factor approach.,» *USDA Forest Service Proceedings – RMRS -P-56*, 2009.
- [57] «Forum peso del legname,» [Online]. Available: <https://lamotosega.forumattivo.com/t3700-peso-del-legname-cubatura-e-dendrometria>. [Consultato il giorno 17 Dicembre 2020].
- [58] «Istituto Agrario,» [Online]. Available: https://www.istitutoagrariosartor.edu.it/wp-content/uploads/2019/02/cubatura_legname.pdf. [Consultato il giorno 19 Gennaio 2021].
- [59] «Deltares,» [Online]. Available: <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>. [Consultato il giorno 3 marzo 2021].
- [60] T. Ghisu, «Introduction to meshing,» [Online]. Available: https://people.unica.it/tizianoghisu/files/2015/03/intro_meshing.pdf. [Consultato il giorno 17 Maggio 2021].
- [61] «3D/2D modelling suite for integral water solutions Delft3D User Manual,» [Online]. Available: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf. [Consultato il giorno 5 Maggio 2021].
- [62] D. Klopstra, H. J. Barneveld, J. M. Van Noortwijk e E. H. Van Velzen, «Analytical model for hydraulic roughness of submerged vegetation.,» *Proceedings, Congress of the International Association of Hydraulic Research, IAHR.*, 1997.
- [63] F. Visentin, «Triangolazione di Delaunay,» 2013. [Online]. Available: http://profs.scienze.univr.it/caliari/aa1213/calcolo_scientifico/Visentin.pdf. [Consultato il giorno 16 Giugno 2021].
- [64] «Access to Sentinel data,» [Online]. Available: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access>. [Consultato il giorno 21 giugno 2021].

- [65] «Bollettino idrologico in sintesi,» [Online]. Available: <http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/acqua/risorsa-idrica/H-Q-giornaliere.html#archivioIdroGiornaliere>. [Consultato il giorno 2 giugno 2021].
- [66] «Arpa Piemonte - Bollettino idrologico in sintesi del 13/06/2021,» [Online]. Available: http://www.arpa.piemonte.it/export//bollettini/bollettino_idrosintesi/20210613.pdf. [Consultato il giorno 2 giugno 2021].
- [67] R. J. Naiman e H. Décamps, «The Ecology of Interfaces: Riparian Zones.,» *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 28, n. 1, pp. 621-658, 1997.
- [68] «ACQUA, VEGETAZIONE, CLIMA: L'AVVENTO DELL'ECOIDROLOGIA.,» 22 marzo 2021. [Online]. Available: https://www.lincoi.it/sites/default/files/XX_Giornata_acqua2021_Fascicolo_abstract.pdf. [Consultato il giorno 22 marzo 2021].
- [69] F. Caponi, D. F. Vetsch e A. Siviglia, «A model study of the combined effect of above and below ground plant traits on the ecomorphodynamics of gravel bars.,» *Scientific Reports*, vol. 10(1), p. 1–14, 2020.
- [70] M. B. Bertagni, P. Perona e C. Camporeale, «Parametric transitions between bare and vegetated states in water-driven patterns.,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115(32), pp. 8125-8130, 2018.
- [71] R. Vesipa, C. Camporeale e L. Ridolfi, «Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: Processes and models.,» *Advances in Water Resources*, vol. 110, pp. 29-50, 2017.
- [72] C. Camporeale e L. Ridolfi, «Riparian vegetation distribution induced by river flow variability: A stochastic approach.,» *Water Resour. Res.*, n. 42, pp. 1-13, 2006.
- [73] L. Ridolfi, P. D'Odorico e F. Laio, «Noise-induced phenomena in the environmental sciences.,» *Cambridge University Press.*, 2011.
- [74] L. Alfieri, P. Burek, L. Feyen e G. Forzieri, «Global warming increases the frequency of river floods in Europe.,» *Hydrology and Earth System Sciences*, n. 19, p. 2247–2260, 2015.
- [75] L. Strom, R. Jansson, C. Nilsson, M. E. Johansson e S. Xiong, «Hydrologic effects on riparian vegetation in a boreal river: an experiment testing climate change predictions.,» *Global Change Biology*, n. 17, p. 254–267, 2011.
- [76] G. T. Auble, J. M. Friedman e M. L. Scott, «Relating riparian vegetation to present and future streamflows.,» *Ecological Applications*, n. 4, p. 544–554, 1994.
- [77] «Arpa Piemonte - Bollettino idrologico in sintesi del 23/06/2020,» [Online]. Available: http://www.arpa.piemonte.it/export//bollettini/bollettino_idrosintesi/20200623.pdf. [Consultato il giorno 2 giugno 2021].
- [78] «Arpa Piemonte - Bollettino idrologico in sintesi del 06/04/2020,» [Online]. Available: http://www.arpa.piemonte.it/export//bollettini/bollettino_idrosintesi/20200406.pdf. [Consultato il giorno 2 giugno 2021].