



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**MODELLAZIONE ECO-MORFODINAMICA DEL
TORRENTE ORCO**

Relatore

Prof. Carlo Vincenzo Camporeale

Correlatore

Ing. Melissa Latella

Candidata

Stefania Cicorello

s276942

SESSIONE DI LAUREA MARZO/APRILE 2022

ABSTRACT

Recenti studi idraulici hanno posto in evidenza come la vegetazione nelle fasce ripariali dei corsi d'acqua ricopra un ruolo attivo nei processi fluviali, correlandosi ad essi attraverso dinamiche complesse, spesso non lineari, di reciproca interazione e dipendenza.

Tale consapevolezza, tuttavia, non trova attualmente completa applicazione nei software di modellazione idrodinamica. In essi risulta infatti possibile simularne esclusivamente gli effetti sul flusso tramite la definizione di contributi additivi alla scabrezza di fondo, per i quali non è previsto un aggiornamento automatico in ragione dell'evoluzione ecologica della vegetazione.

Scopo del presente lavoro di tesi è l'introduzione e la calibrazione di un approccio di modellazione ibrido potenzialmente in grado di ricostruire uno scenario realistico di interazione fra gli aspetti di flusso e trasporto solido e la vegetazione. In particolare ciò è reso possibile dalla partizione della simulazione in esecuzioni successive, al termine di ciascuna delle quali viene introdotto un segmento di calcolo in grado di aggiornare le caratteristiche ecologiche delle piante in risposta ai processi intercorsi in termini di crescita, mortalità e riproduzione e di somministrare al passo successivo i dati di vegetazione aggiornati. Tale approccio trae le basi da precedenti lavori di ricerca ma si differenzia per le leggi di crescita e le specie considerate.

L'analisi è stata condotta per un tratto di torrente Orco, in riferimento alle due specie pioniere a maggiore diffusione, ossia salici (*Salix alba L.*) e pioppi (*Populus tremula L.*) ed ha portato alla validazione dell'approccio di modellazione, aprendone le possibilità di impiego anche per analisi previsionali.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. L'AREA STUDIO.....	5
3. DATI	13
3.1. DATI TOPOGRAFICI.....	13
3.2. DATI IDROMETRICI.....	14
3.3. DATI GRANULOMETRICI	15
3.4. DATI DI VEGETAZIONE.....	16
4. ANALISI IDRO-MORFOLOGICA	21
4.1. ANALISI STORICA DELLE PORTATE	21
4.2. ESTRAZIONE DELLE CURVE DI DURATA DELLE PORTATE	25
4.3. TARATURA DELLA SCALA DI DEFLUSSO	29
4.4. ANALISI DELLE PORTATE MORFODINAMICAMENTE ATTIVE.....	33
5. MODELLAZIONE NUMERICA.....	38
5.1. D-Flow Flexible Mesh (D-FlowFM).....	38
5.2. INTRODUZIONE ALLA MODELLAZIONE DELLA VEGETAZIONE	39
5.2.1. CONDIZIONE STATICA	39
5.2.2. CONDIZIONE DINAMICA.....	40
5.3. MODELLAZIONE DELLA VEGETAZIONE	41
5.3.1. IPOTESI INIZIALI DI MODELLO.....	41
5.3.2. IPOTESI INIZIALI DI LAVORO	48
5.3.3. STRUTTURA CONCETTUALE DEL MODELLO.....	51
6. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IN MATLAB.....	58
6.1. ESTRAZIONE PRELIMINARE DI DATI PER IL SETUP: inid3d_linear	59
6.2. COMPUTAZIONI ECOLOGICHE PRELIMINARI: iniveg_pt1mod	60
6.3. CALCOLO DEI FATTORI DI CRESCITA: iniGrowthStrategy_linear.....	61
6.4. ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE INIZIALI: initial_veg_import	61
6.5. ESECUZIONE DELLA PRIMA SIMULAZIONE: iniwork_linear.....	62
6.6. CALCOLI DI CRESCITA : GrowthStrategy_cottonwood_linear.....	64
6.7. SETUP PER LA SIMULAZIONE SUCCESSIVA: d3dadmin.....	65
6.8. ESTRAZIONE DEI DATI DALLA SIMULAZIONE PRECEDENTE: extract_par	65
6.9. SIMULAZIONE DELLA COLONIZZAZIONE: colonisation.....	66
6.10. SIMULAZIONE DELL'ADATTAMENTO: settlement	67
6.11. COMPUTO DELLA MORTALITA': mortality_fract_av.....	67
6.12. STAMPA DELLE MAPPE ECOLOGICHE: output_maker.....	68
6.13. ASSEMBLAGGIO DEI CODICI E RUN DELLE SIMULAZIONI: iniveg_pt2mod.....	68

7.	CALIBRAZIONE DELLE LEGGI DI CRESCITA E SETUP DEL MODELLO	70
7.1.	CALIBRAZIONE DELLE LEGGI DI CRESCITA	70
7.2.	SETUP IDRO-MORFOLOGICO.....	72
8.	MODELLO RADICALE ALTERNATIVO	77
8.1.	DEFINIZIONE TEORICA	77
8.2.	IMPLEMENTAZIONE DELL'APPROCCIO STOCASTICO PER LE RADICI	81
9.	CALIBRAZIONE DEL MODELLO	83
9.1.	SIMULAZIONE A MORFOLOGIA COSTANTE.....	83
9.2.	SIMULAZIONE CON MORFOLOGIA DINAMICA	87
9.3.	SIMULAZIONE CON MODELLO RADICALE AVANZATO.....	99
10.	CONCLUSIONI	106
	RINGRAZIAMENTI	109
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	110

INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1 INDIVIDUAZIONE DELLE POTENZIALI AREE STUDIO ZONA A E ZONA B (GOOGLE EARTH, 2021)	7
FIGURA 2 INDIVIDUAZIONE DELLA POTENZIALE AREA DI STUDIO ZONA C (GOOGLE EARTH, 2021)	8
FIGURA 3 ANALISI STORICA DELLA CARTOGRAFIA RELATIVA ALLA ZONA A (CARToVIEW, 2021)	9
FIGURA 4 ANALISI STORICA DELLA CARTOGRAFIA RELATIVA ALLA ZONA B (CARToVIEW, 2021).....	10
FIGURA 5 ANALISI STORICA DELLA CARTOGRAFIA RELATIVA ALLA ZONA C (CARToVIEW, 2021)	11
FIGURA 6 CONFRONTO DELLE ZONE POTENZIALI CON I DATI OTTENUTI DAL RILIEVO LIDAR	12
FIGURA 7 CONFRONTO DELLE ZONE POTENZIALI CON L'UBICAZIONE DI SALICETI E PIOPPETI SECONDO LA MAPPA INFC	12
FIGURA 8 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO OTTENUTO DALLE ELABORAZIONI CONDOTTE DAL POLITECNICO DI TORINO (2020)	14
FIGURA 9 CURVE GRANULOMETRICHE DEDOTTE DAI CAMPIONAMENTI EFFETTUATI (POLITECNICO DI TORINO DIATI, 2020).....	15
FIGURA 10 INQUADRAMENTO SU IMMAGINI SATELLITARI DEGLI ESEMPLARI DI VEGETAZIONE IDENTIFICATI	16
FIGURA 11 INQUADRAMENTO DELLA CARTA FORESTALE (SIFOR, 2021) SU FOTO SATELLITARE CON CONFRONTO CON I DATI DISPONIBILI.....	17
FIGURA 12 CARTA FORESTALE (SIFOR, 2021) DEL TRATTO RILEVATO CON LIDAR	17
FIGURA 13 RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE DEI COEFFICIENTI ALLOMETRICI (REDOGLIA, 2021)	19
FIGURA 14 RISULTATO DELL'INTERPOLAZIONE DEI DATI DI VEGETAZIONE SULLA GRIGLIA DI CALCOLO	20
FIGURA 15 SERIE GIORNALIERE DELLE PORTATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE ARPA DI CUORGNÈ	22
FIGURA 16 PORTATE GIORNALIERE MEDIATE PER IL PERIODO 2004-2008 PRESSO LA STAZIONE ARPA DI CUORGNÈ.....	22
FIGURA 17 SERIE GIORNALIERE DELLE PORTATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE ARPA DI CASTELLAMONTE-SPINETO	23
FIGURA 18 PORTATE GIORNALIERE MEDIATE PER IL PERIODO 2010-2019 PRESSO LA STAZIONE ARPA DI CASTELLAMONTE SPINETO	23
FIGURA 19 SERIE GIORNALIERE DELLE PORTATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE ARPA DI SAN BENIGNO CANAVESE	24
FIGURA 20 PORTATE GIORNALIERE MEDIATE PER IL PERIODO 2002-2019 PRESSO LA STAZIONE ARPA DI SAN BENIGNO CANAVESE	24
FIGURA 21 CURVE DI DURATE DELLE PORTATE GIORNALIERE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI CUORGNÈ	26
FIGURA 22 CURVA DI DURATA DELLE PORTATE GIORNALIERE MEDIATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI CUORGNÈ PERIODO 2004-2008	26
FIGURA 23 CURVE DI DURATA DELLE PORTATE GIORNALIERE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI CASTELLAMONTE SPINETO	27
FIGURA 24 CURVA DI DURATA DELLE PORTATE GIORNALIERE MEDIATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI CASTELLAMONTE SPINETO PERIODO 2010-2019	27
FIGURA 25 CURVE DI DURATA DELLE PORTATE GIORNALIERE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI SAN BENIGNO CANAVESE	28
FIGURA 26 CURVA DI DURATA DELLE PORTATE GIORNALIERE MEDIATE DEL TORRENTE ORCO PRESSO LA STAZIONE DI SAN BENIGNO CANAVESE PERIODO 2002-2019	28
FIGURA 27 SCALA DI DEFLUSSO PER LA STAZIONE ARPA DI CUORGNÈ	30
FIGURA 28 SCALA DI DEFLUSSO PER LA STAZIONE ARPA DI CASTELLAMONTE SPINETO	31
FIGURA 29 SCALA DI DEFLUSSO PER LA STAZIONE ARPA DI SAN BENIGNO CANAVESE	31
FIGURA 30 MAPPE DELLE TENSIONI AL FONDO IN CORRISPONDENZA DELL ZONA C-PORTATE DA 5 m ³ /s A 20 m ³ /s	33
FIGURA 31 MAPPE DELLE TENSIONI AL FONDO IN CORRISPONDENZA DELL ZONA C-PORTATE DA 50 m ³ /s A 1000 m ³ /s	34
FIGURA 32 MAPPE DELLE TENSIONI AL FONDO IN CORRISPONDENZA DELL ZONA C-PORTATE DA 1200 m ³ /s A 2000 m ³ /s	35
FIGURA 33 PERCENTUALE DI AREA CON TRASPORTO SOLIDO DI FONDO ATTIVO IN RIFERIMENTO ALL'INTERO DOMINIO DI SIMULAZIONE E A QUELLO BAGNATO	36
FIGURA 34 RAPPRESENTAZIONE DELLA LEGGE DI CRESCITA LOGARITMICA ADOTTATA (BRÜCKNER ET AL., 2019).....	41
FIGURA 35 RAPPRESENTAZIONE DELLA STRUTTURA DOSE-EFFETTO DELLA LEGGE DI MORTALITÀ (VAN OORSCHOT ET AL., 2016)	43
FIGURA 36 LEGGI DI CRESCITA ADOTTATE PER ALTEZZA DEL FUSTO, LUNGHEZZA RADICALE E DENSITÀ (VAN OORSCHOT ET AL., 2016).....	46
FIGURA 37 LEGGI DI MORTALITÀ ADOTTATE PER LE DIFFERENTI CAUSE CONSIDERATE (VAN OORSCHOT ET AL., 2016).....	46
FIGURA 38 STRUTTURA DEI FILE "VEG#.TXT"	49
FIGURA 39 DIAGRAMMA DI FLUSSO CONCETTUALE RELATIVO ALLA COMUNICAZIONE FRA MATLAB E DELFT3D (VAN OORSCHOT ET AL., 2016)	52
FIGURA 40 DIAGRAMMA DI FLUSSO RELATIVO AL FUNZIONAMENTO DEI CODICI.....	57
FIGURA 41 PUNTI NOTEVOLI DELLE CELLE COSTITUENTI LA MESH DI CALCOLO IN D-FlowFM (DFLOWFM USER MANUAL, 2021).....	59
FIGURA 42 SCHEMA CONCETTUALE DI FUNZIONAMENTO DEL CICLO DI CALCOLO	62
FIGURA 43 VISTE DEL MODELLO D-FlowFM DELL'AREA STUDIO CON E SENZA BATIMETRIA CON PARTICOLARE DELLA GRIGLIA QUADRATA.....	72

FIGURA 44 SERIE DI PORTATE PER LA ZONA STUDIO NEL PERIODO DI SIMULAZIONE 26/02/2019-23/03/2021.....	75
FIGURA 45 SISTEMA DI RIFERIMENTO ADOTTATO NEL MODELLO DI TRON ET AL (2014) ED INDICAZIONE DEI PARAMETRI IN GIOCO.....	77
FIGURA 46 PATTERN DI DISTRIBUZIONE DI BIOMASSA RADICALE IN FUNZIONE DEL LIVELLO E RELAZIONE CON IL VALORE CRITICO DA ESPORRE (CAPONI & SIVIGLIA, 2018)	80
FIGURA 47 MAPPE DI ALTEZZA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE STATICA DELL'INTERO PERIODO.....	84
FIGURA 48 MAPPE DI BIOMASSA CRESCIUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE STATICA.....	85
FIGURA 49 MAPPE DI BIOMASSA DECEDUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE STATICA	86
FIGURA 50 MAPPE DI ALTEZZA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA DELL'INTERO PERIODO.....	88
FIGURA 51 MAPPE DI BIOMASSA CRESCIUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA	89
FIGURA 52 MAPPE DI BIOMASSA DECEDUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA	90
FIGURA 53 CONFRONTO DEI RISULTATI DELLA SIMULAZIONE DINAMICA NON CALIBRATA CON LA RIPRESA AEREA DELLA ZONA	91
FIGURA 54 MAPPE DI ALTEZZA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA RICALIBRATA	92
FIGURA 55 MAPPE DI BIOMASSA CRESCIUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA RICALIBRATA	93
FIGURA 56 MAPPE DI BIOMASSA DECEDUTA DELLE DUE SPECIE IN RISULTATO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA RICALIBRATA.....	94
FIGURA 57 CONFRONTO DEI RISULTATI DEL MODELLO RICALIBRATO CON FOTO AEREA DELLA ZONA (GOOGLE EARTH, 2021)	95
FIGURA 58 CONFRONTO FRA I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE E I DATI LIDAR	95
FIGURA 59 CONFRONTO FRA LA MAPPA OTTENUTA E LA FOTO AEREA DEL TRATTO DI MONTE CON PARTICOLARE DELLE ZONE COLONIZZATE	96
FIGURA 60 CONFRONTO FRA LA MAPPA OTTENUTA E LA FOTO AEREA DEL TRATTO DI VALLE CON PARTICOLARE DELLE ZONE COLONIZZATE	97
FIGURA 61 CONFRONTO FRA LE MAPPE INIZIALI E FINALI E LA FOTO AEREA DEL TRATTO (GOOGLE EARTH, 2021) CON PARTICOLARE DELLE ZONE SOGGETTE A MORTALITÀ.....	98
FIGURA 62 PROBABILITY DENSITY FUNCTION (PDF) B_r DELLA BIOMASSA RADICALE PER TRE CELLE DEL DOMINIO	99
FIGURA 63 MAPPE DI ALTEZZA DELLA VEGETAZIONE IN ESITO ALLA SIMULAZIONE DINAMICA CON IL MODELLO RADICALE AVANZATO	100
FIGURA 64 MAPPE DI ALTEZZA A FINE SIMULAZIONE ASSOCIATE ALLA LEGGE LOGARITMICA (SINISTRA, BLU) E STOCASTICA (DESTRA, VERDE). 101	
FIGURA 65 CONFRONTO FRA I RISULTATI DELLA SIMULAZIONE CON MODELLO RADICALE STOCASTICO E I DATI LIDAR	101
FIGURA 66 LUNGHEZZE RADICALI FINALI ASSOCIATE ALLA LEGGE LOGARITMICA (SINISTRA, BLU) E STOCASTICA (DESTRA, VERDE)	102
FIGURA 67 LUNGHEZZE RADICALI ASSOCIATE ALLA LEGGE LOGARITMICA (SINISTRA, BLU) E STOCASTICA (DESTRA, VERDE) SINO AL 2020.....	103
FIGURA 68 LUNGHEZZE RADICALI ASSOCIATE ALLA LEGGE LOGARITMICA (SINISTRA, BLU) E STOCASTICA (DESTRA, VERDE) SINO AL 2021.....	104
FIGURA 69 CONFRONTO FRA LA MAPPA DI LUNGHEZZA RADICALE E I TIRANTI IN CONDIZIONI DI PIENA CON INDICAZIONE DELLE CANALIZZAZIONI OSSERVABILI.....	105

INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 1 COEFFICIENTI ALLOMETRICI E GREEN WOOD DENSITY RICAVATI DALLA CALIBRAZIONE.....	18
TABELLA 2 ANNI DI OSSERVAZIONI DISPONIBILI PORTATE MEDIE PER LE TRE STAZIONI ARPA	25
TABELLA 3 ALTEZZE IDROMETRICHE ASSOCIATE AI MINIMI VALORI DI PORTATA PER LE TRE STAZIONI ARPA	29
TABELLA 4 ALTEZZE IDROMETRICHE ASSOCIATE A PORTATA MINIMA E TIRANTE NULO PER LE TRE STAZIONI ARPA	30
TABELLA 5 RISULTATI DELL'INTERPOLAZIONE DEI DATI IDROMETRICI	32
TABELLA 6 COEFFICIENTI DELLA SCALA DI DEFLUSSO	32
TABELLA 7 PERCENTUALE DI AREA CON TRASPORTO SOLIDO DI FONDO ATTIVO SECONDO IL LIMITE DELLA RELAZIONE DI BROWNLIE CON CORREZIONE DI PARKER.....	37
TABELLA 8 CARATTERISTICHE GENERALI PER I TIPI DI VEGETAZIONE ANALIZZATI. PROSPETTO ESTRATTO DA VAN OORSCHOT ET AL. (2016).....	43
TABELLA 9 CARATTERISTICHE PER CIASCUN STADIO VITALE DEI SALICI. PROSPETTO ESTRATTO DA VAN OORSCHOT ET AL. (2016)	44
TABELLA 10 CARATTERISTICHE PER CIASCUN STADIO VITALE DEI PIOPPI. PROSPETTO ESTRATTO DA VAN OORSCHOT ET AL. (2016).....	45
TABELLA 11 ESEMPIO DI STRUTTURA DEL FILE "ALLOWED_COLONISATION.ARL"	49
TABELLA 12 TIPOLOGICO DEL FILE "INITIAL_DATA.ARL"	50
TABELLA 13 ESEMPIO DI FUNZIONAMENTO DELL'ALGORITMO DI CALCOLO DEI PERIODI FLOOD/DRY.....	66
TABELLA 14 RISULTATI DELLA CALIBRAZIONE DEL COEFFICIENTE G DELLA LEGGE DI CRESCITA DEI DIAMETRI	71
TABELLA 15 VALORI DI RIFERIMENTO DI G AL VARIARE DI Q.....	71

1. INTRODUZIONE

Il crescente interesse ai temi ambientali ed idraulici ha posto in evidenza l'importanza delle regioni fluviali, ossia le zone antistanti i corsi d'acqua in cui è possibile osservare la presenza di vegetazione autoctona. Gli ecosistemi di tali zone, definite anche fasce ripariali, risultano generalmente molto eterogenei, anche in sede di uno stesso corso d'acqua, in termini di specie presenti, distribuzione degli esemplari ed estensione spaziale, in ragione delle interazioni sviluppate fra i tre principali elementi costituenti, ossia il flusso idrico, il trasporto solido di materiale e la vegetazione stessa. Recenti studi hanno infatti evidenziato come essi sviluppino dinamiche spazio-temporali di interdipendenza complesse, spesso non lineari, su scale spaziali e temporali differenti (Vesipa et al., 2007) e che per tale motivo non possano essere trattati separatamente.

Tale consapevolezza rappresenta un punto di svolta nelle prospettive degli studi idraulici, in quanto storicamente la vegetazione era ritenuta un elemento passivo in grado di modificare i processi fluviali al più tramite l'introduzione di alterazioni nelle scabrezze di fondo (Vesipa et al., 2007), maggiorate laddove presenti esemplari, e nella coesione dei sedimenti, incrementata in presenza di apparati radicali efficacemente sviluppati o diminuita qualora essi siano soggetti a fenomeni di sradicamento.

Le risultanze degli studi condotti negli ultimi decenni hanno invece evidenziato come la vegetazione sia in grado di modellare attivamente la morfologia dei sistemi fluviali, stabilizzando le porzioni in cui è stanziata, riducendo così i fenomeni di erosione spondale e favorendo la formazione di canali più stretti ed incisi (van Oorschot et al., 2016), ed allo stesso tempo sia influenzata dai suddetti processi. Gli aspetti di flusso e trasporto solido giocano infatti un ruolo determinante in ciascuna delle fasi caratterizzanti il ciclo vitale degli esemplari, riassumibili in dispersione e attecchimento di materiale riproduttivo, germinazione di nuovi esemplari e sviluppo fino allo stadio adulto.

In particolare, come evidenziato da Vesipa et al. (2007), i processi riproduttivi sono strettamente correlati alle fluttuazioni dei livelli idrici in quanto da esse dipende la formazione di siti spogli adatti alla colonizzazione, possibile solo a seguito di eventi di piena di magnitudo sufficiente, la raccolta del materiale riproduttivo, costituito principalmente da semi ma anche da scarti vegetali in grado di porre radici, il trasporto tramite il meccanismo di idrocoria, ossia veicolazione da parte della corrente e la deposizione nei nuovi siti tramite una successione di sommersione ed esposizione degli stessi.

Successivamente, il buon esito delle fasi di germinazione dei semi e sviluppo dei germogli è strettamente vincolato dalle condizioni di flusso, in grado di esercitare una vera e propria selezione naturale dei nuovi esemplari. Tale fenomeno è stato ampiamente analizzato portando allo sviluppo del concetto di *Recruitment box model* (Mahooney & Rood, 1998), recentemente affiancato da quello di *Window of opportunity* (Caponi et al., 2019).

Nella fattispecie, le analisi condotte da Mahooney & Rood (1998), hanno evidenziato come per le specie riparie la nascita di nuovi esemplari sia funzione della combinazione fra l'elevazione del transetto fluviale su cui sono depositi i semi, il tasso di recessione della tavola d'acqua e la sincronizzazione temporale fra la dispersione dei semi e la successione idrologica di portate in grado di attivare i processi descritti al paragrafo precedente. Secondo tale approccio, risulta dunque possibile delimitare un dominio o *box* nello spazio creato da queste variabili in cui lo stanziamento di nuovi esemplari è favorito. Recentemente, a tale approccio è stato affiancato quello di *Window of opportunity*, secondo il quale è possibile delimitare una finestra temporale per i

processi riproduttivi, entro la quale il rispetto di condizioni idrodinamiche e morfodinamiche consente lo stanziamento di nuovi esemplari.

Infine, nelle fasi di sviluppo vegetale vero e proprio, la quantità e la distribuzione di biomassa all'interno degli esemplari è influenzata dalle pressioni ecologiche esercitate dai processi fluviali, riconducibili a fenomeni di anossia per sommersione idraulica o detritica, disseccamento e sradicamento indotto da sottoescavazione o eccesso di tensioni al fondo.

Tali condizioni inducono nella vegetazione degli stress di tipo ecologico, in grado di alterarne l'equilibrio eco-fisiologico (Vesipa et al., 2007). Qualora la magnitudo di tali perturbazioni sia compatibile con i limiti di tollerabilità degli esemplari, essi reagiscono modificando la ripartizione di biomassa fra le porzioni aeree e quelle sotterranee, convogliandola verso queste ultime nel caso ad esempio di condizioni siccitose, in modo da ripristinare una condizione stabile. Viceversa, nel caso di superamento delle soglie di tolleranza, insorgono fenomeni di mortalità, conseguenti ad una progressiva ed irreversibile perdita di biomassa.

Risulta dunque evidente come le interazioni fra vegetazione e processi fluviali siano innumerevoli, complesse ed articolate e che l'inclusione di tali dinamiche sia cruciale per l'esecuzione di una modellazione idraulica accurata e realistica.

Allo stato attuale, tuttavia, ciò non trova completa applicazione nei principali software dedicati, in quanto in essi risulta possibile simulare esclusivamente gli effetti passivi della vegetazione tramite l'introduzione di contributi additivi alle scabrezze di fondo. Questi, in particolare, sono correlabili alle principali caratteristiche ecologiche degli esemplari, tramite una serie di relazioni teoriche, quale ad esempio quella ricavata da Baptist et al. (2007), raccolta in 1.1.

$$C = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{c_b^2} + \frac{c_d n h_v}{2g}}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \frac{h}{h_v} \quad 1.1$$

Ove:

- C è la scabrezza della vegetazione secondo la formulazione di Chezy [$m^{0.5}/s$];
- c_b rappresenta la scabrezza dell'alveo naturale nella formulazione di Chezy [$m^{0.5}/s$];
- c_d è un coefficiente di drag variabile in base al tipo di vegetazione;
- n è la densità di vegetazione [$stem/m$]
- h_v è l'altezza della vegetazione [m]
- κ è la costante di Von Karman pari a 0.41;
- h è il tirante idraulico [m].

Una trattazione degli aspetti ecologici di questo tipo non consente dunque in primo luogo di aggiornare le caratteristiche in virtù dei processi di crescita intercorsi nell'arco del periodo simulato ed in secondo luogo la valutazione degli effetti descritti nei paragrafi precedenti, dei fenomeni idro-morfodinamici sulla vegetazione stessa, impedendo così la ricostruzione di uno scenario realistico di interazione.

Il presente lavoro è mirato alla validazione tramite confronto con dati raccolti sul torrente Orco, di un approccio ibrido di modellazione potenzialmente in grado di colmare il divario attualmente presente. In particolare esso è basato sull'associazione di un approccio statico di modellazione della vegetazione già implementato nel software D-FlowFM, con un algoritmo in grado di simulare i processi di crescita e mortalità cui essa è soggetta. Partizionando il processo di simulazione in una serie di esecuzioni successive, è infatti possibile aggiornare le caratteristiche ecologiche in

funzione dei risultati idraulici e morfologici derivanti dal passo precedente e fornire a quello successivo un quadro di vegetazione aggiornato sulla base di quanto effettivamente accaduto, inclusivo della naturale crescita cui essa è soggetta. In tal modo risulterebbe potenzialmente possibile ricostruire i processi fluviali con una realistica dinamica a feedback positivo fra le tre principali componenti costituenti.

Tale approccio trae le sue basi da tre principali lavori di ricerca condotti da van Oorschot et al. (2016), Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020) ma si discosta da essi per le specie di vegetazione considerate e per le leggi ecologiche di crescita adottate.

In particolare, lo studio effettuato da van Oorschot et al. (2016) ha analizzato nel dettaglio gli effetti sulle predizioni di assetto morfodinamico della modellazione della vegetazione riparia secondo un approccio dinamico, per diversi settaggi dei parametri funzionali, ed uno statico. L'analisi, focalizzata sulle due specie riparie comuni al presente lavoro, ossia salici (*Salix alba* L.) e pioppi (*Populus tremula* L.) è stata effettuata implementando un meccanismo funzionale analogo a quello già descritto nel paragrafo precedente ed ha evidenziato come la modellazione statica implichi una diminuzione dei fenomeni morfodinamici portando ad un assetto planimetrico pressochè fisso e poco aderente alla realtà, governato dalla vegetazione. L'adozione dell'approccio dinamico, invece, ha consentito di raggiungere un buon grado di corrispondenza con la realtà, evidenziando gli effetti morfodinamici della vegetazione, ossia la creazione ed il mantenimento di un sistema di meandrazione attivo, la creazione di canali di flusso più stretti ed incisi e la diminuzione della migrazione laterale tramite incremento di fenomeni di chute cutoff.

Il lavoro di Brückner et al. (2019) ha invece riguardato la simulazione dello stanziamento in una zona estuariale di una generica specie di vegetazione di tipo *saltmarshes*, ossia autoctona dell'ecosistema di palude salmastra tipico di alcune zone costiere, al fine di valutare gli effetti della relativa presenza sull'ambiente costiero, mettendo in luce come la presenza di vegetazione riduca l'intensità dei flussi di marea, facilitando così la sopravvivenza degli esemplari stessi ma contemporaneamente causi un incremento della durata dei periodi di sommersione, limitando così l'espansione degli stessi su larga scala spaziale.

I codici di calcolo adottati per tale modellazione, assunti come traccia per il presente lavoro, sono stati presentati ed analizzati in modo esaustivo nello studio condotto da Brückner et al. (2020). Esso è stato focalizzato all'analisi, con dettaglio della struttura modellistica adottata, delle interazioni fra i tre principali attori concorrenti nei processi di naturalizzazione degli ambienti di palude costiera, ossia lo stanziamento di nuovi esemplari, la colonizzazione da parte di alcune specie di alga tipiche di tale ecosistema e la formazione di strati ad alto contenuto di materiale fine adatti allo stanziamento di nuovi esemplari.

Come già anticipato, il presente lavoro si discosta dai precedenti lavori di Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020) in quanto si pone in primo luogo di analizzare le specie pioniere delle fasce fluviali, sostanzialmente diverse dalle specie di tipo *saltmarshes*, ecologicamente più affini a specie erbacee, per le maggiori dimensioni raggiunte, l'assenza di una regressione delle caratteristiche ecologiche al termine dei periodi di crescita e l'assenza di suscettibilità al contenuto di frazioni fini del sedimento. Le ulteriori modifiche sostanziali hanno riguardato l'apertura alla possibile presenza di vegetazione preesistente, non prevista dai lavori di Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020) e la modifica delle leggi di crescita adottate da van Oorschot et al. (2016). In particolare ciò è consistito nell'introduzione di una legge allometrica già calibrata per la correlazione fra il diametro e l'altezza e di una legge di tipo logistico, calibrata sulla base dei dati disponibili, per l'evoluzione temporale dei diametri. E' stato inoltre analizzato in maggior dettaglio il segmento radicale, affiancando la legge di crescita logaritmica prevista anche dai lavori precedenti ad una descrittiva dell'interazione fra l'apparato e le fluttuazioni stocastiche dei livelli idrici.

La trattazione è suddivisa in 10 capitoli, compreso il presente ed è stata sviluppata per un tratto di Torrente Orco, affluente in sponda sinistra del fiume Po.

Nel Capitolo 2 viene contestualizzata l'area studio considerata, con indicazione del processo decisionale che ha portato alla scelta. Il Capitolo 3 è deputato alla presentazione dei dati di tipo topografico, granulometrico, idrologico ed ecologico disponibili per la zona. Successivamente, nel Capitolo 4, vengono effettuate delle analisi dei dati idrologici mirati a vagliare gli aspetti idraulici e morfodinamici del tratto esaminato.

Il processo di modellazione della vegetazione è analizzato in primo luogo da un punto di vista teorico nel Capitolo 5 e successivamente presentato nel dettaglio di tutti gli aspetti tecnici nel Capitolo 6. Il Capitolo 7 raccoglie le fasi di calibrazione delle leggi di crescita e di setup idro-morfologico delle simulazioni, mentre il Capitolo 8 è deputato alla presentazione del modello radicale di tipo stocastico.

I risultati delle simulazioni effettuate sono presentati nel Capitolo 9, nel quale si effettua un'analisi critica mirata alla calibrazione del modello. Nel Capitolo 10 infine, sono raccolte le conclusioni maturate al termine dell'esecuzione delle differenti simulazioni e sono indicati gli aspetti di potenziale affinamento e miglioramento.

2. L'AREA STUDIO

La scelta del tratto di maggior interesse per il presente lavoro è stata effettuata sulla base dei seguenti criteri:

1. Disponibilità di dati batimetrici;
2. Disponibilità di dati idrologici;
3. Presenza di siti disponibili alla colonizzazione delle specie arboree;
4. Osservazione tramite cartografia storica di dinamicità del tratto in termini di evoluzione della vegetazione e dell'assetto morfologico.

In base ai primi due requisiti, in particolar modo quello di tipo topografico, è stata in primo luogo isolata la porzione di torrente Orco compresa fra i comuni di Cuoragnè e San Benigno Canavese, in quanto per tale tratto sono disponibili un Modello Digitale del Terreno elaborato dal Politecnico di Torino con precisione metrica ed i dati idrometrici provenienti da 3 stazioni ARPA come descritto nel Capitolo 3.

Successivamente, in ottemperanza al quarto criterio, si sono ricercate zone in cui storicamente sono stati osservati fenomeni di transizione dell'alveo attivo, individuando tre tratti di particolare interesse, evidenziati su base satellitare Google Earth (Google Earth, 2021) in Figura 1 e Figura 2 designati rispettivamente come Zona A, Zona B e Zona C.

Nella fattispecie, la Zona A, situata all'altezza del comune di Castellamonte, è costituita da un tratto a carattere intrecciato con un numero di canali attivi variabile fra 1 e 3, che porta alla presenza di ampie unità di canale emerso. Dall'analisi storica della cartografia degli ultimi 20 anni (CarToView, 2021), effettuata in Figura 3, è possibile osservare una progressiva vegetazione di tali unità dapprima di tipo barra laterale e interna, progressivamente trasformate in isole vegetate. Tale transizione consente di catalogare il tratto come attivo dal punto di vista sia vegetativo che morfologico e per tale motivo particolarmente adatto alla modellazione oggetto del presente lavoro.

La Zona B, individuata in prossimità dell'estremità nord del comune di Rivarolo Canavese, è caratterizzabile con un andamento di transizione, con un assetto sinuoso su grande scala e con concomitante presenza di canali intrecciati. Dall'analisi storica (CarToView, 2021), evidenziata in Figura 4 è possibile osservare una migrazione verso valle del meandro con esposizione di una ampia zona colonizzabile e conseguentemente anche in tal caso è possibile qualificare il tratto come attivo ed interessante per i sopraccitati fini.

La Zona C, situata a sud del comune di Cortereggio, evidenzia la presenza concomitante di più canali attivi e di una sinuosità a grande scala e per tale motivo può essere assunto un andamento di transizione anche per essa. In analogia a quanto risultato per le zone precedenti, è possibile denotare il tratto come attivo a livello morfologico ed ecologico, avendo subito nel corso degli anni una migrazione del meandro verso monte con concomitante spostamento verso la sinistra orografica del canale attivo, come visibile in Figura 5, ed evidenziando la presenza di ampie zone da parte delle specie riparie.

La scelta del tratto effettivamente impiegato è stata ponderata sulla base della effettiva disponibilità dei dati ecologici necessari alla simulazione di cui al presente lavoro. In particolare, come già evidenziato nel capitolo introduttivo, esso è incentrato sulla validazione dell'approccio di modellazione dinamica della vegetazione tramite confronto con dati LiDAR raccolti in due successive campagne di rilievo. Per tale ragione, risulta evidente che la zona campionata per

l'analisi ricada nell'area acquisita nel suddetto rilevamento. In base a tale requisito, dunque, è stata scartata la Zona A in quanto, come visibile in Figura 6 è situata al di fuori della zona battuta.

Lungo il tratto rilevato, anticipando quanto dettagliatamente trattato nei capitoli successivi, occorre identificare e perimetrare le differenti specie riparie compresenti, isolando i tratti ove siano presenti quelle di specifico interesse, ossia salici e pioppi, ritenute tali in quanto pioniere delle zone fluviali morfologicamente attive. Conseguentemente, confrontando l'ubicazione di Zona B e Zona C con la distribuzione delle specie riportata sulla mappa forestale prodotta dalla regione Piemonte nell'edizione 2006 (Sistema Informativo Forestale Regionale (SIFOR), 2021), come da Figura 7, è possibile concludere che la presente analisi sarà condotta relativamente alla Zona C, data l'assenza delle due specie di cui sopra nell'altra.



Figura 1 Individuazione delle potenziali aree studio Zona A e Zona B (Google Earth, 2021)



Figura 2 Individuazione della potenziale area di studio Zona C (Google Earth, 2021)

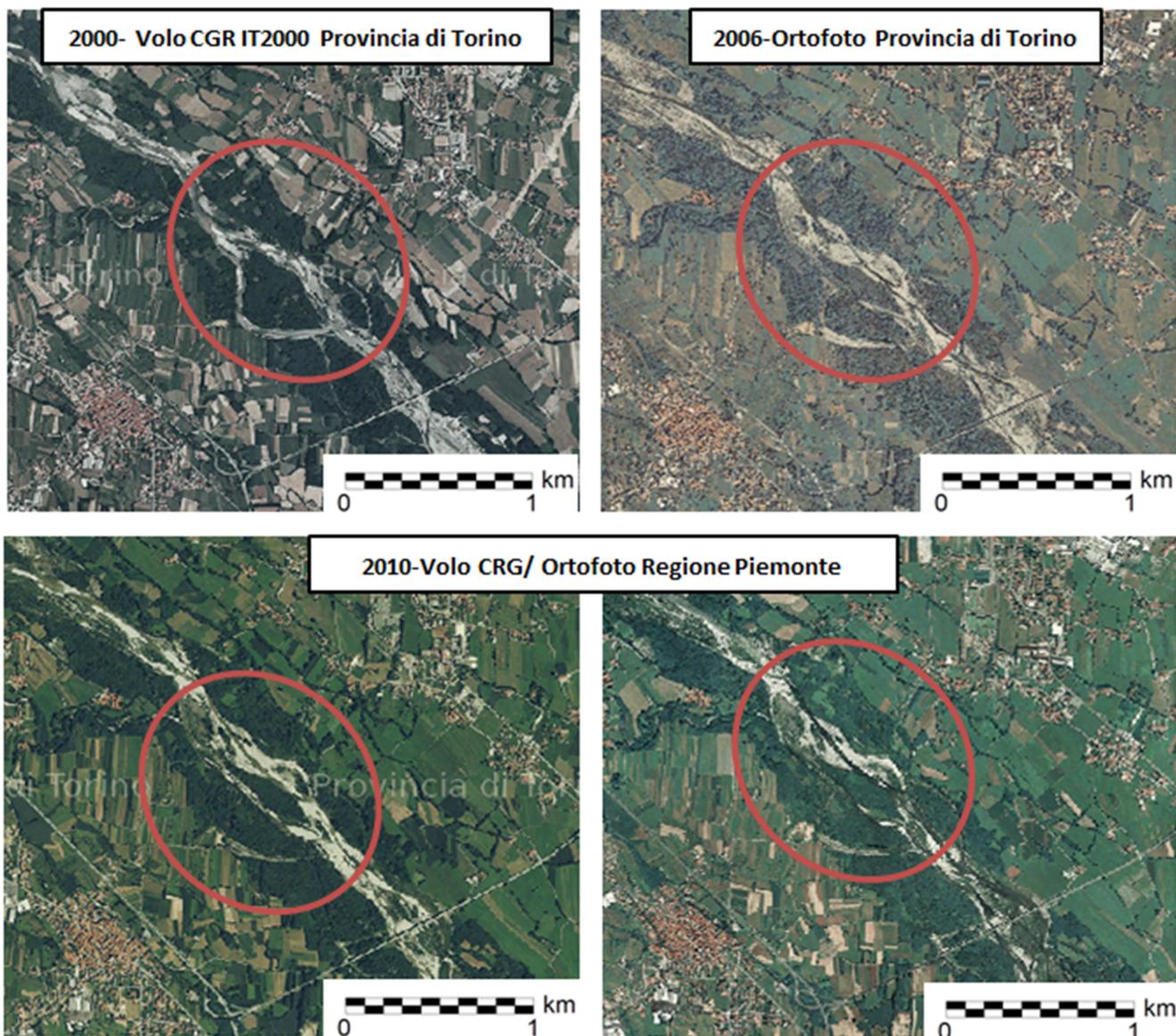


Figura 3 Analisi storica della cartografia relativa alla Zona A (CarToView, 2021)

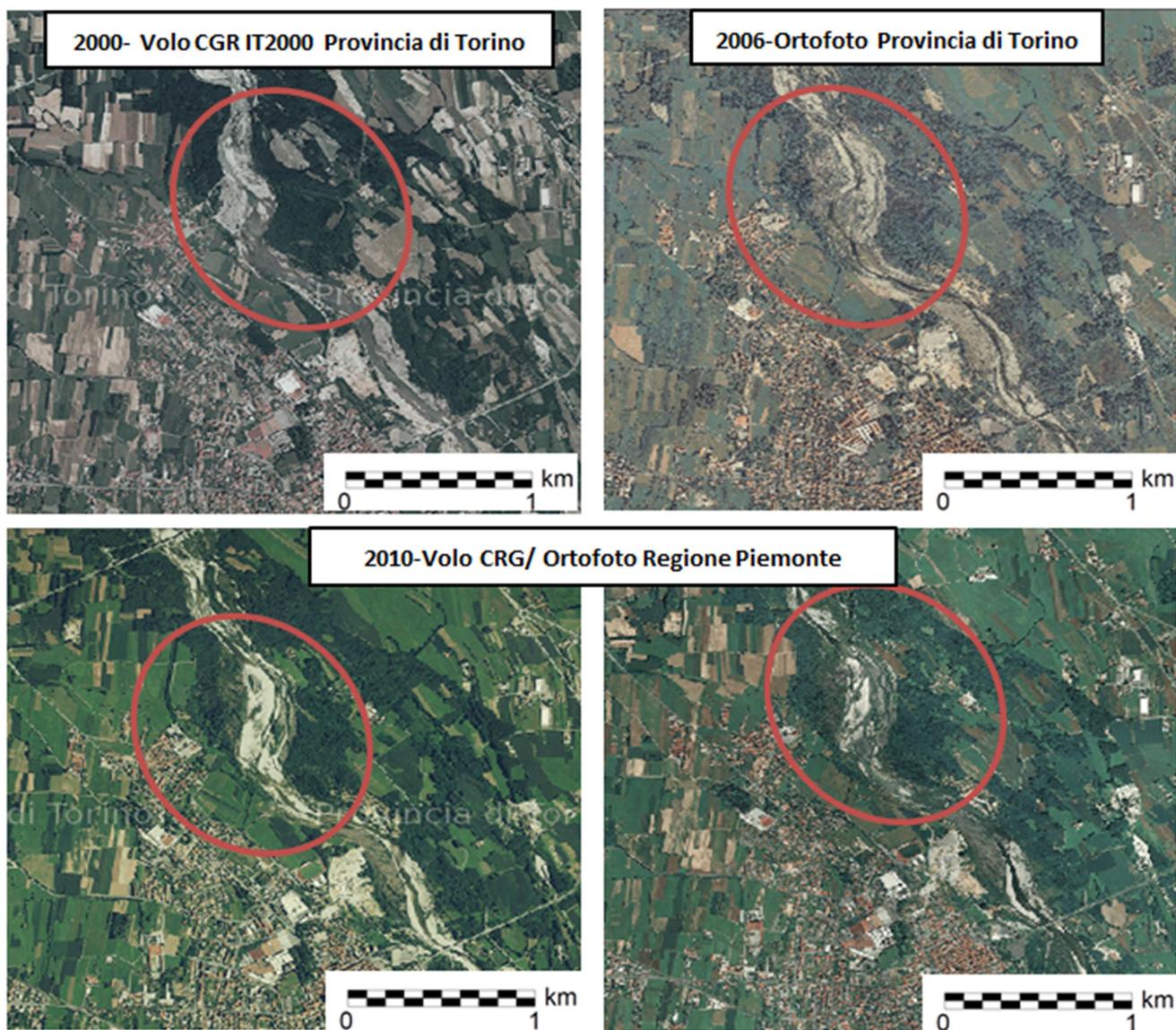


Figura 4 Analisi storica della cartografia relativa alla zona B (CarToView, 2021)

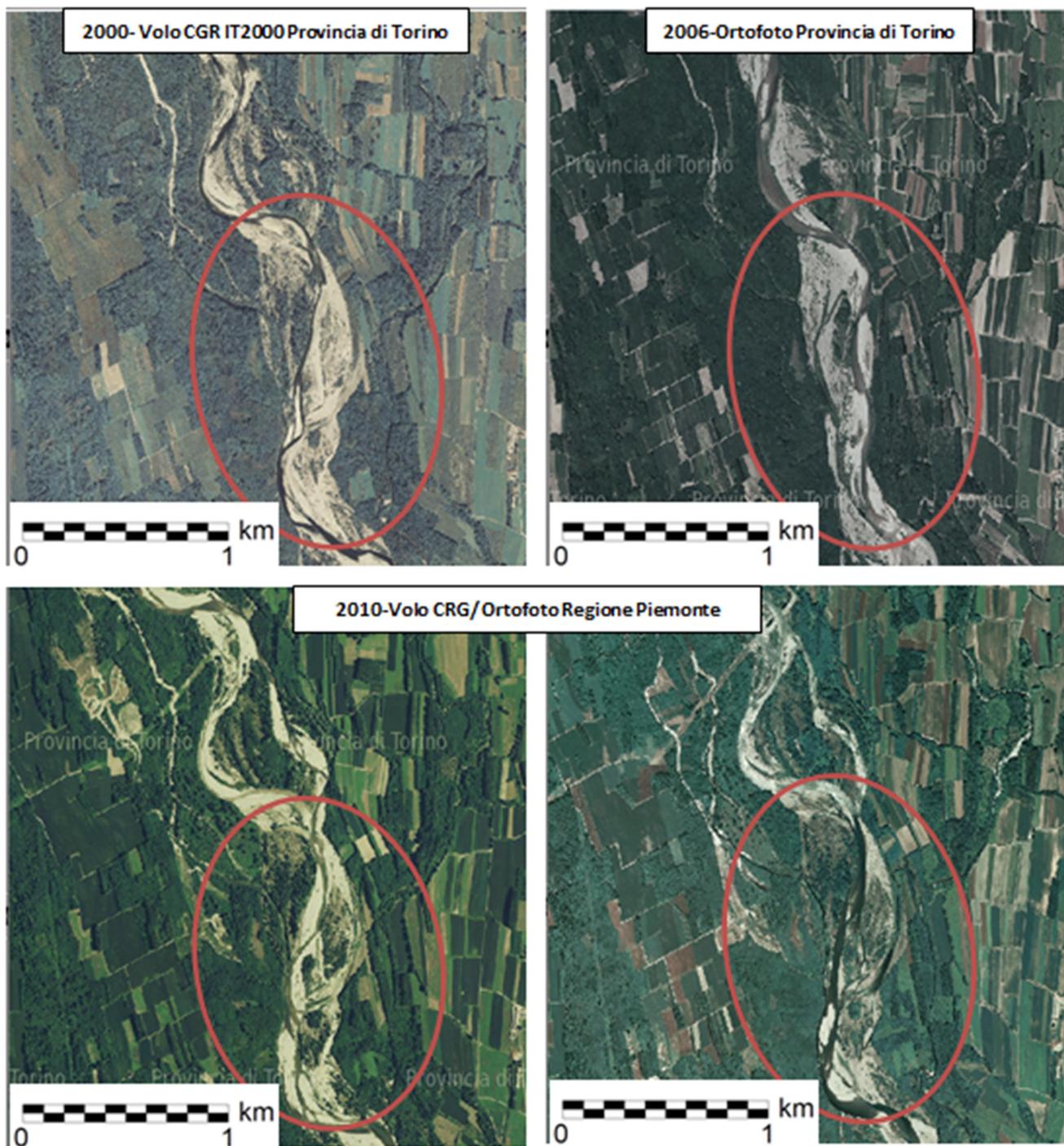


Figura 5 Analisi storica della cartografia relativa alla Zona C (CarToView, 2021)

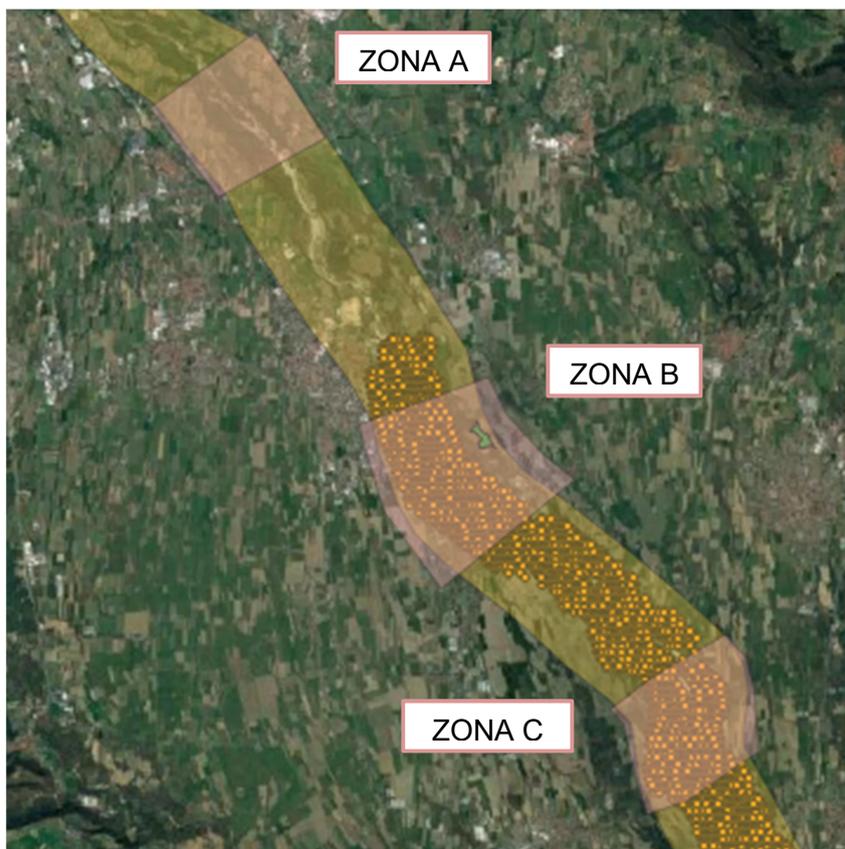


Figura 6 Confronto delle zone potenziali con i dati ottenuti dal rilievo LiDAR

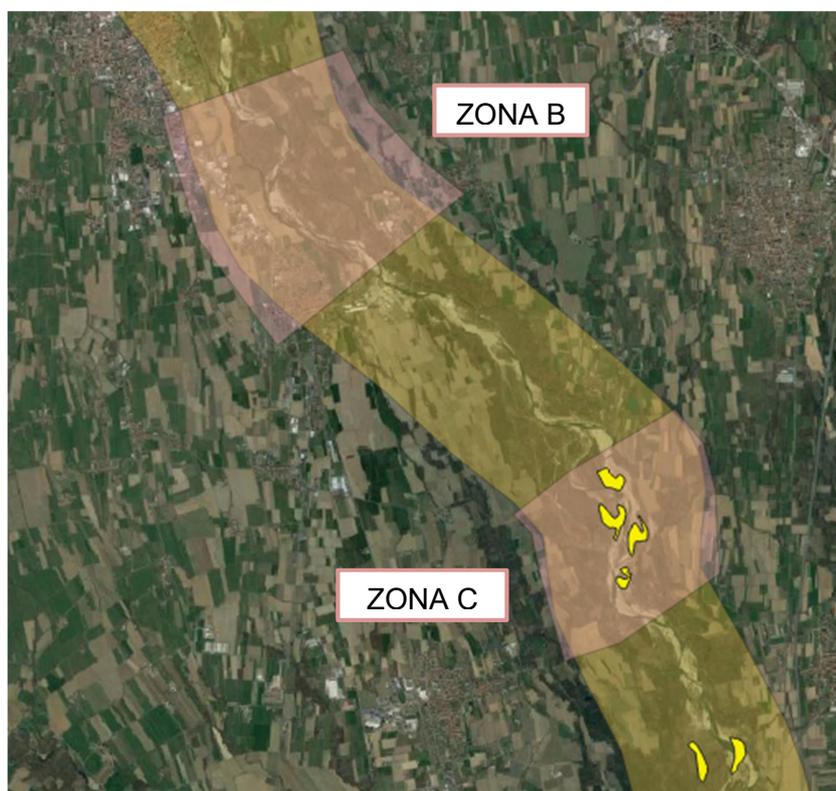


Figura 7 Confronto delle zone potenziali con l'ubicazione di saliceti e pioppeti secondo la mappa INFC

3. DATI

3.1. DATI TOPOGRAFICI

Le informazioni plano-altimetriche relative alla zona di studio sono state estrapolate da un'analisi condotta dal Politecnico di Torino nel 2020 (Politecnico di Torino DIATI, 2020), che ha portato alla creazione di un Modello Digitale del Terreno dedotto delle quote di pelo libero, valevole per un tratto di 25 km di lunghezza ed 1 km di larghezza fra Cuornè e la confluenza con il fiume Po.

Nella fattispecie, per procedere all'estrazione del DTM di cui sopra sono state impiegate differenti tecniche geomatiche di rilievo, finalizzate ad ottenere una conoscenza multiscala della zona esaminata. In primo luogo, è stato eseguito da parte del CNR-IRPI un volo con attrezzatura LiDAR lungo l'intero tratto considerato, in data 28/02/2019. La tecnica di laser scanning LiDAR (Light Detection and Ranging) consente di ricostruire le caratteristiche del sito investigato ricreando una nuvola tridimensionale di punti rappresentanti il terreno e tutto ciò che vi insiste. Tale tecnica consiste nell'acquisire un elevato numero di punti tramite proiezione da un punto di coordinate note di un fascio monocromatico di luce e misurare i tempi di ritorno degli echi del segnale. Il segnale, infatti, lambendo elementi non compatti nella sua propagazione, quali ad esempio vegetazione, intercetta parti diverse in tempi differenti e per tale motivo produce differenti echi di risposta. Valutando il tempo impiegato per ciascuno di essi a ritornare alla sorgente è possibile determinare la distanza a cui ogni elemento colpito si trova rispetto alla sorgente, determinandone così le coordinate relative, riferibili poi ad un sistema assoluto previa conoscenza di quelle della sorgente stessa. Questa caratteristica del sistema LiDAR consente in particolare di creare due ricostruzioni del terreno, il Digital Surface Model (DSM) in cui si riportano le quote di "colmo" dei punti a terra, corrispondenti al primo eco di ritorno ed il Digital Terrain Model (DTM) in cui vengono isolate le quote dei punti a terra tramite differenziazione fra primo ed ultimo eco di ritorno associati ad uno stesso punto a terra, ottenendo in questo modo una rappresentazione del suolo spuria di tutti gli elementi su di esso insistenti.

Conseguentemente, tramite elaborazione dei dati LiDAR, corroborata da una serie di rilievi fotogrammetrici effettuati con apparecchiatura UAV (Unmanned Aerial Vehicle), è stata ricavata una prima versione di DTM, non descrittiva delle zone bagnate. Questo perché, negli apparati standard di acquisizione LiDAR, i laser impiegati hanno una lunghezza d'onda che non consente la propagazione attraverso l'acqua, per cui le quote acquisite in alveo corrispondono alla superficie libera e non al fondo alveo. Per tale ragione, si è resa necessario l'impiego di metodologie alternative di rilievo delle zone sommerse, in modo da procedere alla correzione della rappresentazione del terreno (Politecnico di Torino DIATI, 2020).

Le quote di fondo alveo sono state ricavate tramite associazione di rilievi diretti, tramite tecniche GNSS e natanti dotati di apparecchi di profilatura acustica Doppler (ADP), ad un procedimento di estrapolazione di una geometria rettangolarizzata idraulicamente equivalente, visto lo sviluppo importante del tratto considerato. Quest'ultimo procedimento è stato condotto sulla base dell'implementazione della legge di Chezy, in condizioni di portata nota e sezione forzosamente rettangolare di larghezza nota. Da tali assunzioni, una volta determinato il tirante idraulico, la quota di fondo è stata ottenuta sottraendo quest'ultimo alla quota del pelo libero. Si precisa che per zone caratterizzate dalla presenza di più canali attivi, il procedimento è stato accuratamente adattato al fine di assicurare la stima delle quote di ciascun canale assicurando il rispetto dei principi idraulici.

In definitiva, in Figura 8 si riporta una vista del risultato finale.

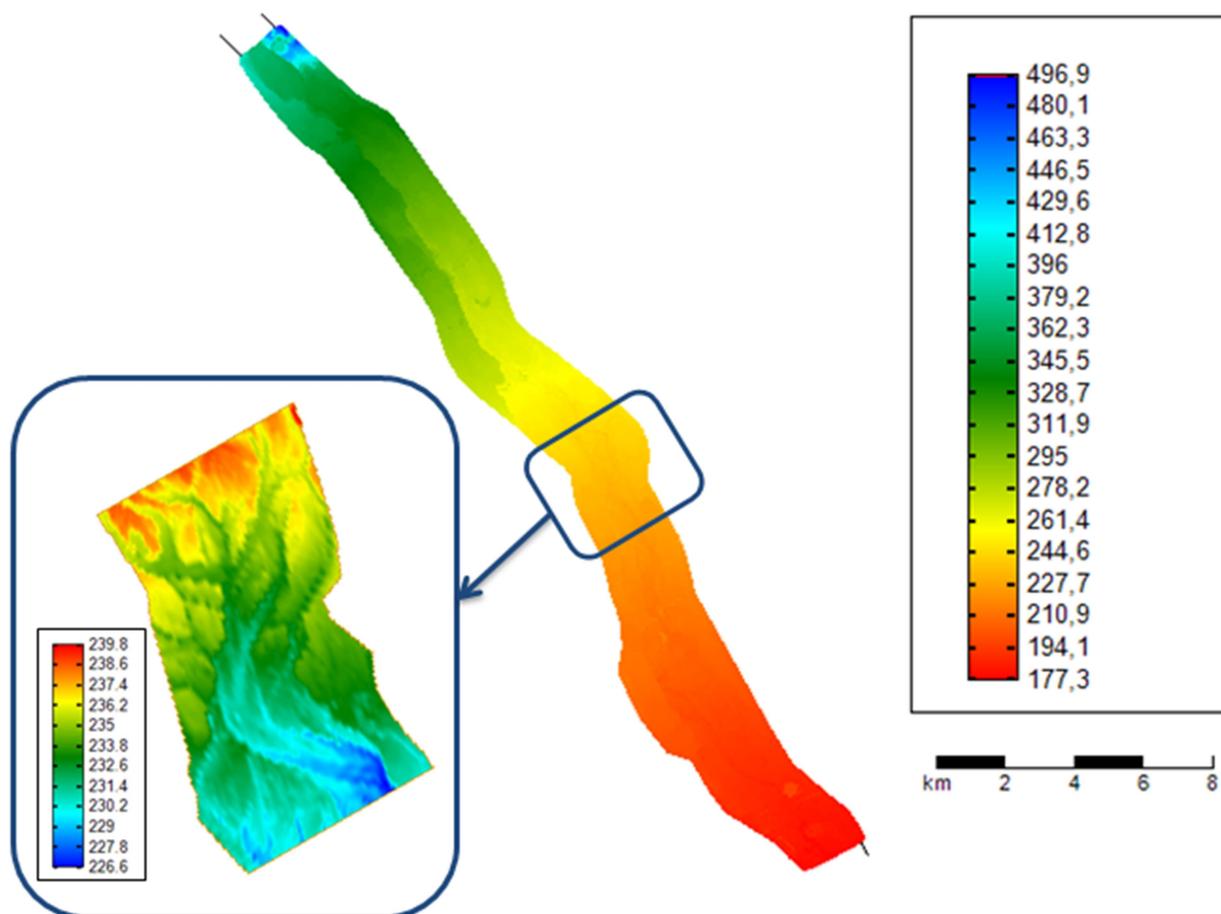


Figura 8 Modello Digitale del Terreno ottenuto dalle elaborazioni condotte dal Politecnico di Torino (2020)

3.2. DATI IDROMETRICI

In termini idrometrici, si dispone di alcune serie di dati di portata provenienti da 3 stazioni idrometriche ARPA (Anagrafica stazioni ARPA, 2021):

- Stazione di Castellamonte frazione Spineto (TO), per la quale sono disponibili 10 anni di osservazioni;
- Stazione di Cuornè (TO) con 4 anni di registrazioni;
- Stazione di San Benigno Canavese (TO), con disponibilità di 19 anni di dati.

I dati grezzi ottenuti dal database idrologico ARPA (Banca dati idrologica ARPA, 2022), sono stati preliminarmente elaborati al fine di consentire la corretta ripartizione degli anni tramite l'eliminazione delle posizioni all'interno dei file corrispondenti ai giorni 29/02 degli anni bisestili. In tal modo, effettuando una ripartizione dei dati a gruppi di 365 elementi è stato possibile ottenere per ogni anno i valori compresi fra il giorno 01/01 e il giorno 31/12. In corrispondenza dei giorni in cui non risultano disponibili dati, sono stati inseriti dei valori non numerici, in modo da mantenere la struttura annua senza però falsare le successive analisi, come avverrebbe sostituendo valori nulli.

3.3. DATI GRANULOMETRICI

Le informazioni granulometriche della zona esaminata sono state ricavate a partire da una serie di campionamenti in sito effettuati dal Politecnico di Torino (Politecnico di Torino DIATI, 2020). In particolare, sono stati prelevati una serie di elementi lapidei secondo il metodo di campionamento Wolman, basato sulla raccolta lungo entrambe le sponde dei canali attivi seguendo un percorso a zig-zag. Dai campioni raccolti è stata effettuata un'analisi granulometrica che ha condotto all'estrazione delle curve granulometriche rappresentate in Figura 9.

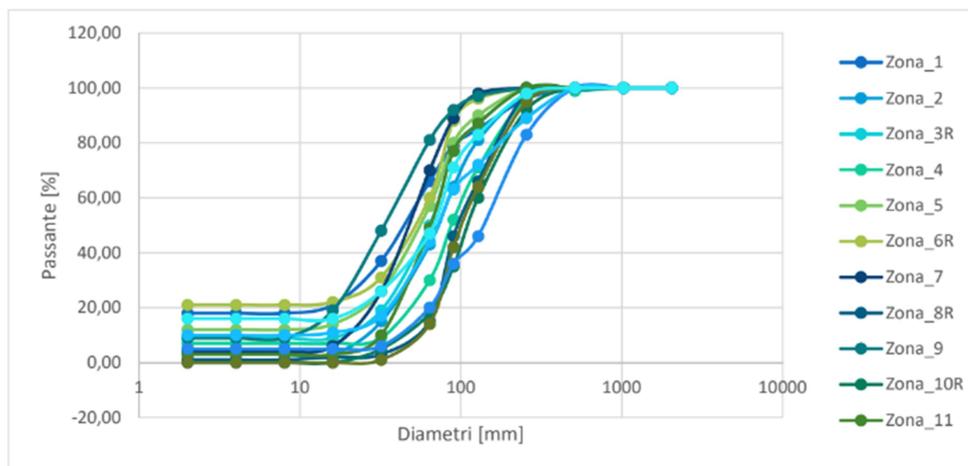
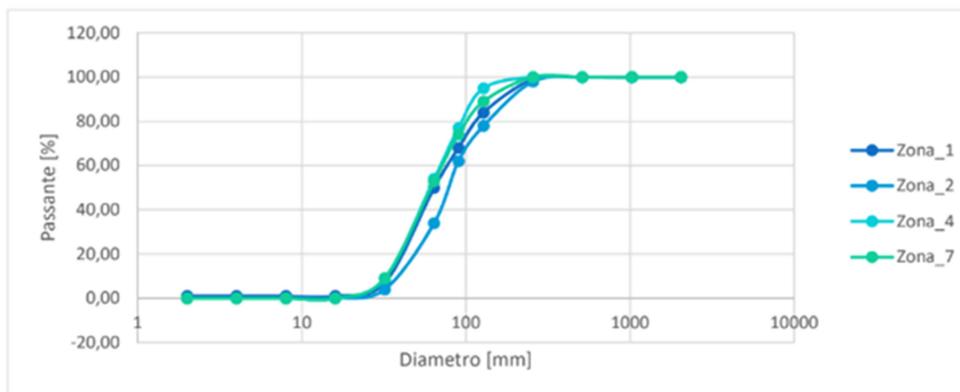
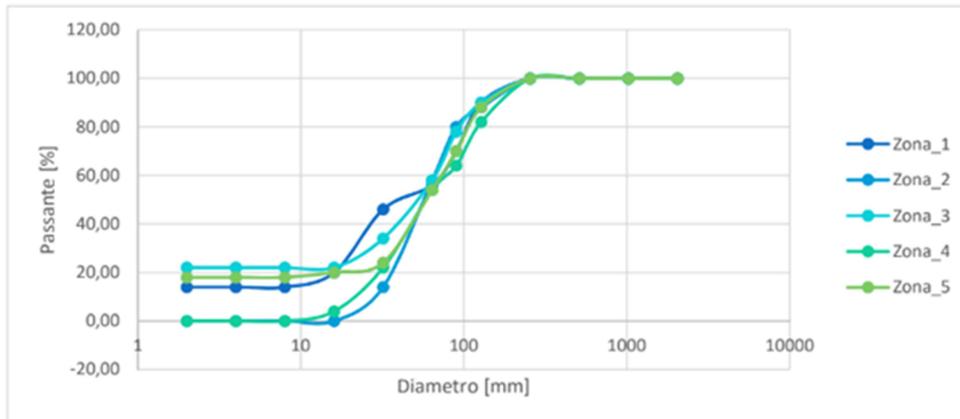


Figura 9 Curve granulometriche dedotte dai campionamenti effettuati (Politecnico di Torino DIATI, 2020)

Il diametro mediano del sedimento è risultato pari a 77.74 mm

3.4. DATI DI VEGETAZIONE

Le informazioni relative alle caratteristiche di vegetazione sono state reperite a partire dai risultati di due rilievi LiDAR eseguiti dal CNR-IRPI in data 28/02/2019 e 23/03/2021 e da una serie di misurazioni in campo effettuate dal gruppo di ricerca del Prof. Camporeale del Politecnico di Torino.

In particolare, si dispone di una mappa per ciascuna specie, di diametri e altezze dei singoli esemplari identificati in sede di acquisizione e processing dei dati LiDAR. Come infatti illustrato da Latella et al. (2021), la procedura di telerilevamento ha prodotto una serie di dati grezzi di quota dei punti intercettati dalla radiazione laser. Tramite operazioni di data processing, da essi sono stati individuati gli esemplari di vegetazione e per ciascuno di essi è stata ricavata l'altezza all'atto della ripresa, come differenza fra i differenti echi di ritorno del segnale proiettato in corrispondenza della loro ubicazione. Si sottolinea che tale operazione è stata svolta per ciascun esemplare indistintamente dalle specie di appartenenza e che solo in un secondo momento i dati sono stati catalogati in base ad esse.

Propedeuticamente alla successiva fase di calibrazione dei parametri impiegati nella simulazione dei processi di crescita, le mappe relative ai due istanti di ripresa sono state congiunte e trattate al fine di isolare gli esemplari già presenti nell'anno 2019 e ancora in vita nel 2021. Nella fattispecie, per fare ciò, è stato impiegato un algoritmo MATLAB, strutturato in modo da procedere per ciascun esemplare individuato nel 2019, alla ricerca fra i dati del 2021 di quello a minima distanza possibile, data la presenza, seppur lieve, di uno scostamento fra le relative coordinate nei due anni, che abbia subito un accrescimento fra le due osservazioni. In Figura 10 si riporta un inquadramento su immagini satellitari dei dati estrapolati, comprensivi di tutte le specie compresenti.

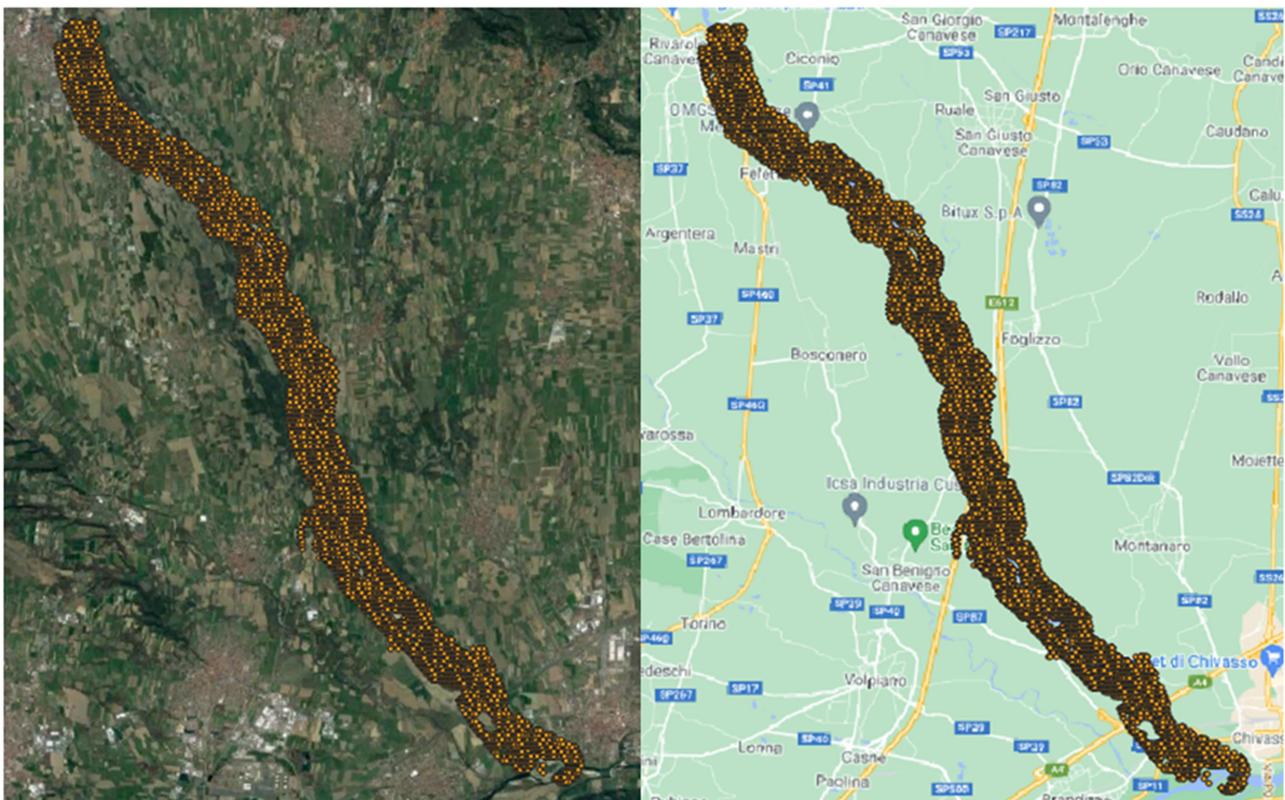


Figura 10 Inquadramento su immagini satellitari degli esemplari di vegetazione identificati

La ripartizione in specie è stata condotta tramite sovrapposizione di tali dati con la carta forestale redatta dal Sistema Informativo Forestale Regionale (SIFOR) della Regione Piemonte nella versione del 2006 (SIFOR, 2021) in accordo con le distinzioni effettuate dall'INFC (INFC, 2003), visibile in Figura 11, ove essa è posta anche a confronto con i dati disponibili.

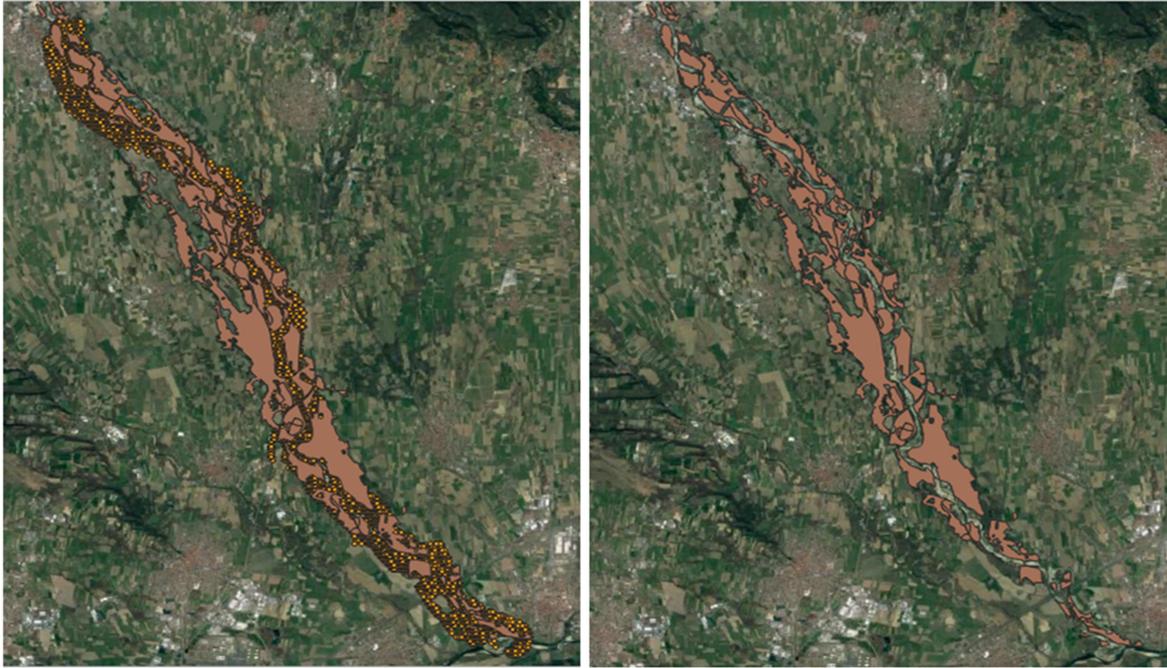


Figura 11 Inquadramento della carta forestale (SIFOR, 2021) su foto satellitare con confronto con i dati disponibili

In Figura 12 sono distinte le principali specie distinte dalla carta forestale per il tratto di Torrente Orco considerato.

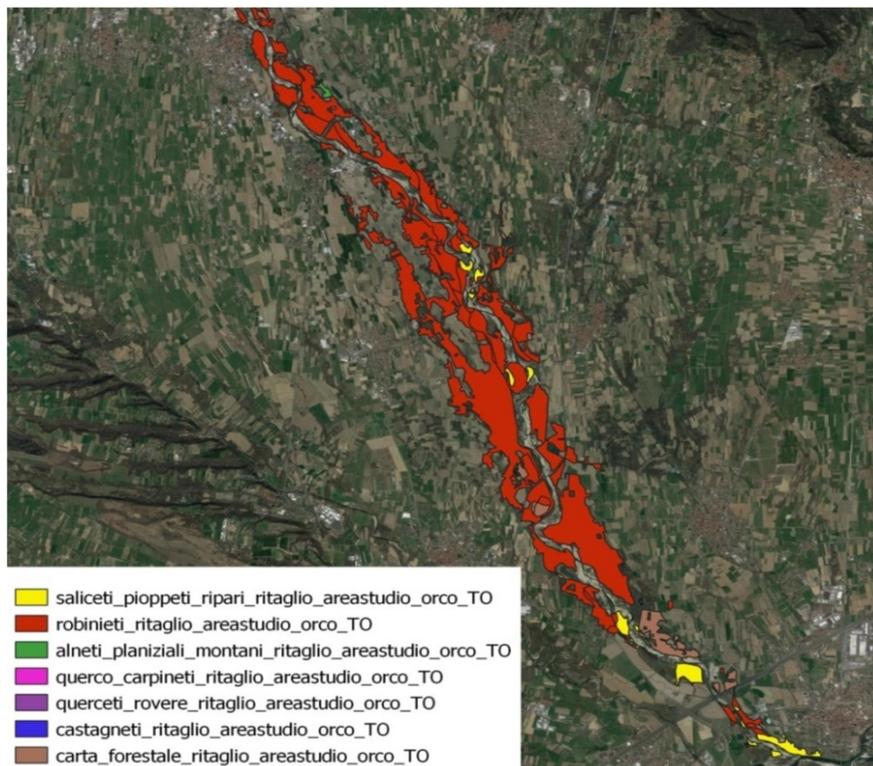


Figura 12 Carta forestale (SIFOR, 2021) del tratto rilevato con LiDAR

Come visibile, lungo il tratto oggetto di rilevamento LIDAR, sono state identificate 7 principali specie, secondo i criteri INFC (INFC, 2003), ossia:

- Robinie;
- Salici
- Pioppi
- Castagni
- Alneti planiziali di ontano nero;
- Roveri;
- Quercocarpineti.

Tramite strumenti GIS è stato dunque possibile isolare, per le specie di interesse ossia salici e pioppi, gli esemplari appartenenti ad esse.

I valori di diametro sono stati ricavati a partire dalle sopracitate altezze tramite l'impiego di una relazione allometrica diametro-altezza specificamente calibrata per il presente caso studio. In particolare, si assume che tale relazione sia descrivibile dalla 3.1.

$$H = A * D^B \quad 3.1$$

I coefficienti A e B sono stati tarati per il torrente Orco sulla base di una campagna di rilievo campionario di altezze e diametri svolta in data 21/02/2020 lungo i margini del corso d'acqua. Inoltre, sfruttando l'analogia idrologica climatica ed ecologica con il corso d'acqua spagnolo Rio Cinca tali dati sono stati integrati con quelli raccolti per il suddetto corpo idrico, nel contesto del lavoro condotto da Latella (2018) al fine di costituire un supporto alla calibrazione della legge allometrica maggiormente ridondante.

In Tabella 1 e Figura 13 sono riportati i risultati di tale operazioni estratti dalla tesi di Redoglia (2021) per le principali specie arboree identificate.

Si precisa che i valori di densità di biomassa in condizioni di legno verde riportati in Tabella 1, sinteticamente designata come gwd, sono stati adottati in coerenza con quanto riportato in letteratura (Miles & Smith, 2009). Inoltre si sottolinea come i coefficienti allometrici A e B siano stati calibrati per ricavare i diametri in centimetri.

Tabella 1 Coefficienti allometrici e Green Wood Density ricavati dalla calibrazione

SPECIE	A	B	gwd [Mg/m³]
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

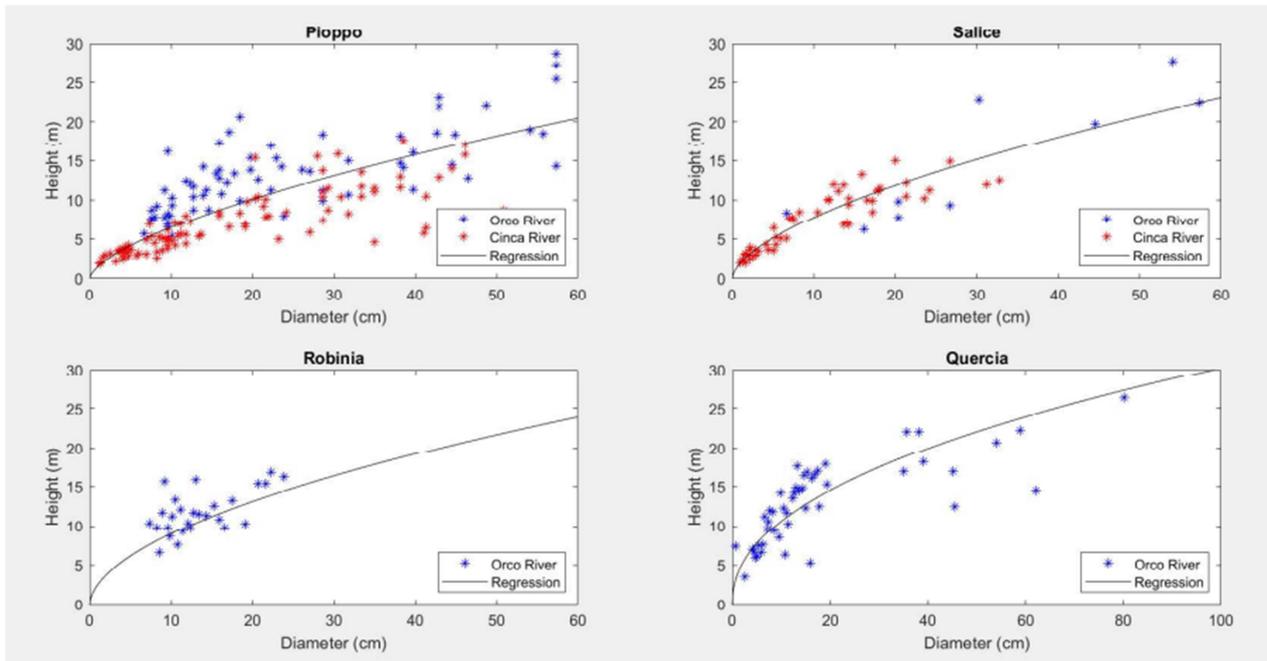


Figura 13 Risultati della calibrazione dei coefficienti allometrici (Redoglia, 2021)

Data la similitudine dei valori per le specie salice e pioppo, oggetto del presente lavoro, evidenziata anche dall'accorpamento di esse in sede di distinzione cartografica, si è optato per l'adozione per entrambe di una coppia di coefficienti mediati pari a:

$$A = 1.6950$$

$$B = 0.6252$$

In questo modo, in definitiva, si dispone di una mappa, relativa all'intero tratto rilevato nei voli CNR-IRPI, contenente, per ciascun pioppo e salice individuato e superato della fase di pulizia di cui al paragrafo precedente, le coordinate planimetriche, i diametri e le altezze ai due istanti di ripresa. Tali dati sono stati presi a riferimento nella procedura di taratura del coefficiente della legge di crescita dei diametri, analizzata nel dettaglio nei successivi capitoli.

Risulta dunque evidente che non siano disponibili informazioni relative a lunghezza radicale, età iniziale e stadio vitale iniziale degli esemplari, pertanto si prevede la necessità di istituire una porzione di algoritmo deputata alla determinazione di tali dati, i cui dettagli si rimandano ai paragrafi successivi. Si precisa inoltre che preliminarmente a tali calcoli è stata effettuata una fase di interpolazione dei dati, provenienti dalla mappa, sulla griglia di calcolo adottata per la zona in esame. Questo perché il software impiegato per la modellazione richiede la somministrazione dei dati relativi alle scabrezze additive, nel caso presente indotte dalla vegetazione, in corrispondenza di particolari nodi della griglia di calcolo, da cui si rende necessaria la sopracitata operazione di interpolazione. Nella fattispecie, ciò è stato eseguito implementando un codice in grado di:

- Identificare e conteggiare per ciascuna cella gli esemplari di ciascuna specie ricadenti entro i relativi limiti;
- Valutare per ciascuna cella, per ciascuna specie presente dei valori caratteristici di diametro e altezza ricavati dalla media di quelli degli esemplari considerati;
- Definire la densità di copertura come rapporto fra il numero di esemplari contati e la superficie della cella e ricavare da essa la frazione di copertura vegetale della cella;

Si precisa che a rigore non è fornita una distinzione specifica degli esemplari appartenenti alle due specie di interesse, accorpate in una singola voce nella carta forestale (SIFOR, 2021), pertanto è stata eseguita una distinzione manuale forzando quelli appartenenti ad una fascia di circa 20 m nell'intorno del canale attivo ad essere salici ed i rimanenti pioppi. Inoltre, essendo interessati esclusivamente a queste due specie di vegetazione, dal punto di vista teorico si renderebbe necessaria la rimozione dei dati associati alle altre. Tuttavia, tale operazione si ritiene possa introdurre più incertezze ed imprecisioni di quante se ne avrebbe considerando tutti gli esemplari della zona appartenenti alle due specie considerate. Questo perché la carta forestale in base alla quale avviene la distinzione (SIFOR, 2021) potrebbe risultare ragionevolmente obsoleta, risalendo al 2006, e per tale motivo potrebbe non essere descrittiva di nuovi esemplari stanziatisi nel frattempo. Conseguentemente risulta maggiormente cautelativo ipotizzare che tutti gli esemplari della zona siano salici e pioppi, anche in virtù del fatto che costituiscono le specie a maggiore diffusione nella zona studio. In Figura 14 si riporta la restituzione grafica di quanto ottenuto in accostamento alla ripresa satellitare risalente al 2019 (Google Earth, 2021).

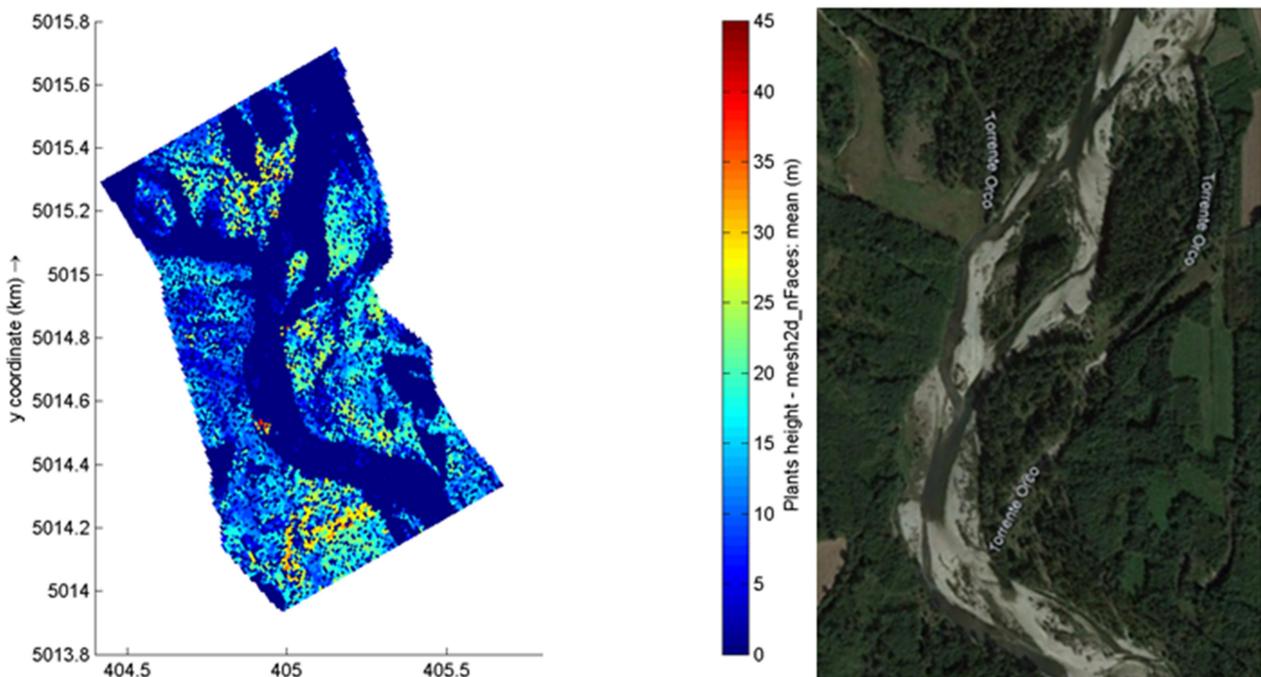


Figura 14 Risultato dell'interpolazione dei dati di vegetazione del 2019 sulla griglia di calcolo in accostamento alla ripresa satellitare (Google Earth, 2021)

4. ANALISI IDRO-MORFOLOGICA

Una volta definita l'area studio per il presente lavoro, si è proceduto all'esecuzione di una serie di analisi preliminari dei dati idrologici e di trasporto solido, volte a fornire un quadro del contesto idrologico e morfologico in cui il tratto è inserito.

In particolare si anticipa che l'elaborazione delle informazioni idrologiche è stata finalizzata alla deduzione per l'area di interesse di una relazione di deflusso ed una curva di durata delle portate.

I dati di trasporto solido, ricavati da un set di simulazioni effettuate in regime di portata costante, sono stati elaborati al fine di valutare un valore di portata ascrivibile a soglia, per il quale si osserva il superamento delle tensioni di mobilizzazione del sedimento e conseguentemente l'attivazione dei fenomeni di trasporto solido. Tale elaborazione è stata introdotta in un'ottica di alleggerimento del processo di simulazione dinamica della vegetazione, in quanto si assume che per condizioni di assenza di trasporto solido sia possibile risparmiare tempo computazionale bypassando l'esecuzione della vera e propria simulazione, propagando meramente i risultati del passo precedente.

4.1. ANALISI STORICA DELLE PORTATE

In primo luogo è stata effettuata un'analisi di tipo storico sui dati ARPA (Banca dati idrologica ARPA, 2022), consistente nella rappresentazione dei valori di portata giornaliera registrati presso ogni stazione idrometrica. Successivamente, è stato ricavato un andamento dei valori medi giornalieri di portata, ottenuti dall'esecuzione della suddetta operazione sui valori registrati nei differenti anni, per ogni giorno della serie. Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le stazioni di Cuornè, in Figura 15 e Figura 16, Castellamonte-Spineto, in Figura 17 e Figura 18, e San Benigno Canavese in Figura 19 e Figura 20.

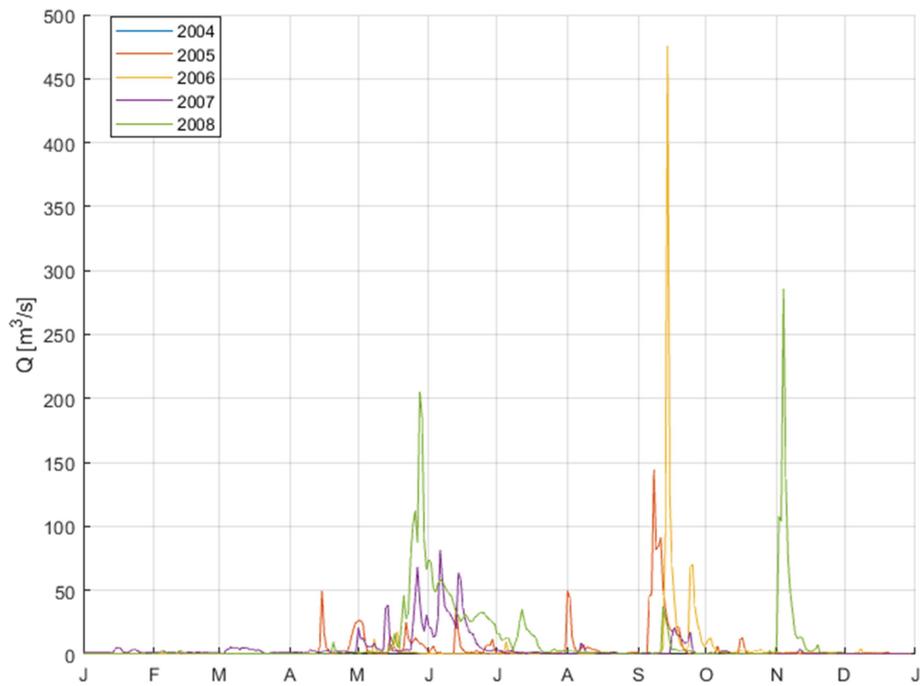


Figura 15 Serie giornaliere delle portate del torrente Orco presso la stazione ARPA di Cuornè

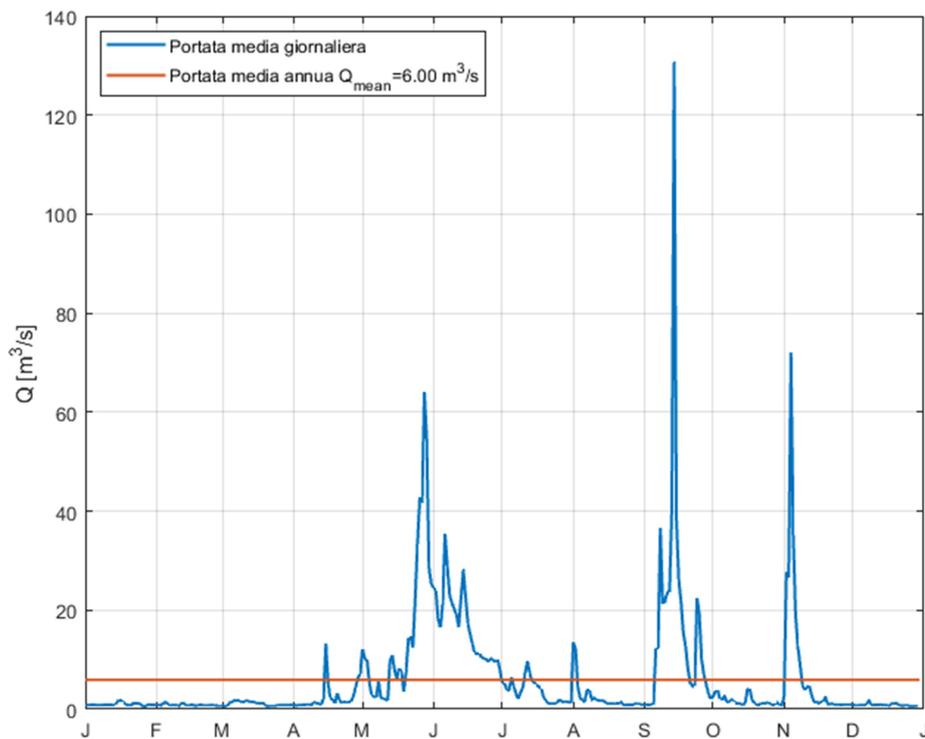


Figura 16 Portate giornaliere mediate per il periodo 2004-2008 presso la stazione ARPA di Cuornè

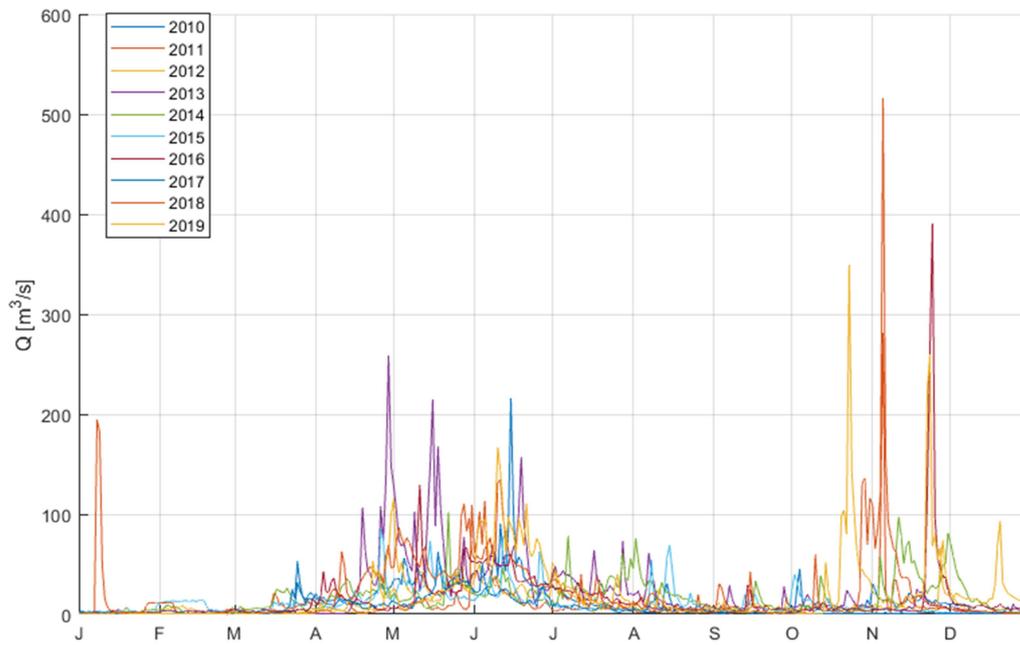


Figura 17 Serie giornaliere delle portate del torrente Orco presso la stazione ARPA di Castellamonte-Spineto

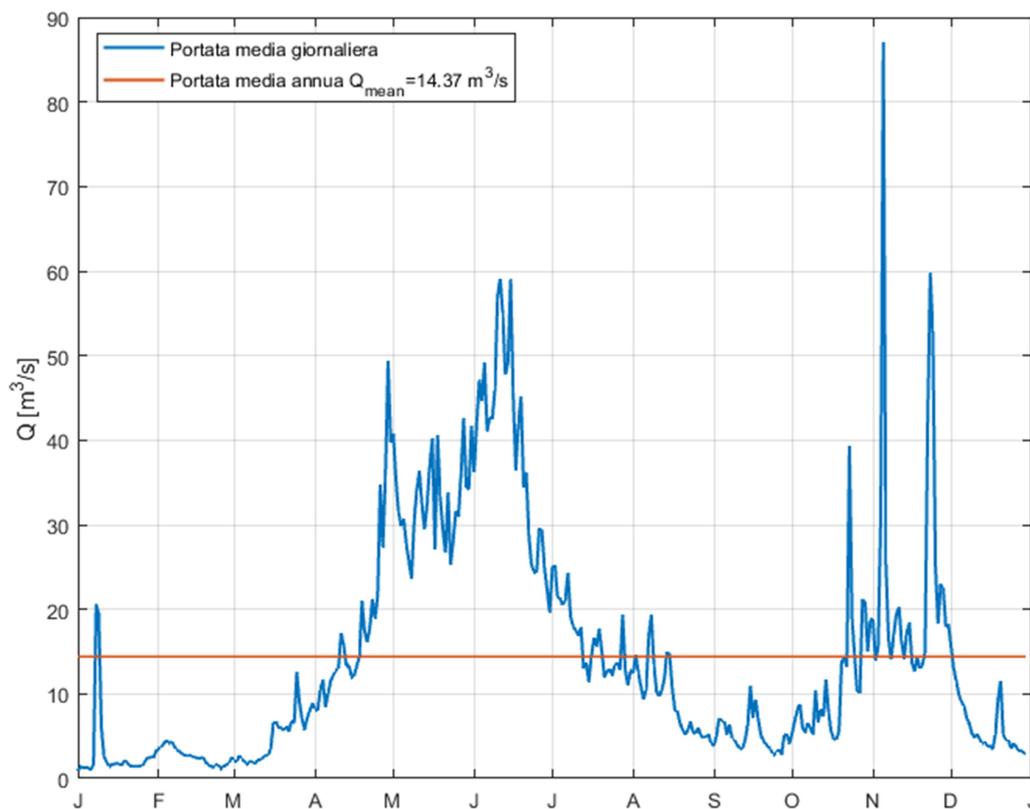


Figura 18 Portate giornaliere mediate per il periodo 2010-2019 presso la stazione ARPA di Castellamonte Spineto

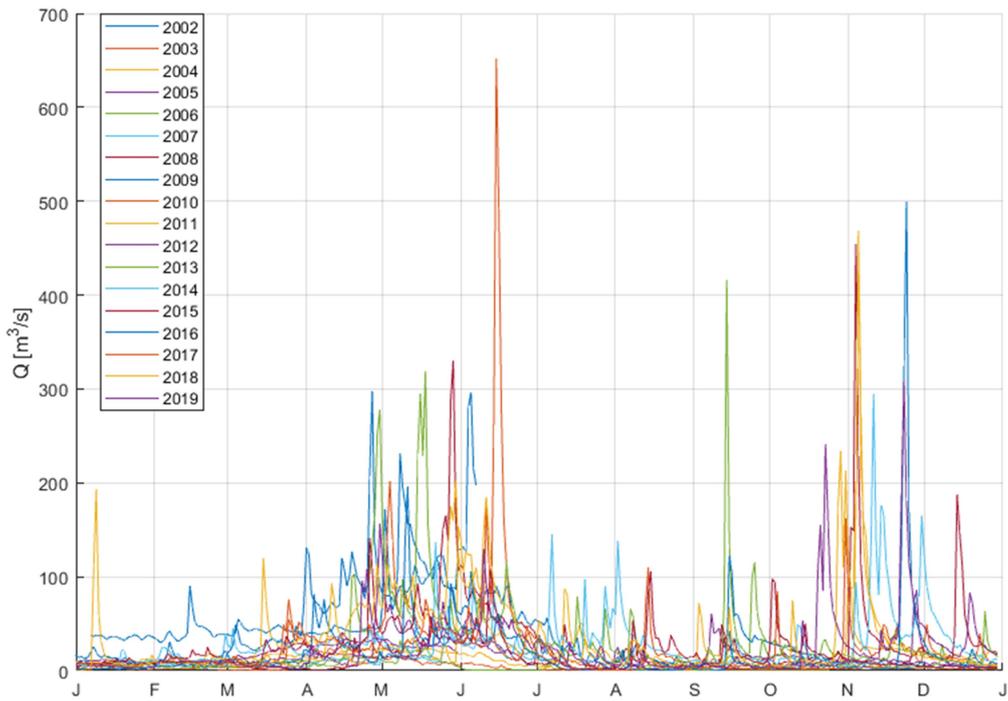


Figura 19 Serie giornaliere delle portate del torrente Orco presso la stazione ARPA di San Benigno Canavese

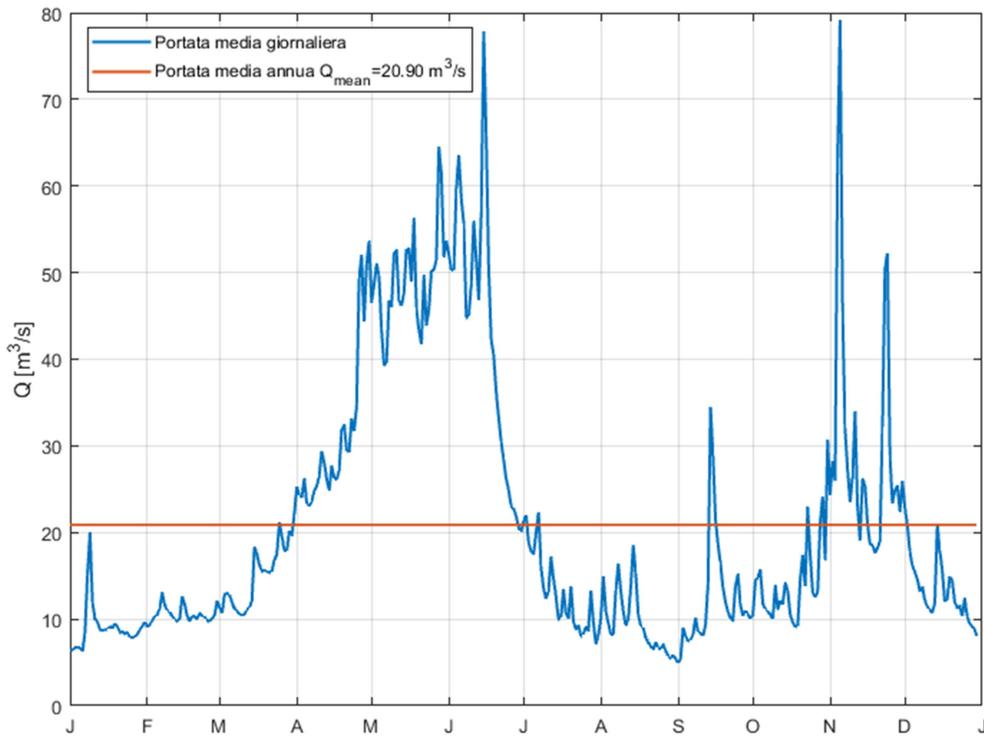


Figura 20 Portate giornaliere mediate per il periodo 2002-2019 presso la stazione ARPA di San Benigno Canavese

Da un'analisi di Figura 16, Figura 18 e Figura 20 è possibile dedurre un carattere misto, tendente ad alpino del corso d'acqua, in quanto si riscontra la concomitante presenza di due picchi di portata in corrispondenza dei mesi di Maggio-Giugno e Novembre, tipici di un carattere appenninico, e di valori medi annui di portata in linea con una tipologia alpina. La struttura bipiccata dell'idrogramma, infatti, è rappresentativa di corpi idrici alimentati prevalentemente da eventi di precipitazione, maggiormente distribuiti nelle stagioni primaverili ed autunnali, a fronte di alimentazione da parte di apporti da fusione nivale. Tuttavia, come già anticipato, i valori medi annui di portata sono nettamente superiori a quelli associati a corsi d'acqua con carattere puramente appenninico. Conseguentemente il torrente Orco può essere designato come corpo idrico di tipologia mista..

In accordo con la disposizione geografica delle stazioni è possibile notare in Tabella 2 come i valori di portata media annua crescano passando dalla stazione di Cuornè, situata più a monte a quella di San Benigno Canavese, coerentemente con l'incremento della superficie di bacino idrografico drenata.

Tabella 2 Anni di osservazioni disponibili portate medie per le tre stazioni ARPA

Stazione	Numero di anni di osservazioni disponibili	Portata media annua Q_{mean} [m ³ /s]
Cuornè	4	6.00
Castellamonte-Spineto	10	14.37
San Benigno	19	20.90

4.2. ESTRAZIONE DELLE CURVE DI DURATA DELLE PORTATE

Utilizzando i medesimi dati idrometrici, sono state dedotte le curve di durata delle portate in primis per ogni anno di osservazione e successivamente per i valori giornalieri mediati, in analogia a quanto fatto in precedenza.

Tale rappresentazione consiste nell'ordinare le portate giornaliera in base al numero di giorni, anche non consecutivi, in cui è stato possibile registrare un valore inferiore o al limite pari a quello considerato. In particolare, secondo tale approccio la portata massima risulterebbe associata ad un singolo giorno mentre la portata minima teoricamente a 365 giorni. A livello pratico, infatti, se la serie annua presenta lacune di dati, la portata minima avrebbe una durata inferiore, pari al numero di giorni per i quali sono effettivamente disponibili dati.

In particolare, nel caso presente, tali lacune sono state riscontrate, come già introdotto nel Paragrafo 3.2, e sono state compensate dall'introduzione di valori non numerici atti a preservare la struttura annua senza alterare i risultati quali ad esempio il valore di portata media annua. Tale correzione ha portato tuttavia, ad un'alterazione dell'andamento delle curve annue di durata, consistente in una traslazione verso destra, ma si precisa altresì che ai fini pratici tali andamenti risultano di secondaria importanza, in quanto si assumono a riferimento i valori giornalieri mediati, insensibili a tale criticità.

In Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26 si riportano i risultati ottenuti per le tre stazioni idrometriche.

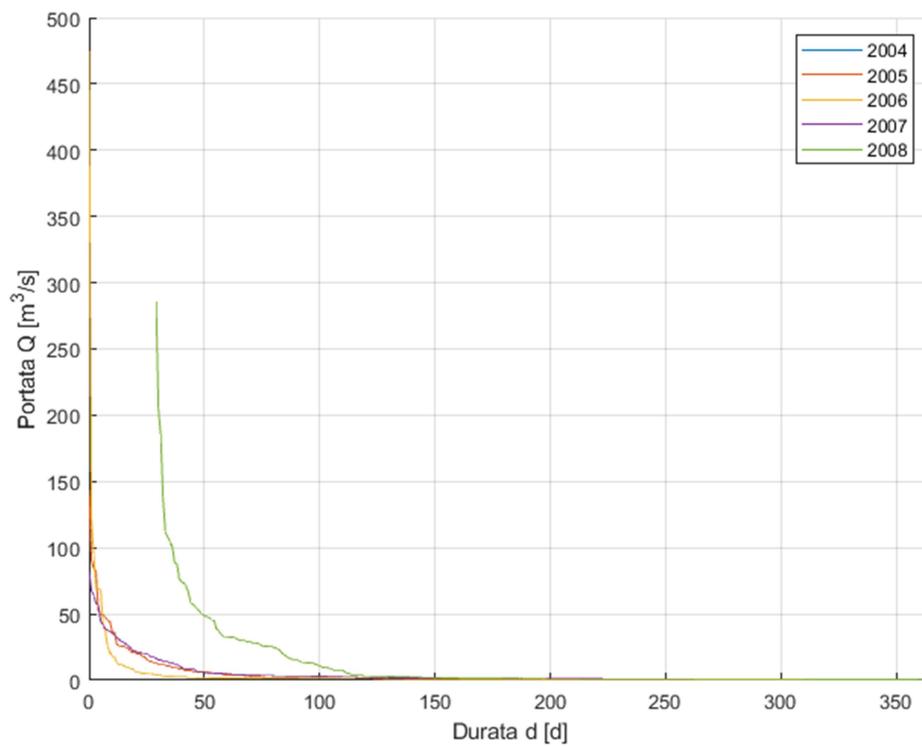


Figura 21 Curve di durate delle portate giornaliere del torrente Orco presso la stazione di Cuornè

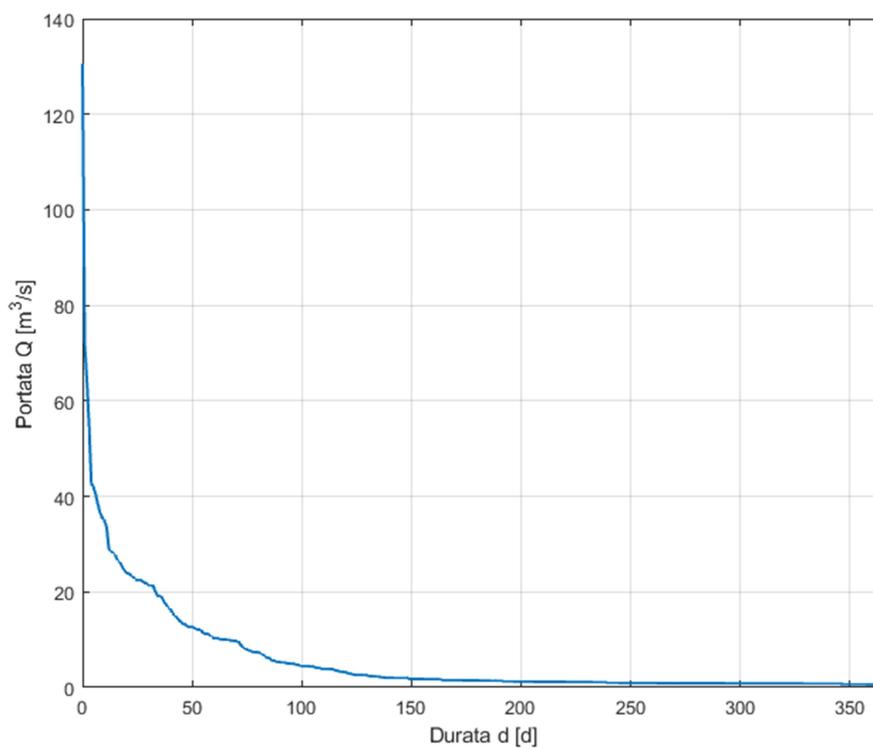


Figura 22 Curva di durata delle portate giornaliere mediate del torrente Orco presso la stazione di Cuornè periodo 2004-2008

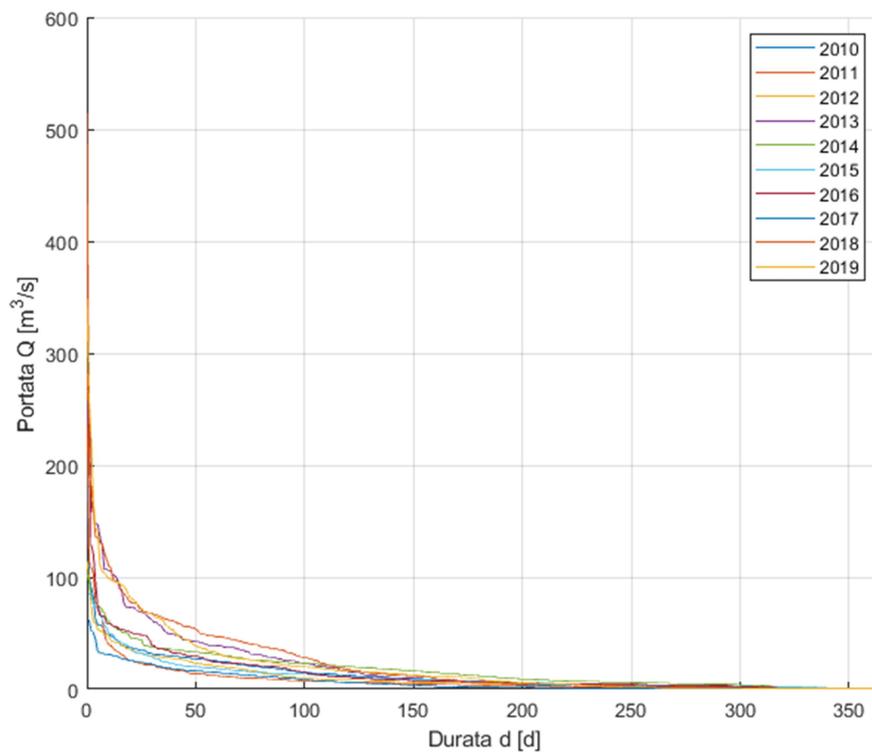


Figura 23 Curve di durata delle portate giornaliere del torrente Orco presso la stazione di Castellamonte Spineto

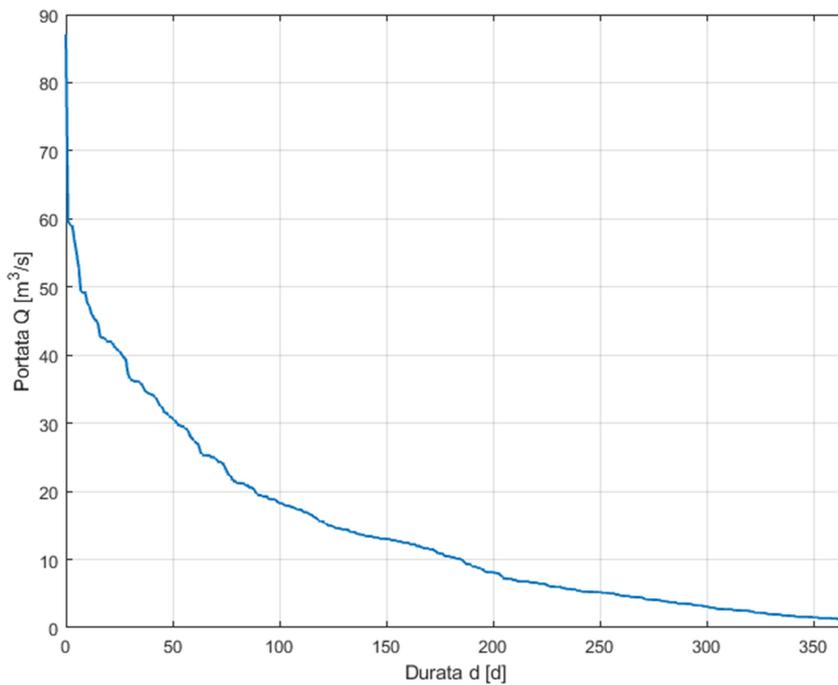


Figura 24 Curva di durata delle portate giornaliere mediate del torrente Orco presso la stazione di Castellamonte Spineto periodo 2010-2019

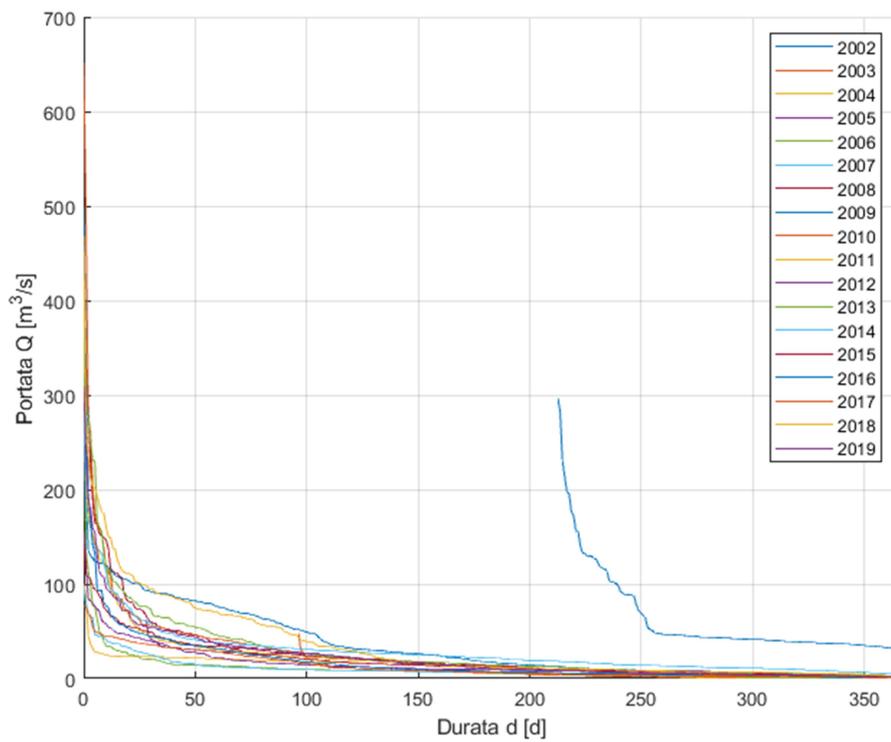


Figura 25 Curve di durata delle portate giornaliere del torrente Orco presso la stazione di San Benigno Canavese

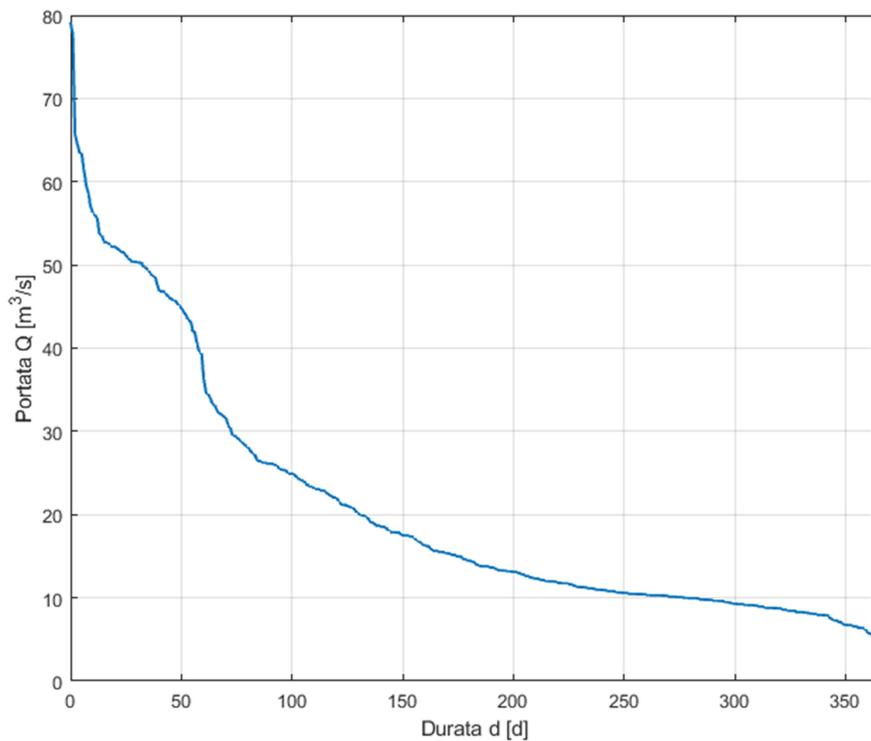


Figura 26 Curva di durata delle portate giornaliere mediate del torrente Orco presso la stazione di San Benigno Canavese periodo 2002-2019

4.3. TARATURA DELLA SCALA DI DEFLUSSO

In aggiunta alle curve di durata delle portate è stata effettuata la taratura della scala di deflusso descrittiva del tratto compreso fra Cuornè e San Benigno. In particolare, si identifica come scala di deflusso una relazione fra portata e tirante con struttura come da 4.1.

$$Q = kY^m \quad 4.1$$

Ove Q è la portata, Y il tirante, k ed m sono rispettivamente il coefficiente e l'esponente da tarare sulla base dei dati di portata e altezza idrometrica. Nella fattispecie, a partire da essi, in primo luogo si è proceduto alla definizione per ogni stazione, dei tiranti associati a ciascuna portata giornaliera. Questi ultimi sono stati determinati sottraendo alle letture idrometriche il valore di zero idrometrico, corrispondente al tirante associato al fondo scala dell'asta graduata.

Tale informazione, tuttavia non è risultata reperibile per alcuna delle tre stazioni (Anagrafica stazioni ARPA, 2021), e per tale motivo è stato adottato un approccio alternativo, basato sulla *ragionevole* stima del tirante associato a condizioni di portata nulla, sulla base della lettura relativa alla portata minima. Il termine *ragionevole* è indicativo del fatto che le conclusioni sono basate su di un'interpretazione non analitica e rigorosa dei dati ma è altresì inteso a sottolineare che quanto dedotto risulta a favore di sicurezza e quanto più verosimile possibile. Nel paragrafo successivo si illustrano i passaggi effettuati e le ipotesi fatte.

In primo luogo in Tabella 3, si riportano i minimi di portata e le relative letture idrometriche per ognuna delle tre stazioni.

Tabella 3 Altezze idrometriche associate ai minimi valori di portata per le tre stazioni ARPA

Stazione	Portata minima Q_{\min} [m ³ /s]	Altezza idrometrica per portata minima $H(Q_{\min})$ [m]
Cuornè	0.13	0.07
Castellamonte-Spineto	0.02	-1.89
San Benigno	0.01	0.36

Per quanto attiene alla stazione di Cuornè, dato il valore di portata elevato corrispondente a 130 l/s e data la relazione fra incrementi di altezze idrometriche e portate per valori bassi di queste ultime si è ipotizzato che il tirante nullo corrispondesse ad una lettura di 0.00 m.

Nel caso della stazione di Castellamonte frazione Spineto visto il valore di portata molto prossimo allo zero si è assunto che il tirante nullo fosse a -1.90 m, in modo tale da tener conto del seppur lieve scostamento del minimo di portata dall'annullamento e per evitare l'insorgenza di problemi nella successiva rappresentazione logaritmica dei tiranti, considerando che se si fosse preso a riferimento il valore di -1.89 m si sarebbe ottenuto un tirante nullo in condizioni di portata minima.

Infine, per la stazione di San Benigno Canavese, si è seguito un ragionamento del tutto analogo al caso di Spineto, minorando di 0.01 m il minimo livello registrato, fissando quindi il valore a 0.35 m.

Di seguito, in Tabella 4 si riportano per chiarezza i risultati dell'elaborazione di cui al paragrafo precedente.

Tabella 4 Altezze idrometriche associate a portata minima e tirante nullo per le tre stazioni ARPA

Stazione	Portata minima Q_{\min} [m ³ /s]	Altezza idrometrica per portata minima $H(Q_{\min})$ [m]	Altezza idrometrica per tirante nullo $H(Y=0)$ [m]
Cuornè	0.13	0.07	0
Castellamonte-Spineto	0.02	-1.89	-1.9
San Benigno	0.01	0.36	0.35

A partire quindi da quanto appena determinato, i tiranti sono stati calcolati sottraendo alle altezze idrometriche il valore corrispondente a tirante nullo. Una volta ottenuti, i valori relativi a ciascuna stazione sono stati rappresentati in scala bilogarithmica in quanto tramite una successiva interpolazione di tipo lineare è possibile giungere alla stima del coefficiente k e dell'esponente m della scala di deflusso, secondo le correlazioni 4.2, 4.3 e 4.4

$$\log Q = \log k + m \log Y \quad 4.2$$

$$y = cx + q \quad 4.3$$

$$c = m \quad q = \log k \rightarrow k = 10^q \quad 4.4$$

In Figura 27, Figura 28 e Figura 29 si riportano gli andamenti dei dati relativi alle stazioni rispettivamente di Cuornè, Castellamonte-Spineto e San Benigno Canavese con i risultati delle regressioni lineari.

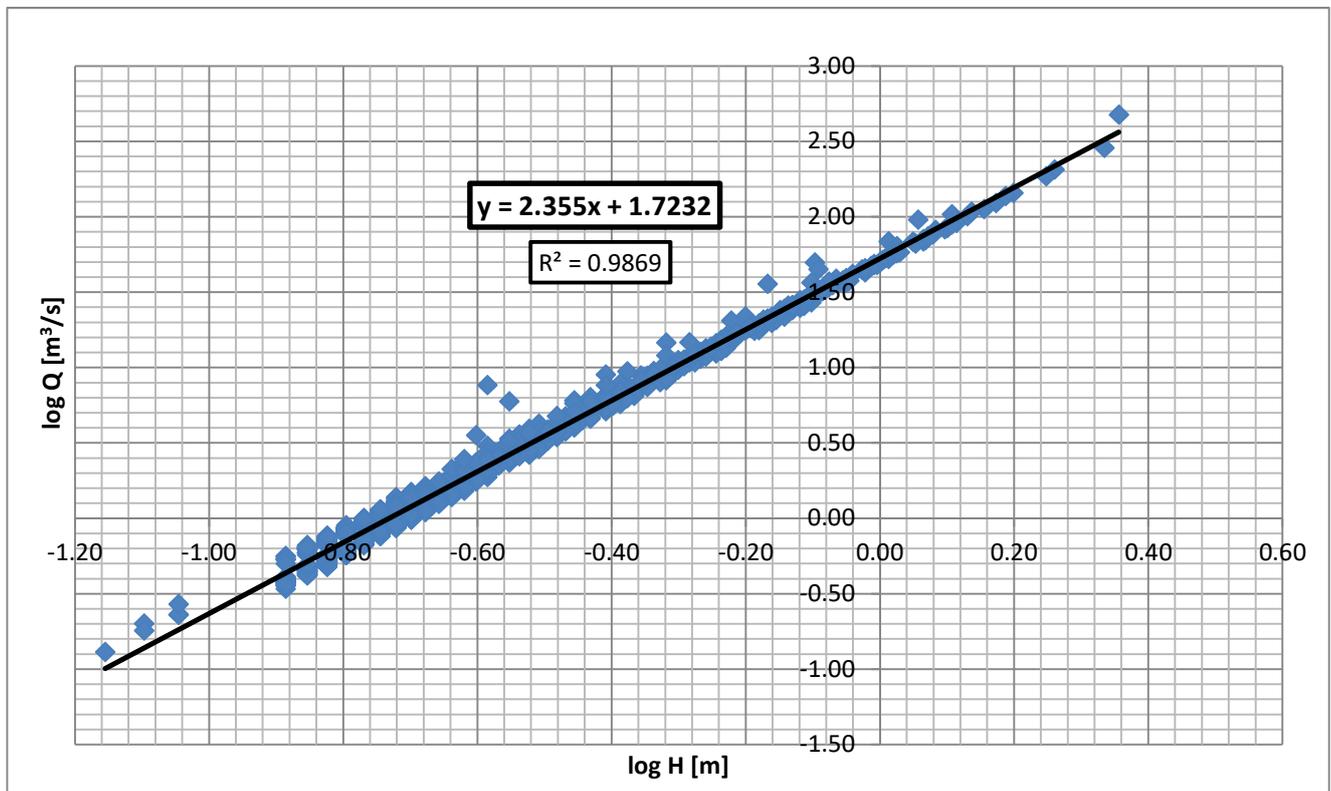


Figura 27 Scala di deflusso per la stazione ARPA di Cuornè

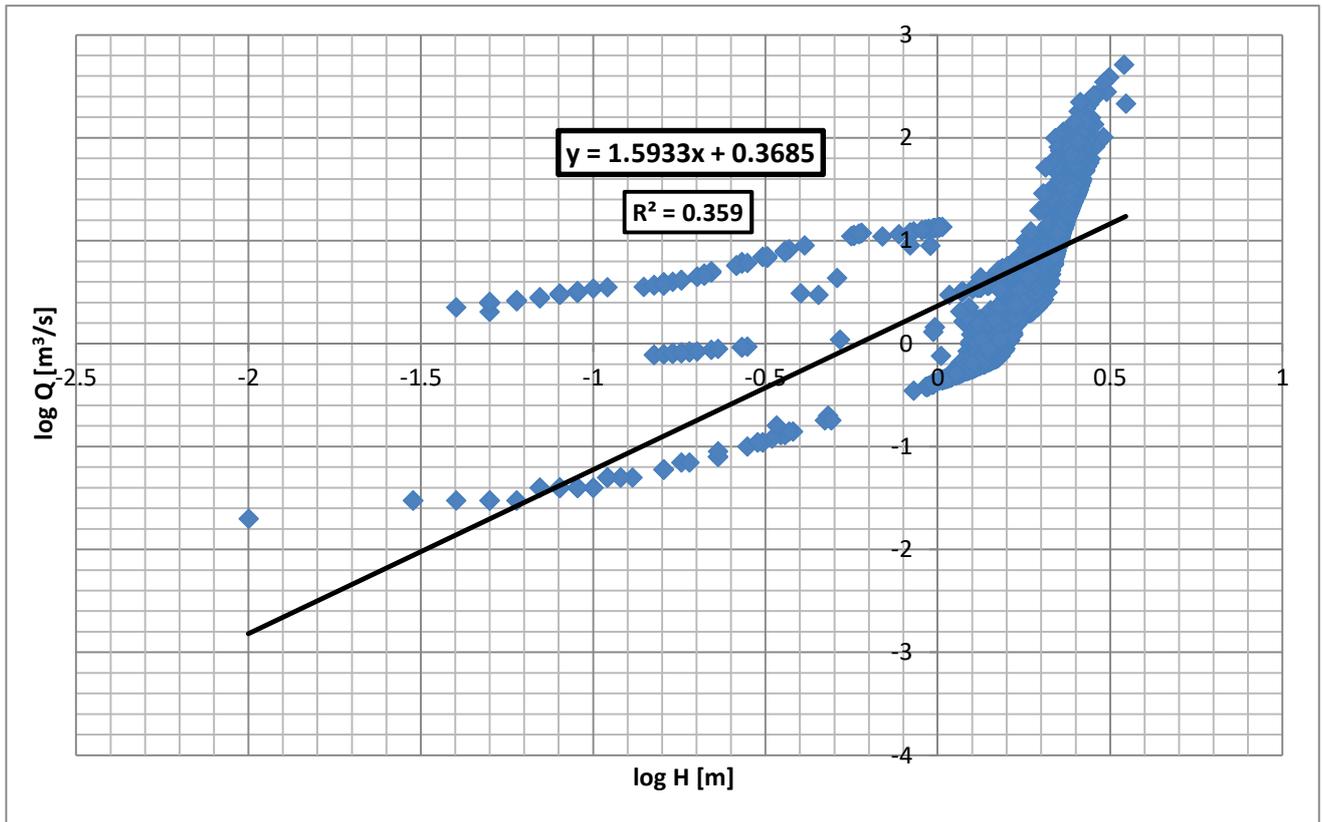


Figura 28 Scala di deflusso per la stazione ARPA di Castellamonte Spineto

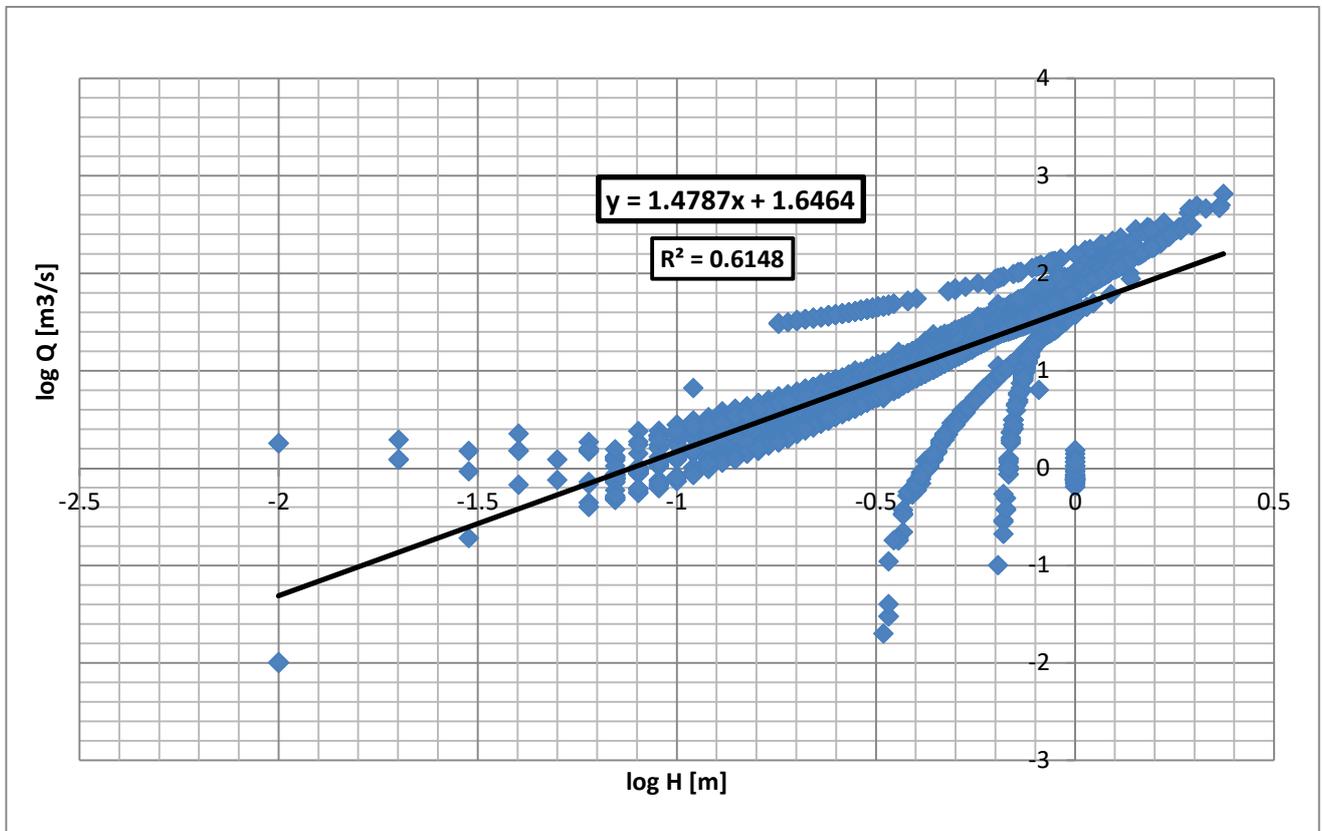


Figura 29 Scala di deflusso per la stazione ARPA di San Benigno Canavese

Dal confronto degli andamenti è possibile osservare una maggiore dispersione dei dati rispetto all'andamento teorico nel caso delle stazioni di Castellamonte-Spineto e di San Benigno Canavese, più contenuta nel caso di quest'ultima. Al fine di valutare l'incidenza di tale dispersione, i risultati ottenuti considerando la totalità dei dati sono stati posti a confronto con quanto ottenuto dalle sole stazioni di Cuornè e San Benigno.

In particolare, come visibile in Tabella 5, sono stati raccolti i risultati dell'interpolazione lineare dei dati di ciascuna stazione, consistenti in coefficiente angolare, direttamente coincidente con il parametri m , ed intercetta, correlata al coefficiente k secondo la relazione 4.4. Dall'elaborazione di quest'ultima sono stati in definitiva estratti i valori di k .

Tabella 5 Risultati dell'interpolazione dei dati idrometrici

Stazione	m	$\log k$	k
Cuornè	2.355	1.7232	52.8689
Castellamonte-Spineto	1.5933	0.3685	2.3361
San Benigno	1.4787	1.6464	44.2996

Al fine di ottenere una univoca relazione di deflusso i valori in Tabella 5 sono stati elaborati in primo luogo tramite una media aritmetica e successivamente con una ponderazione basata sul numero di anni di dati disponibili, rispettivamente secondo le relazioni 4.5 e 4.6.

$$m(k) = \sum_{i=1}^3 m_i(k_i) \quad 4.5$$

$$m(k) = \sum_{i=1}^3 \frac{m_i(k_i) n_i}{\sum n_i} \quad 4.6$$

Ove n_i rappresenta il numero di anni di osservazione della stazione i -esima.

Il medesimo procedimento è stato adottato considerando inoltre, come già introdotto, l'esclusione dei dati di Castellamonte Spineto, caratterizzati da maggior dispersione, ottenendo in definitiva quanto raccolto in Tabella 6.

Tabella 6 Coefficienti della scala di deflusso

		m	k
Dati da tutte le stazioni	Mediatura aritmetica	1.81	33.17
	Mediatura ponderata	1.62	32.62
Dati di Cuornè e San Benigno C.se	Mediatura aritmetica	1.91	48.58
	Mediatura ponderata	1.63	45.79

Da un confronto critico di quanto riportato in Tabella 6 è possibile osservare una concentrazione dei valori dell'esponente m nel caso con ponderazione intorno a 1.62, mentre risulta evidente una maggiore dispersione per quanto attiene al coefficiente k . In definitiva, quindi si è optato per l'adozione dei valori corrispondenti rispettivamente a 1.62 e 32.62.

4.4. ANALISI DELLE PORTATE MORFODINAMICAMENTE ATTIVE

In aggiunta alle considerazioni idrologiche è stata effettuata un'elaborazione dei risultati di una serie di simulazioni di flusso al fine di valutare la soglia in termini di portata corrispondente all'attivazione dei fenomeni di trasporto solido.

In particolare, sono state eseguite delle simulazioni idrodinamiche in condizioni di portata costante tramite il software di modellazione bidimensionale D-FlowFM, facente parte della suite Delft3D. Esse sono state condotte sul tratto oggetto in esame, designato come Zona C e per ciascuna di esse è stata reperita fra gli output la matrice delle tensioni al fondo. In Figura 30, Figura 31 e Figura 32 si riportano le mappe ottenute.

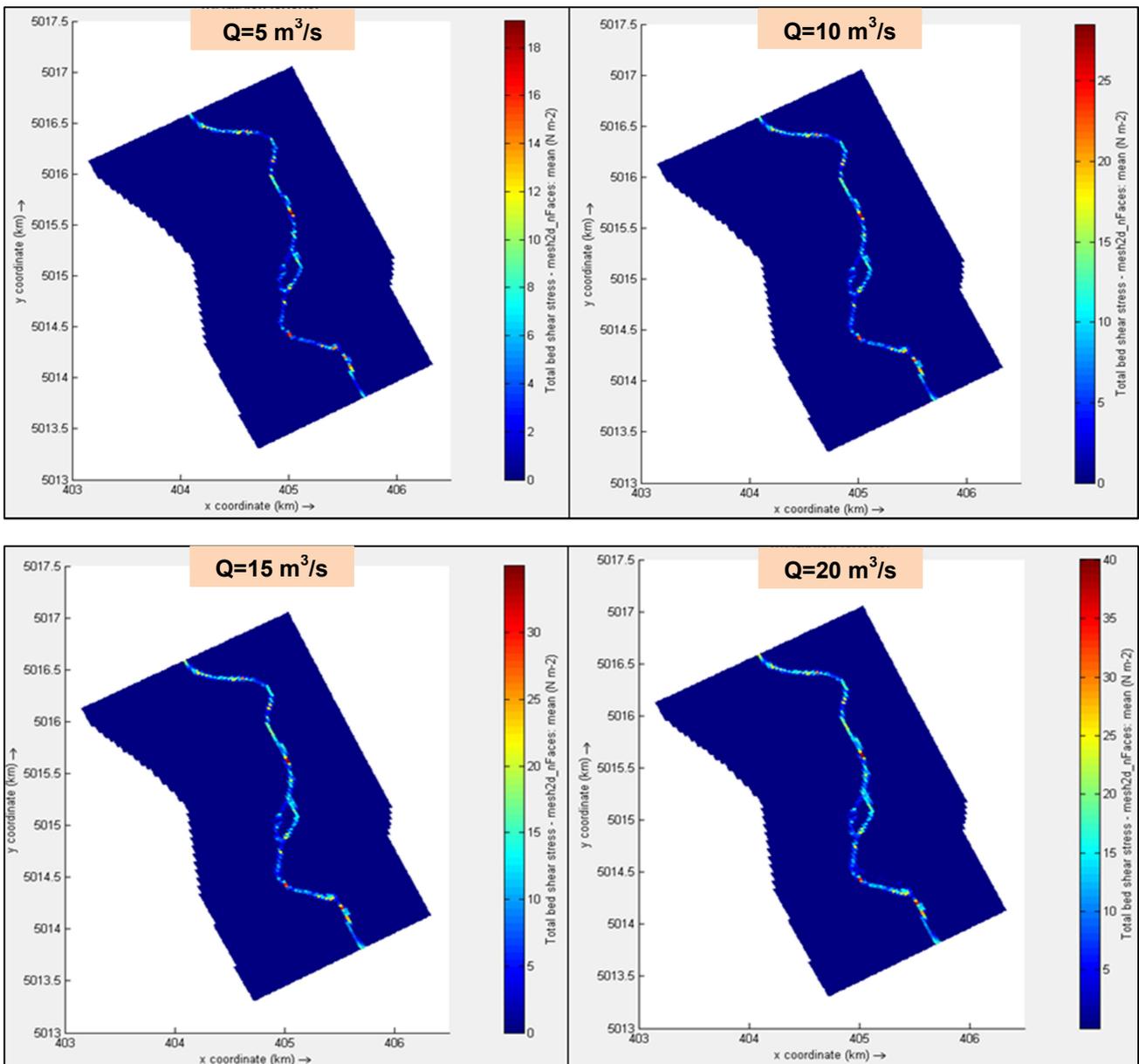


Figura 30 Mappe delle tensioni al fondo in corrispondenza della Zona C-Portate da 5 m^3/s a 20 m^3/s

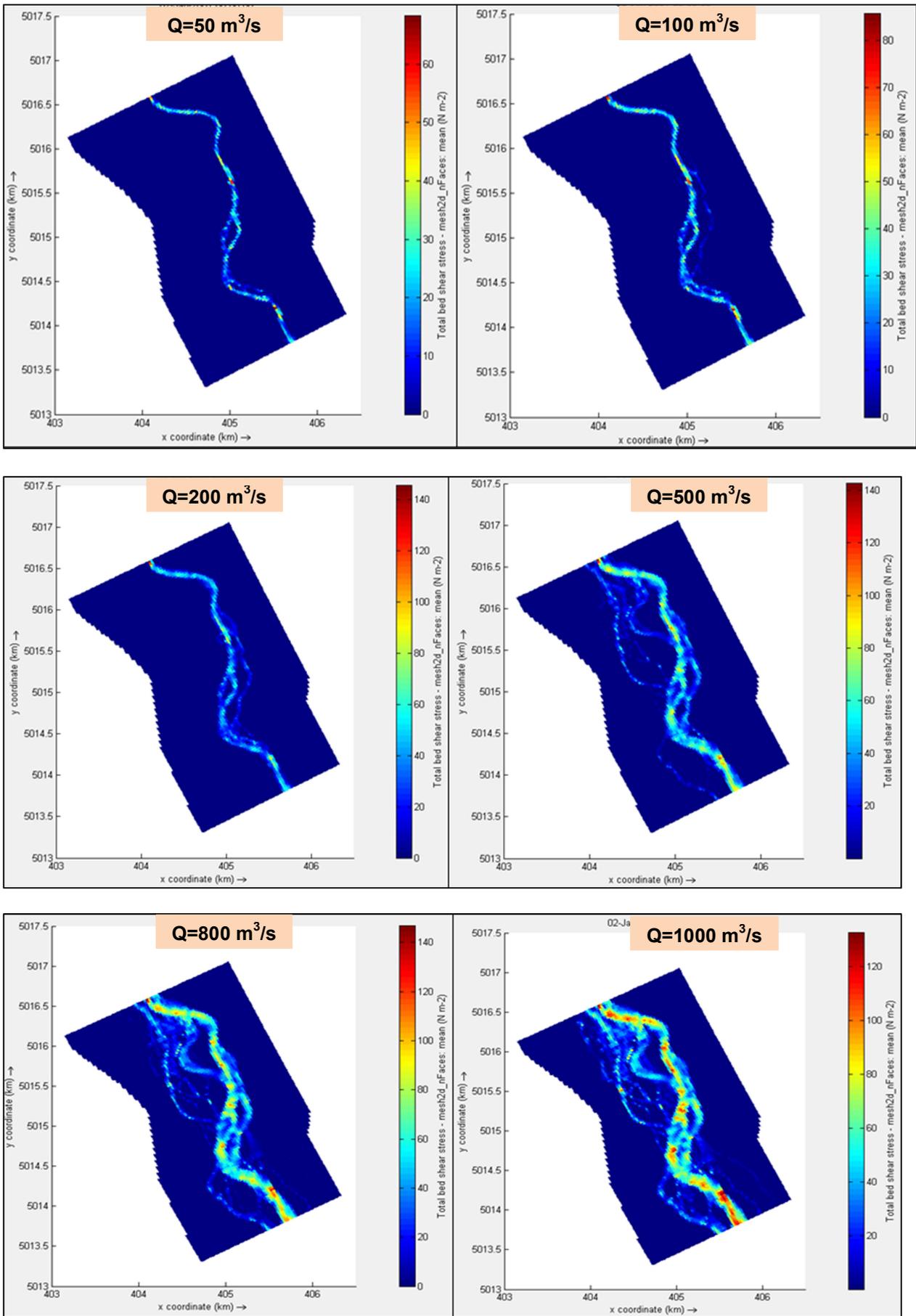


Figura 31 Mappe delle tensioni al fondo in corrispondenza dell' Zona C-Portate da $50 \text{ m}^3/\text{s}$ a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$

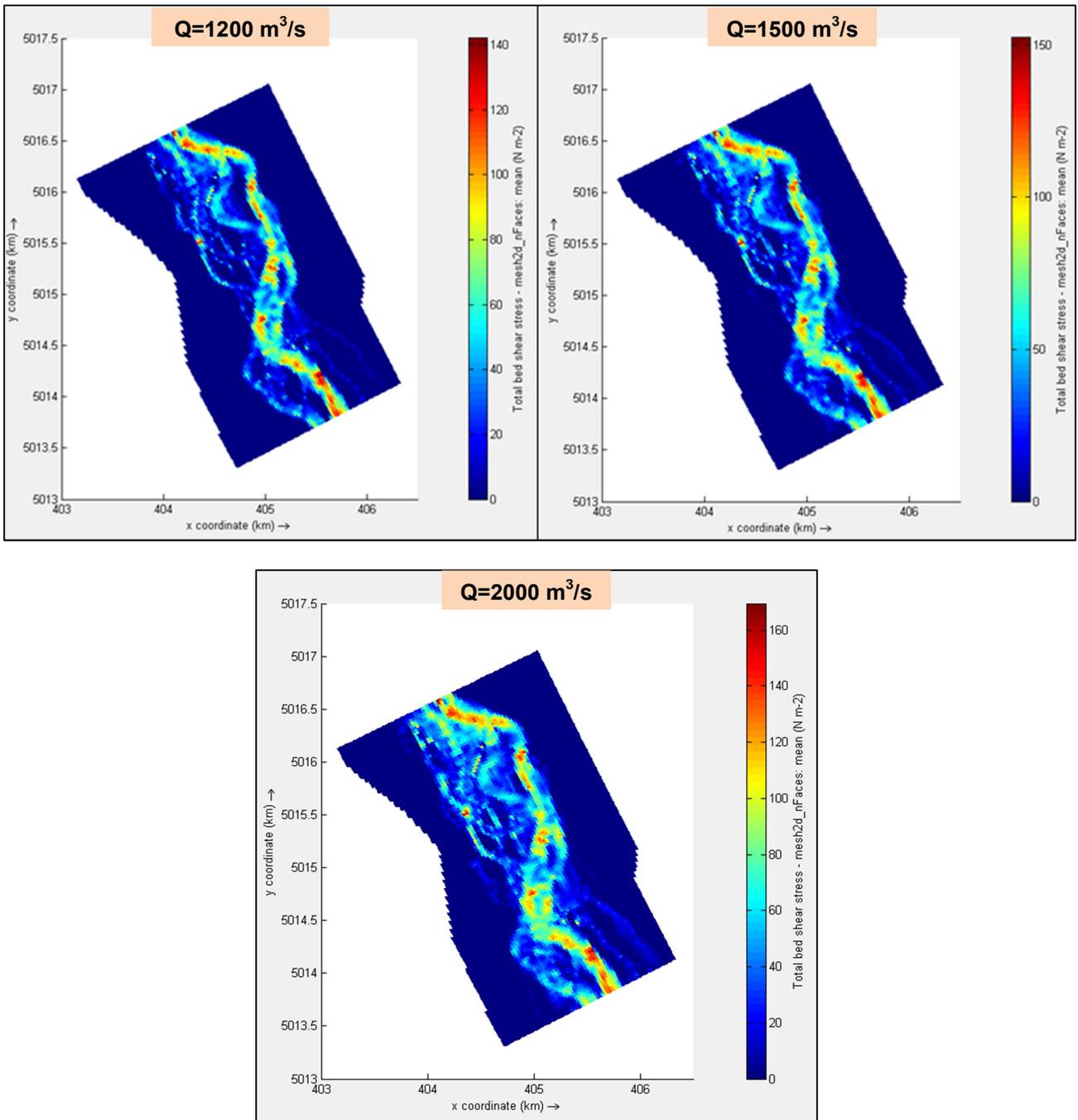


Figura 32 Mappe delle tensioni al fondo in corrispondenza dell' Zona C-Portate da $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2000 \text{ m}^3/\text{s}$

Successivamente, è stato sviluppato un algoritmo in Matlab per la determinazione per ogni simulazione della percentuale di celle in cui si osserva il superamento della tensione critica di mobilizzazione, corrispondente all'attivazione dei fenomeni di trasporto solido.

Tale parametro è stimabile secondo differenti formulazioni, basate sul parametro Reynolds Particle, definito in 4.7.

$$R_p = \frac{\sqrt{\Delta g d_{50}^3}}{\nu} = 87205 \quad 4.7$$

In cui:

$$\Delta = \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \approx 2.65 - 1$$

$$\rho_s = \text{densità del solido} = 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho = \text{densità del fluido} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$d_{50} = \text{diametro mediano del sedimento} = 77.74 \text{ mm}$$

$$g = \text{accelerazione gravitazionale} = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\nu = \text{viscosità cinematica del fluido} = 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

In particolare, si è considerata la relazione di Brownlie con correzione di Parker, che definisce la tensione critica di mobilizzazione τ_c nella relativa forma adimensionalizzata τ_{c*} come in 4.8.

$$\tau_{c*} = \frac{\tau_c}{\rho \Delta g d_{50}} = 0.50 [0.22 R_p^{-0.6} + 0.06 \exp(-17.77 R_p^{-0.6})] = 0.0295 \text{ N/m}^2 \quad 4.8$$

Avendo così definito il valore soglia è stato possibile stimare la percentuale di area in cui se ne osserva il superamento. L'analisi, condotta per l'intero dominio simulato e per le sole zone di volta in volta bagnate, ha prodotto i risultati graficizzati in Figura 33 e raccolti in Tabella 7.

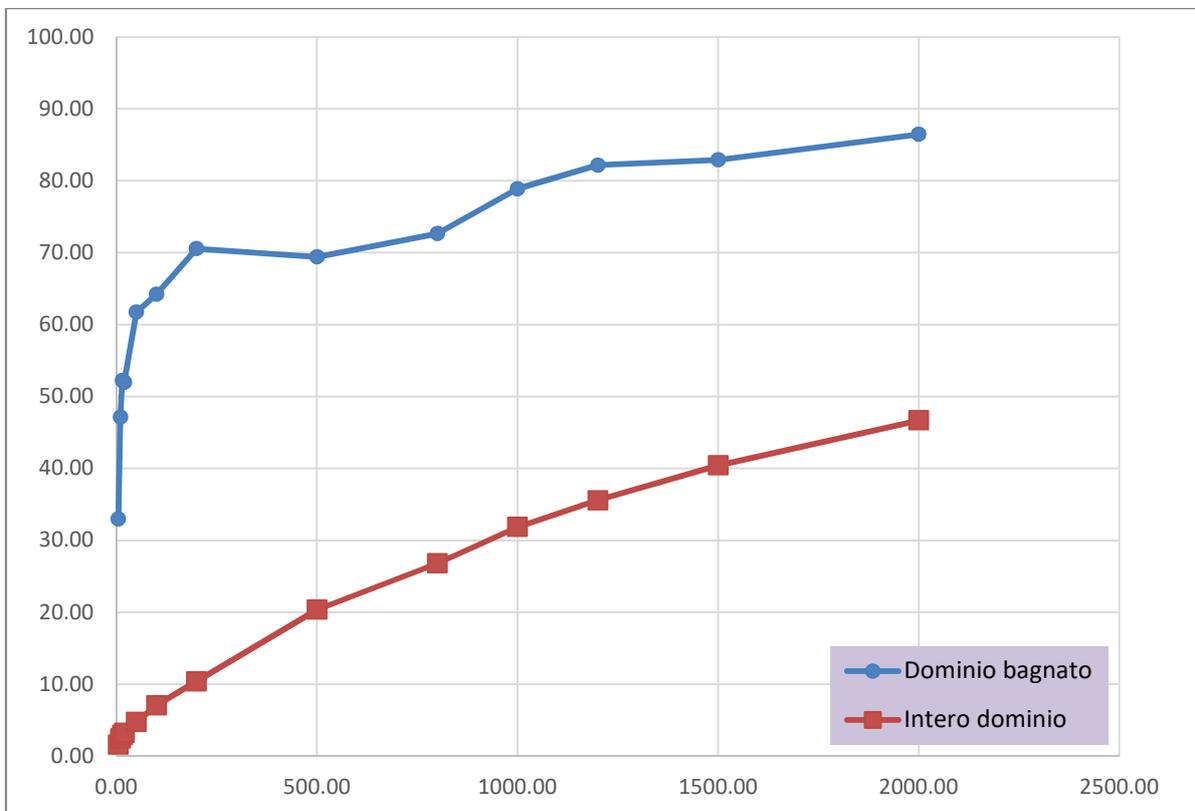


Figura 33 Percentuale di area con trasporto solido di fondo attivo in riferimento all'intero dominio di simulazione e a quello bagnato

Tabella 7 Percentuale di area con trasporto solido di fondo attivo secondo il limite della relazione di Brownlie con correzione di Parker

Q [m ³ /s]	% area con TS attivo	
	Intero dominio	Dominio bagnato
5.00	1.57	32.97
10.00	2.43	47.14
15.00	2.93	52.26
20.00	3.23	51.98
50.00	4.72	61.73
100.00	7.06	64.22
200.00	10.40	70.56
500.00	20.36	69.40
800.00	26.79	72.65
1000.00	31.85	78.90
1200.00	35.56	82.17
1500.00	40.41	82.91
2000.00	46.69	86.46

In generale si può osservare come le percentuali calcolate in riferimento al solo dominio bagnato risultino di netto superiori a quelle associate all'intera mesh di calcolo, coerentemente con lo sfoltimento della popolazione analizzata, e siano caratterizzate da minore scostamento reciproco, in ragione della rideterminazione del dominio bagnato per ciascuna simulazione.

Da un'analisi di quanto sopra riportato è possibile concludere i fenomeni di trasporto solido si attivino per portate superiori ai 100 m³/s; pertanto è possibile adottare un valore soglia compreso fra esso e la portata media della stazione più prossima alla zona considerata ossia San Benigno Canavese (20.90 m³/s). Si anticipa in particolare che sarà utilizzato un valore intermedio pari a 40 m³/s, corrispondente ad una durata di circa 50 giorni.

5. MODELLAZIONE NUMERICA

5.1. D-Flow Flexible Mesh (D-FlowFM)

La modellazione numerica oggetto del presente lavoro è stata svolta tramite l'utilizzo del software D-FlowFM facente parte della suite Delft 3D, sviluppata dall'istituto per la ricerca applicata Deltares. La scelta di tale software è legata alla possibilità di effettuare una modellazione idrodinamica bidimensionale tramite discretizzazione del dominio in celle definite *unstructured*, ossia irregolari (D-Flow Flexible Mesh User Manual, 2021). Tale particolarità, infatti, conferisce loro maggiore flessibilità sia dal punto di vista planimetrico che da quello altimetrico, aprendo in questo modo alla possibilità di simulare con maggior precisione e stabilità la conformazione del fondo ed eventuali fenomeni di evoluzione. Ciò, data la stretta interconnessione fra gli aspetti idrodinamici, morfologici e morfodinamici, consente l'esecuzione di simulazioni idro-morfodinamiche stabili e precise. Inoltre, per esso risultano disponibili dei pacchetti aggiuntivi relativi ad una serie di aspetti e processi quali morfologia (D-Morphology), come già anticipato, qualità dell'acqua (D-Water Quality), idrologia (D-Rainfall Runoff) e moto ondoso (D-Waves).

Un'ulteriore potenzialità, di primaria importanza nel presente lavoro, è costituita dalla possibilità di attivazione del pannello *Trachytopo*. Esso consente di specificare una distribuzione spaziale dei valori di scabrezza, secondo una serie di predefinite formulazioni aggiuntive rispetto alle tradizionali definizioni di Manning, Chezy e Gauckler-Strickler selezionabili in fase di setup "ordinario". In tal modo risulta quindi possibile simulare scenari maggiormente realistici caratterizzati ad esempio da presenza di macroscabrezze e/o vegetazione. Inoltre, tramite l'impiego dei file definiti di Restart, è possibile eseguire agilmente simulazioni sequenziali separate mantenendo la continuità dei fenomeni idrodinamici e morfodinamici.

A livello idrodinamico, il software D-FlowFM procede alla risoluzione del modello idrodinamico bidimensionale con ipotesi di acque basse o *shallow water*, consistente in due equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto, esplicitate rispettivamente in 5.1 e 5.2 corredate da condizioni iniziali ed al contorno.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{u}) = 0 \quad 5.1$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{h} (\nabla \cdot (h\mathbf{u}\mathbf{u}) - \mathbf{u}\nabla \cdot (h\mathbf{u})) = -g\nabla\zeta + \frac{1}{h} \nabla(vh(\nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T)) + \frac{1}{h} \frac{\boldsymbol{\tau}_b}{\rho} \quad 5.2$$

Ove:

- $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)^T$
- ζ rappresenta la quota della superficie libera;
- h è il tirante idraulico;
- \mathbf{u} è il vettore velocità;
- ν rappresenta la viscosità turbolenta;
- g è l'accelerazione gravitazionale;
- ρ è la densità dell'acqua;
- $\boldsymbol{\tau}_b = -\frac{\rho g}{C^2} \|\mathbf{u}\|\mathbf{u}$ rappresenta la tensione al fondo con C coefficiente di attrito

Il software procede alla risoluzione delle equazioni di cui sopra tramite discretizzazione del dominio bidimensionale ed implementazione di approcci numerici a volumi finiti.

5.2. INTRODUZIONE ALLA MODELLAZIONE DELLA VEGETAZIONE

Al termine delle analisi preliminari precedentemente condotte, è stato possibile procedere alla modellazione della vegetazione in alveo. Si sottolinea in particolar modo che tale procedimento risulta mirato a simularne gli effetti sulle dinamiche idrauliche e morfologiche del tratto in esame. Conseguentemente, l'approccio adottato risulta nettamente riduttivo e semplificativo rispetto alla modellazione propriamente intesa dei pattern di distribuzione e crescita delle specie vegetali.

5.2.1. CONDIZIONE STATICA

La presenza di vegetazione in alveo, a livello idromorfologico genera effetti in termini di variazione di erodibilità del fondo e resistenza al flusso, e per tale motivo può essere caratterizzata tramite variazione dei valori di scabrezza del fondo rispetto alle condizioni non vegetate.

Nel presente lavoro si è assunto di impiegare la formulazione di Baptist et al. (2007) riportata in 5.3.

$$C = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{c_b^2} + \frac{c_d n h_v}{2g}}} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \frac{h}{h_v} \quad 5.3$$

Ove:

- C è la scabrezza della vegetazione secondo la formulazione di Chezy [$m^{0.5}/s$];
- c_b rappresenta la scabrezza dell'alveo naturale nella formulazione di Chezy [$m^{0.5}/s$];
- c_d è un coefficiente di drag variabile in base al tipo di vegetazione;
- n è la densità di vegetazione [$stem/m$];
- h_v è l'altezza della vegetazione [m];
- κ è la costante di Von Karman pari a 0.41;
- h è il tirante idraulico [m].

Fornendo quindi in input al software di modellazione i parametri di cui alla relazione 5.3 è dunque possibile simulare gli effetti della vegetazione. Ciò, in ambiente D-FlowFM, è possibile, come già anticipato al Paragrafo 5.1, tramite l'attivazione della scheda *Trachytape*, dove è possibile specificare tali parametri tramite due file di tipo ASCII di estensione *.ttf* e *.arl* (D-Flow Flexible Mesh User Manual, 2021).

In particolare in essi è possibile definire delle aree caratterizzate da caratteristiche omogenee di vegetazione denotandole con un identificativo seriale. Attribuendo successivamente tali caratteristiche alle celle della mesh è dunque possibile simularne la presenza.

Il file *.ttf* è strutturato in modo da contenere per ciascun identificativo, le informazioni necessarie all'implementazione della formulazione scelta, nella fattispecie quella riportata in 5.3 di Baptist et al. (2007), ossia altezza, densità e coefficiente di drag della vegetazione e scabrezza di Chezy del fondo naturale.

Il file *.arl*, invece, contiene la definizione per ciascuna cella del dominio del tipo di vegetazione in essa stanziata, coerentemente con la distinzione fatta nel file *.ttf*, e la corrispondente frazione di copertura della cella. Qualora ammesso, nella cella si può imporre lo stanziamento di più categorie di vegetazione, imponendo altresì che la somma delle singole frazioni non esuberi l'unità.

5.2.2. CONDIZIONE DINAMICA

L'attivazione del pannello *Trachytape* e la predisposizione dei due file di cui al Paragrafo 5.2.1 consentono esclusivamente la simulazione di uno scenario di vegetazione statica, in cui le caratteristiche ecologiche e di distribuzione spaziale restano immutate nel tempo. Per tale motivo, per integrare gli aspetti di evoluzione temporale, si fa riferimento ad un algoritmo Matlab in grado di procedere alla compilazione dei file di input *.arl* e *.ttd* contestualmente all'avanzare della simulazione. Esso è stato ottenuto dall'adattamento al caso specifico di quello sviluppato da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020) per vegetazione di tipo *saltmarshes* (ovvero vegetazione caratteristica delle paludi salmastre presenti in alcune zone costiere) a loro volta basati sul lavoro di van Oorschot (2016).

In particolare, il funzionamento di tale algoritmo è basato su un predefinito schema di lavoro. In primo luogo si assume di eseguire una preliminare simulazione idrodinamica e morfodinamica di durata simbolica, in assenza di contributo alla scabrezza indotto dalla vegetazione, al fine di validare il modello idro-morfodinamico e produrre alcuni files necessari all'esecuzione dell'algoritmo. Successivamente il modello è partizionato in simulazioni sequenziali di durata limitata, pari ad un fissato passo temporale compatibile con i processi ecologici, sinteticamente denominato eco-timestep o timestep ecologico. Al termine di ciascuna simulazione i risultati sono estratti ed elaborati al fine di procedere all'aggiornamento delle caratteristiche di vegetazione.

Si precisa che per quanto riguarda la simulazione preliminare si assume di impiegare un idrogramma in ingresso costante con valore di portata pari al primo della serie temporale relativa al periodo da analizzare, in quanto, anticipando quanto in seguito illustrato, da essa vengono estratti i valori di scabrezza di Chezy da applicare al primo periodo e conseguentemente occorre disporre di dati coerenti con l'istante di inizio simulazione.

Impiegando tale schema è dunque possibile simulare l'evoluzione della vegetazione secondo un approccio a feedback positivo con i processi idrodinamici e morfodinamici.

La struttura dei codici è stata per quanto possibile mantenuta inalterata, compatibilmente con l'introduzione di due modifiche sostanziali corrispondenti all'impostazione di un funzionamento cella per cella degli algoritmi ed all'integrazione della presenza di vegetazione antecedente all'inizio della simulazione.

5.3. MODELLAZIONE DELLA VEGETAZIONE

5.3.1. IPOTESI INIZIALI DI MODELLO

Come anticipato, per quanto attiene le leggi di crescita dei parametri ecologici, sono state introdotte alcune modifiche rispetto a quanto fatto da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020).

In particolare, per quanto concerne l'evoluzione temporale dei diametri, si è assunta a riferimento la relazione derivata da Botkin et al. (1972), riportata in 5.4.

$$\frac{d\vartheta}{dt^*} = \frac{G(\vartheta D_m^*)^{q-1} [(\vartheta^3 - 2\vartheta^2 + 1)H_m^* - (\vartheta - 1)^2 \vartheta H_0^*]}{2[H_0^* + \vartheta(2\vartheta - 3)(H_0^* - H_m^*)]H_m^*} \quad 5.4$$

Ove $\vartheta = \frac{D}{D_m^*}$ è il diametro adimensionalizzato rispetto al valor massimo D_m^* osservabile all'altezza del petto H_0^* , convenzionalmente fissata pari a 1.37 m, ed H_m^* rappresenta l'altezza massima raggiungibile dalla specie. Generalmente i coefficienti G e q sono assunti da letteratura in modo da assicurare che a metà della massima vita della specie T_m^* sia raggiunta un'altezza pari a $2/3$ di quella massima. Nel caso presente, tuttavia, si anticipa che si è proceduto ad una calibrazione di questi ultimi, imponendo dei valori di tentativo di q e determinando G sulla base dei dati LIDAR citati al Paragrafo 3.4.

Le altezze, si assume siano desumibili dai diametri tramite l'applicazione della già citata legge allometrica già calibrata per le specie oggetto di esame da Redoglia (2021).

Per quanto attiene la crescita radicale, riprendendo quanto fatto da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020), è stata adottata una legge di crescita del tipo logaritmica in funzione del tempo, riportata in 5.5 e graficizzata in Figura 34, come indicato da van Oorschot et al. (2006) e Oorschot et al. (2017).

$$G = F_v \log(a) \quad 5.5$$

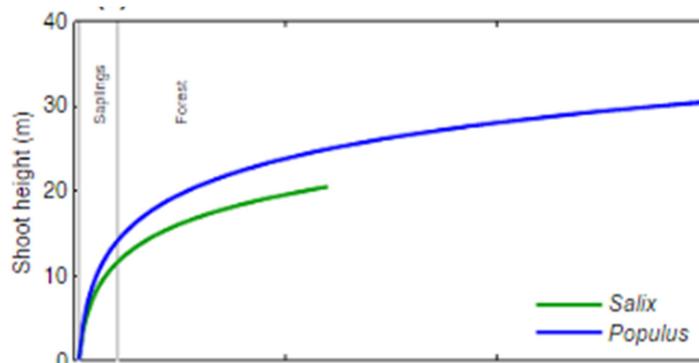


Figura 34 Rappresentazione della legge di crescita logaritmica adottata (Brückner et al., 2019)

Ove G rappresenta la dimensione espressa in metri di lunghezza radicale, F_v il fattore di crescita logaritmica dipendente dal tipo di vegetazione ed a l'età in anni della vegetazione.

In analogia a quanto fatto da van Oorschot et al. (2016), si considera altresì un meccanismo di crescita inter-annuale di tipo lineare, ossia nel quale tramite un trend lineare nella stagione di crescita, sono raggiunte a fine periodo le dimensioni postulate dalle leggi di crescita prescelte.

Il sopracitato periodo di crescita, così come quello di riproduzione sono stati posti pari a quelli ricavati da van Oorschot et al. (2016) per ciascuna specie sulla base di quanto disponibile in letteratura e sono raccolti in Tabella 8. Per quanto attiene ai meccanismi riproduttivi si assume una prevalenza di tipologia sessuata, corrispondente alla dispersione di semi, di cui si ipotizza disponibilità infinita durante il corrispondente periodo, tramite vento e fenomeni di idrocoria, ossia trasporto da parte della corrente (Vesipa et al., 2007).

Al fine di simulare quest'ultimo processo, in analogia a quanto fatto da Brückner et al. (2019), si assume che la dispersione e dunque la potenziale colonizzazione interessi le celle in cui nel periodo riproduttivo in cui si sia verificata una sommersione ed una successiva recessione del livello riconducibili alle fasi di deposizione del seme e germinazione. In particolare dunque, sono ritenute potenzialmente colonizzabili le celle per cui si siano registrati nell'ordine un tirante massimo ed un minimo rispettivamente superiori e inferiori ad una predefinita soglia. Si precisa che, ricalcando quanto fatto da Brückner et al. (2019), tali valori di tirante sono stati ricalcolati rispetto a quelli in esito alla simulazione tramite decurtazione di un valore soglia pari a 0.05 m, adoperato per tenere conto di fenomeni di saturazione del suolo ed evapotraspirazione. La casualità del processo di dispersione dei semi è tenuta in conto tramite selezione randomica fra le sopracitate celle.

Per la valutazione del buon esito della colonizzazione, si è fatto riferimento al lavoro di Guillo-Froget et al. (2002), che in relazione al concetto di *Window of Opportunity* (Caponi et al, 2019), identificano come cruciali per la sopravvivenza dei semi le condizioni idrodinamiche registrate nei 30 giorni successivi la dispersione. Nella fattispecie, la maggior causa di insuccesso del processo è ascrivibile agli stress di mancanza idrica, che non devono avere una durata consecutiva superiore a 7 giorni. Conseguentemente, si assume il fruttuoso stanziamento dei semi depositi nelle celle in cui sia rispettata tale condizione. A rigore, si precisa come il modello sviluppato dagli autori risulti maggiormente dettagliato in quanto si distinguono condizioni di effettivo stress idrico e di emersione della cella con disponibilità di acqua entro lo spessore di risalita capillare, tuttavia a livello pratico non risulta possibile implementare tale discernimento senza importanti margini di incertezza, data l'indisponibilità dei dati di soggiacenza nelle celle non bagnate. Per tale motivo si è optato per la definizione di una condizione semplificata di sopravvivenza dei germogli.

Si assume inoltre che ogni specie sia caratterizzata da un predefinito numero di stadi vitali, nella fattispecie 4, corrispondenti alle condizioni di germoglio (seedling), virgulto (bush), vegetazione sviluppata (forest) e vegetazione senescente (degeneration), per ognuno dei quali è possibile tarare con maggiore precisione i parametri ecologici di crescita e mortalità, quale ad esempio la sensibilità agli stress idro-morfodinamici. In particolare, per quanto attiene i processi di mortalità si considera che essa si possa tradurre in una diminuzione della frazione di copertura vegetale delle celle e che sia associata a 6 principali cause:

1. Anossia per sommersione idraulica;
2. Anossia per sommersione detritica;
3. Disseccamento;
4. Sradicamento per sottoescavazione;
5. Sradicamento indotto da velocità di flusso
6. Senescenza.

Per le cause 1,3,5 si ipotizza una correlazione fra frazione deceduta e relativa pressione morfodinamica di tipo dose-effetto, come rappresentato in Figura 35.

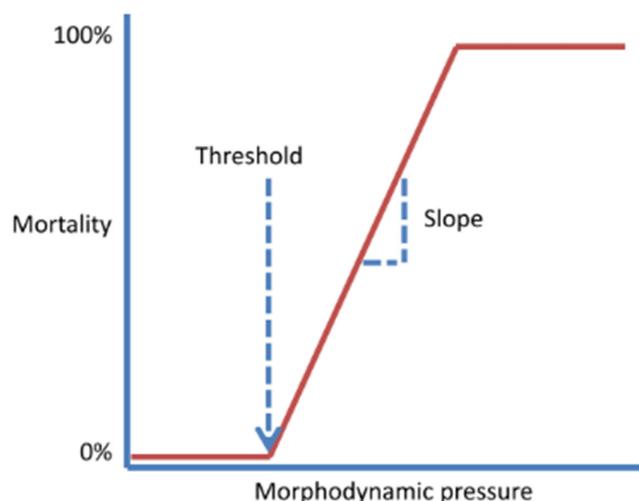


Figura 35 Rappresentazione della struttura dose-effetto della legge di mortalità (van Oorschot et al., 2016)

Come già anticipato, i valori adottati nel presente lavoro sono stati estratti dallo studio condotto da van Oorschot et al. (2016) per omologhe specie e sono raccolti e graficizzati rispettivamente nei prospetti di Tabella 8, Tabella 9, Tabella 10 ed in Figura 36 e Figura 37.

Tabella 8 Caratteristiche generali per i tipi di vegetazione analizzati. Prospetto estratto da van Oorschot et al. (2016)

	Unità	SALICE	PIOPPA	RIFERIMENTI
Massima età	yr	60	150	Canadell et al. (1996)
Fattore di crescita logaritmico del fusto	-	11.5	14	Kleyer et al (2008)
Lunghezza iniziale del fusto	m	0.25	0.1	Van Velzen et al. (2003)
Fattore di crescita logaritmico delle radici	-	0.85	1.15	Canadell et al. (1996)
Lunghezza iniziale delle radici	m	0.1	0.5	Braatne et al. (1996) Peters (2002)
Fattore di crescita logaritmico del diametro	-	0.41	0.6	Van Velzen et al. (2003)
Diametro iniziale	m	0.002	0.036	Van Velzen et al. (2003)
Periodo di riproduzione/dispersione dei semi	month	Giugno	Luglio	Kleyer et al. (2008) Van Splunder et al. (1995)
Periodo di crescita fusto	month	Marzo-Settembre	Marzo-Settembre	van Oorschot et al. (2016)
Periodo di crescita diametro	month	Marzo-Settembre	Marzo-Settembre	van Oorschot et al. (2016)
Periodo di crescita radici	month	Marzo-Ottobre	Marzo-Ottobre	van Oorschot et al. (2016)

Tabella 9 Caratteristiche per ciascun stadio vitale dei salici. Prospetto estratto da van Oorschot et al. (2016)

	SALICE					Rif.
	Unità	LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	
Anni per stadio vitale	yr	1	9	40	10	Van Velzen et al. (2003)
Numero di steli	stem/m ²	25	15	0.16	0.16	Van Velzen et al. (2003) Wolf et al. (2001)
Frazione areale (0-1)	-	0.8	0.8	0.8	0.8	Van Oorschot et al. (2016)
Coefficiente di drag	-	1	1.5	1.5	1.5	Van Velzen et al. (2003) Fotherby et al. (2012)
Crescita del fusto per ciascun LS	m	0.25	11.5	8.04	0.91	Calcolato
Crescita delle radici per ciascun LS	m	0.1	0.85	0.59	0.07	Calcolato
Crescita del diametro per ciascun LS	m	0.002	0.41	0.287	0.032	Calcolato
Soglia di disseccamento	days	25	190	240	365	Geerling et al. 2006
Pendenza di disseccamento	1/days	0.7	0.3	0.3	1	Geerling et al. 2006
Soglia di flooding	days	70	260	310	365	Geerling et al. (2006)
Pendenza di flooding	1/days	0.75	0.3	0.3	1	Geerling et al. (2006)
Soglia di velocità	m/s	0.55	7	12	6	Geerling et al. (2006)
Pendenza di velocità	s/m	0.75	0.3	0.3	0.3	Geerling et al. (2006)

Tabella 10 Caratteristiche per ciascun stadio vitale dei pioppi. Prospetto estratto da van Oorschot et al. (2016)

	PIOppo					
	Unità	LS 1	LS 2	LS 3	LS 4	Rif.
Anni per stadio vitale	yr	1	9	130	10	Van Velzen et al. (2003)
Numero di steli	stem/m ²	25	13	0.27	0.27	Van Velzen et al. (2003) Wolf et al. (2001)
Frazione areale (0-1)	-	0.8	0.8	0.8	0.8	Van Oorschot et al. (2016)
Coefficiente di drag	-	1	1.5	1.5	1.5	Van Velzen et al. (2003) Fotherby et al. (2012)
Crescita del fusto per ciascun LS	m	0.1	14	9.78	1.11	Calcolato
Crescita delle radici per ciascun LS	m	0.5	1.15	0.8	0.09	Calcolato
Crescita del diametro per ciascun LS	m	0.036	0.6	0.419	0.047	Calcolato
Soglia di disseccamento	days	35	210	260	365	Geerling et al. 2006
Pendenza di disseccamento	1/days	0.75	0.3	0.3	1	Geerling et al. 2006
Soglia di flooding	days	60	240	290	365	Geerling et al. (2006)
Pendenza di flooding	1/days	0.75	0.3	0.3	1	Geerling et al. (2006)
Soglia di velocità	m/s	0.55	7	12	6	Geerling et al. (2006)
Pendenza di velocità	s/m	0.75	0.3	0.3	0.9	Geerling et al. (2006)

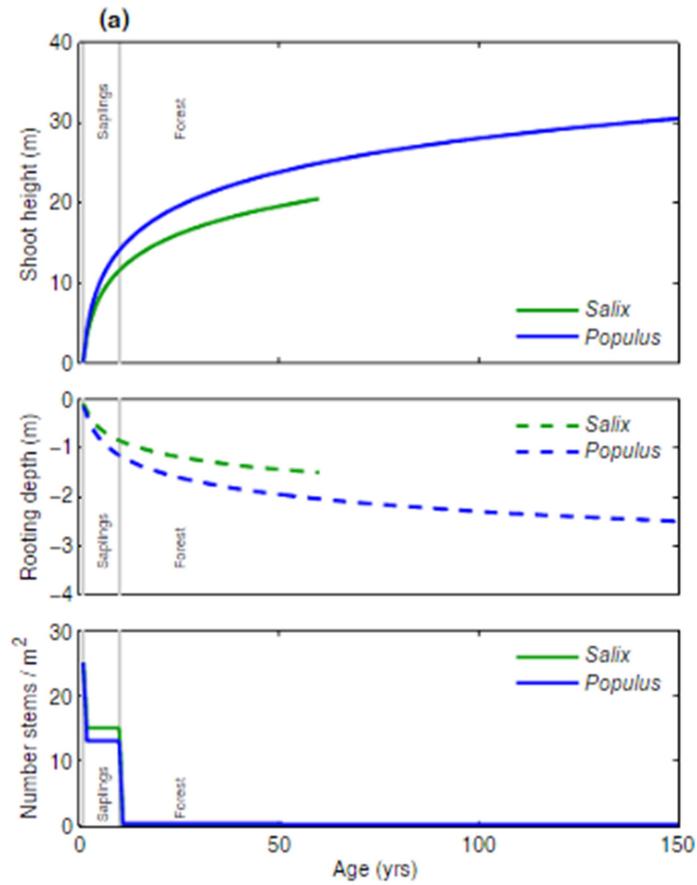


Figura 36 Leggi di crescita adottate per altezza del fusto, lunghezza radicale e densità (van Oorschot et al., 2016)

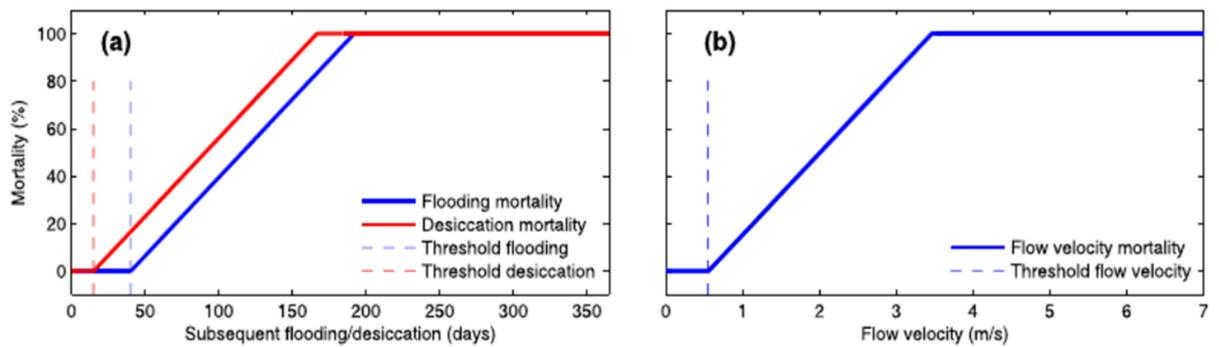


Figura 37 Leggi di mortalità adottate per le differenti cause considerate (van Oorschot et al., 2016)

Di seguito si fornisce inoltre un quadro delle relazioni intercorrenti fra i principali parametri ecologici utilizzati nel presente lavoro.

Definendo una densità ed un diametro caratterizzante una determinata cella, la frazione di copertura vegetale $F_{veg\ cover}$ della stessa può essere stimata come in 5.6.

$$F_{veg\ cover} = \frac{A_{vegetata}}{A_{cella}} = \frac{Dens * A_{stem} * A_{cella}}{A_{cella}} = Densità * A_{stem} \quad 5.6$$

In cui A_{stem} corrisponde all'area di base di un esemplare, calcolata sulla base del diametro.

La biomassa B è definita come massa di materiale vegetale, ed è ricavata come da relazione 5.7.

$$B = B(1\ stem) * \#Stem = A_{stem} * H_{stem} * \rho * \frac{F_{veg\ cover} * A_{cella}}{A_{stem}} \quad 5.7$$

Dove H_{stem} rappresenta l'altezza del fusto e ρ corrisponde alla massa volumica di legno verde, denominata *Green Woody Density*.

Si anticipa come nel presente lavoro si faccia riferimento a variazioni di biomassa positive, indotte da crescita di diametro e altezza del fusto, e negative associate alla diminuzione di copertura vegetale della cella. Per il computo di queste ultime si farà riferimento alle relazioni riportate in 5.8 e 5.10.

$$dB_{grown} = dV_{grown} * \rho * \frac{F_{veg\ cover} * A_{cella}}{A_{stem}} \quad 5.8$$

$$dV_{grown} = \frac{\pi D^2}{4} dH \quad 5.9$$

$$dB_{dead} = A_{stem} * H_{stem} * \rho * \frac{F_{veg\ cover\ dead} * A_{cella}}{A_{stem}} \quad 5.10$$

La variazione di volume indotta dalla crescita di cui alla relazione 5.9 è valutata in funzione del diametro maggiorato dell'incremento osservato durante il timestep ecologico, mentre nel caso di computo della biomassa rimossa i valori di diametro e altezza adottati corrispondono a quelli iniziali.

5.3.2. IPOTESI INIZIALI DI LAVORO

Per consentire le modifiche citate al Paragrafo 5.2.2. sono state formulate le seguenti ipotesi di lavoro:

1. All'atto della simulazione è già presente vegetazione stanziata;
2. Ogni cella può risultare colonizzabile da nessuna, una o tutte le specie;
3. Sono forniti in ingresso dei file di testo contenenti informazioni specifiche relative alla vegetazione, in numero pari al numero di specie considerate consistenti in parametri del modello di crescita e caratteristiche di mortalità, identificati dalla denominazione "*Veg#.txt*";
4. Ogni cella del dominio è supposta essere una regione a caratteristiche omogenee di vegetazione e conseguentemente a ciascuna di esse corrisponde un identificativo, denominato *TrachytoperID*, per ogni specie considerata. Nella fattispecie se si assume la presenza di due specie saranno quindi definiti un numero di *TrachytoperID* pari al doppio del numero di celle, con organizzazione sequenziale dei tipi di vegetazione, ossia set di identificativi di ogni cella concatenati;
5. E' fornito in ingresso un file di tipo *.arl* denominato "*initial_data.arl*", contenente per ogni cella, per ciascun tipo di vegetazione i diametri e le frazioni iniziali di copertura;
6. All'interno di tale file è presente un numero di righe pari al numero di celle per il numero di specie considerate. Laddove una specie non sia ammessa o non sia attualmente presente la frazione è imposta nulla;
7. E' disponibile un secondo file *.arl* contenente l'indicazione per ogni cella della vegetazione che ivi può stanziarsi, contenente un numero di righe pari al numero di celle, identificato come "*allowed_colonisation.arl*";
8. Per distinguere il tipo di vegetazione ammessa si assume di adoperare una cifra coerente con la numerazione dei file di testo contenente per ogni tipologia le caratteristiche. Laddove non sia ammessa vegetazione la cifra è fissata a 0;

In Figura 38, Tabella 12 e Tabella 12 si forniscono degli estratti tipologici dei file di input a titolo esplicativo, associati ad un caso semplificato di mesh costituita da 6 celle con due tipologie di vegetazione.

```

# Vegetation factsheet SALIX
# generic cottonwood species case 1: coefficient equal for all parameters (height,diameter, root length)
# GENERAL CHARACTERISTICS (first row)
# 1.1. maximum age
# 1.2. amount of months seed dispersal
# 1.3. Colonisation method (1 = on bare substrate between max and min water levels, 2 = on bare substrate with mud content)
# 1.4. Growth method (2 = seasonal variation within year, e.g. herbs)
# 1.5. vegetation formula (is fixed with Baptiste 2007: 154, for different formula other parameters are required)
# 1.6. number of life stages
# 1.7. initial root length in m
# 1.8. initial shoot length in m
# 1.9. initial stem diameter in m
# 1.10. Vegetation type (3 = cottonwood)
# 1.11. Ecological timestep start growth shoot (in case of growth method 2)
# 1.12. Ecological timestep end growth shoot (in case of growth method 2)
# 1.13. Ecotime step end growth roots
# 1.14. Ecotime step at which colonisation starts
# 1.15. Ecotime step of last colonisation
# 1.16. Allometric coefficient A for law H=A*D^B
# 1.17. Allometric coefficient A for law H=A*D^B
# 1.18. Coefficient q for diameter growth law
# 1.19. Coefficient G for diameter growth law
# 1.20. Maximum stem diameter at breast height Dm*
# 1.21. Maximum vegetation height Hm*
# 1.22. Breast height H0
# 1.23. Minimum recorded diameter, corresponding to diameter at end first LS
# 1.24. Green wood density 27
# 1.25. Growth factor Fv for roots
#
#
# LIFE STAGE CHARACTERISTICS (from third row onwards, depending on how many lifestages are given in general characteristics)
# 3.1. maximum number of years in lifestage
# 3.2. number of stems per m2
# 3.3. initial colonisation fraction (0-1)
# 3.4. drag coefficient
# 3.5. mud percentage (=0 colonization strategy 1)
# 3.6. desiccation mortality threshold [days]
# 3.7. desiccation mortality slope
# 3.8. flooding mortality threshold [days]
# 3.9. flooding mortality slope
# 3.10. flow velocity threshold [m/s]
# 3.11. flow velocity slope 43

#1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 #9 #10 #11 #12 #13 #14 #15 #16 #17 #18 #19
#20 #21 #22 #23 #24 #25
60 1 1 2 154 4 0.1 0.25 0.002 3 5 17 21 11 12 1.695 0.625 2 7.06
1.96 46.02 1.37 0.1320 980 0.85
# Life stage characteristics
1 25 0.8 1 0.0 25 0.75 70 0.75 0.55 0.75
9 15 0.8 1.5 0.0 190 0.3 260 0.3 7.0 0.3
40 0.16 0.8 1.5 0.0 240 0.3 310 0.3 12.0 0.3
10 0.16 0.8 1.5 0.0 365 1 365 1.0 6.0 0.3

```

Figura 38 Struttura dei file "Veg#.txt"

Tabella 11 Esempio di struttura del file "allowed_colonisation.arl"

X [m]	Y [m]	ALLOWED VEGETATION TYPE [0=NONE; 1=SPECIE 1; 2=SPECIE 2; 3=BOTH]
200.50	50.70	1
200.50	80.50	2
200.50	100.01	1
150.20	50.70	3
150.20	80.50	1
150.20	100.01	2

Tabella 12 Tipologico del file "initial_data.arl"

	X [m]	Y [m]	Z [m]	VEG. COVER FRACTION [-]	INITIAL STEM DIAMETER [m]
SPECIE 1	200.50	50.70	0	0.3	0.1
	200.50	80.50	0	0	0
	200.50	100.01	0	0.5	0.2
	150.20	50.70	0	0.8	0.8
	150.20	80.50	0	0.4	0.5
	150.20	100.01	0	0	0
SPECIE 2	200.50	50.70	0	0	0
	200.50	80.50	0	0.1	0.3
	200.50	100.01	0	0	0
	150.20	50.70	0	0	0
	150.20	80.50	0	0	0
	150.20	100.01	0	0.2	0.6

Si precisa che il software richiede la somministrazione di tali informazioni relativamente a punti specifici della mesh identificati come punti medi dei lati di flusso, ovvero i punti medi dei lati delle celle. I file iniziali di cui sopra, tuttavia, si assume siano formulati in riferimento ai centri di ogni cella della mesh, in modo da specificare univocamente per ogni cella delle condizioni iniziali, in ottemperanza alle ipotesi di modello. Inoltre, le successive elaborazioni eseguite dall'algoritmo, sono basate su output delle simulazioni riferiti anch'essi ai centri delle celle. Per tale motivo si assume di eseguire le elaborazioni contestualmente ai centri cella e solo preliminarmente alla somministrazione, di effettuare un'interpolazione dei risultati nei punti richiesti dal software. Conseguentemente, i *TrachytopoID* citati sopra per chiarezza, risultano provvisori e all'atto della interpolazione saranno sostituiti in modo da ripristinare la coerenza con i nuovi punti identificati, seguendo uno schema di ragionamento del tutto analogo a quanto riportato nelle ipotesi.

E' altresì importante specificare sin da subito che le frazioni di copertura vegetale provenienti dal file "initial_data.arl" e oggetto di elaborazione differiscono da quelle somministrate al software di simulazione. Quest'ultimo infatti, richiede una frazione esplicitiva della percentuale di cella cui occorre applicare la maggiorazione di scabrezza secondo la relazione selezionata (Baptiste et al., 2007). Quanto oggetto di elaborazione, invece, corrisponde alla reale frazione di copertura della cella da parte della vegetazione, ottenuta come rapporto fra l'area complessiva degli esemplari presenti in una cella e la superficie di quest'ultima. Tale informazione risulta fondamentale per la determinazione della densità di colonizzazione [$stem/m$] richiesto dalla relazione 5.3, corrispondente al prodotto della densità effettiva in [$stem/m^2$] con il diametro. Calcolando dunque compiutamente i valori di tale parametro sulla base della effettiva copertura della cella, nel file .arl sarà sufficiente impostare una frazione unitaria per applicare all'intera superficie della cella lo specifico valore di densità in grado di restituire il reale numero di esemplari presenti.

5.3.3. **STRUTTURA CONCETTUALE DEL MODELLO**

A partire da tali ipotesi i codici sono stati riadattati al caso in esame, in presenza delle specie Salice e Pioppo, adottando il seguente schema concettuale:

1. Estrazione dai risultati della prima simulazione in assenza di trachytopes, per ogni cella, per ogni timestep simulato, dei valori di:
 - a. Scabrezza del fondo naturale secondo Chezy;
 - b. Tirante idraulico
 - c. Velocità in direzione assiale;
 - d. Velocità in direzione trasversale;
 - e. Coordinate dei centri di ogni cella.
2. Setup di un algoritmo di interpolazione per la trasposizione dei dati da centro cella ai punti mediani dei flowlink;
3. Elaborazione dei dati di portata per ricercare i timestep ecologici in cui viene superata la soglia di attività morfodinamica;
4. Predisposizione dei codici identificativi delle mappe di restart per ciascun timestep ecologico;
5. Estrazione dai file iniziali delle caratteristiche per ogni cella della vegetazione eventualmente già presente all'istante di inizio simulazione;
6. Determinazione dei coefficienti delle leggi di crescita delle caratteristiche di biomassa;
7. Calcolo dell'età della vegetazione già presente tramite confronto dei diametri iniziali con i valori determinati al punto 6 e delle restanti caratteristiche iniziali, ossia altezza, lunghezza radicale, densità e coefficiente di drag;
8. Manipolazione del file di definizione originario *.mdu* e trascrizione dei file *.ttd* e *.arl* propedeutici all'esecuzione della simulazione relativa al primo eco-timestep;
9. Esecuzione della prima simulazione, necessaria all'innescare delle successive elaborazioni;
10. Valutazione per ogni anno e per ogni timestep ecologico di simulazione, delle caratteristiche di biomassa raggiunte, coerentemente con il modello di crescita ipotizzato, in termini di altezza del fusto, diametro, lunghezza radicale, densità e coefficiente di drag;
11. Ordinamento e interpolazione dei dati per la compilazione del file *.ttd*;
12. Aggiornamento del file di definizione *.mdu* per la successiva esecuzione della simulazione contestuale al timestep ecologico esaminato, in termini di istante di inizio e fine simulazione;
13. Estrazione dalla mappa in uscita alla simulazione effettuata dei dati di tirante e velocità;
14. Computazione per il corrente timestep ecologico dei periodi in condizioni *dry* e *flooded* di massima durata, in relazione ad un tirante forfettario di 0.05 m assunto per tenere conto di fenomeni di evaporo-traspirazione e saturazione del suolo;
15. Identificazione delle celle potenzialmente colonizzabili da parte delle singole specie vegetali secondo quanto postulato da Van Oorschot et al. (2016) sulla base delle condizioni idrodinamiche, in termini di valori massimi e minimi temporali di tirante idraulico;
16. Simulazione di un processo randomico di colonizzazione delle celle di cui al punto precedente e predisposizione dei parametri necessari a valutare a fine anno il buon esito della colonizzazione, secondo l'approccio selezionato (Guilloy-Froget et al., 2002);
17. Computazione sulla base delle caratteristiche idrodinamiche e morfodinamiche, delle diminuzioni di frazione di copertura in ogni cella, secondo una legge di mortalità del tipo dose-effetto, associate a fenomeni di:

- a. Sommersione idraulica (*flooding*);
 - b. Sommersione detritica (*burial*);
 - c. Sottoescavazione (*scour*);
 - d. Disseccamento (*desiccation*);
 - e. Sradicamento indotto dalla velocità della corrente (*velocity uprooting*);
 - f. Senescenza.
18. Sovrascrittura dei file *.ttd* e *.arl* con le caratteristiche aggiornate;
 19. Creazione e stampa delle mappe di:
 - a. Variazioni morfologiche del fondo intercorse nel timestep considerato;
 - b. Altezza raggiunta da ciascuna specie al termine del periodo;
 - c. Biomassa complessivamente cresciuta in ciascuna cella;
 - d. Biomassa morta nel timestep considerato per le cause sopra introdotte, ad eccezione della senescenza;
 - e. Biomassa morta per senescenza.
 20. Valutazione dello stanziamento dei semi di cui è stata ipotizzata la dispersione al punto 16 tramite elaborazione dei dati collezionati relativi alle condizioni idrodinamiche della cella nei 30 giorni successivi all'atto di dispersione, il quale corrisponde al giorno di raggiungimento del massimo tirante;
 21. Attribuzione della frazione di copertura delle celle effettivamente colonizzate in misura pari alla frazione associata al primo anno di vita laddove disponibile spazio a sufficienza nella cella o alternativamente la frazione rimanente.
 22. Introduzione nelle celle colonizzate dei dati di biomassa relativi al termine del primo stadio vitale, necessari all'attivazione della crescita della vegetazione;
 23. Esecuzione della simulazione idrodinamica e morfodinamica relativa al timestep ecologico successivo nel caso di periodo morfodinamicamente attivo o copia dei risultati di cui allo step precedente;
 24. Avanzamento al timestep ecologico successivo con reimmissione nei cicli iterativi di cui al punto 10.

Di seguito, in Figura 39 si presenta lo schema concettuale di interazione fra i due software ed in Figura 40 si riporta un diagramma di flusso riassuntivo del funzionamento del modello, con indicazione dei singoli codici in cui le istruzioni sono eseguite. Tale aspetto verrà esaminato con maggior grado di dettaglio nel capitolo successivo.

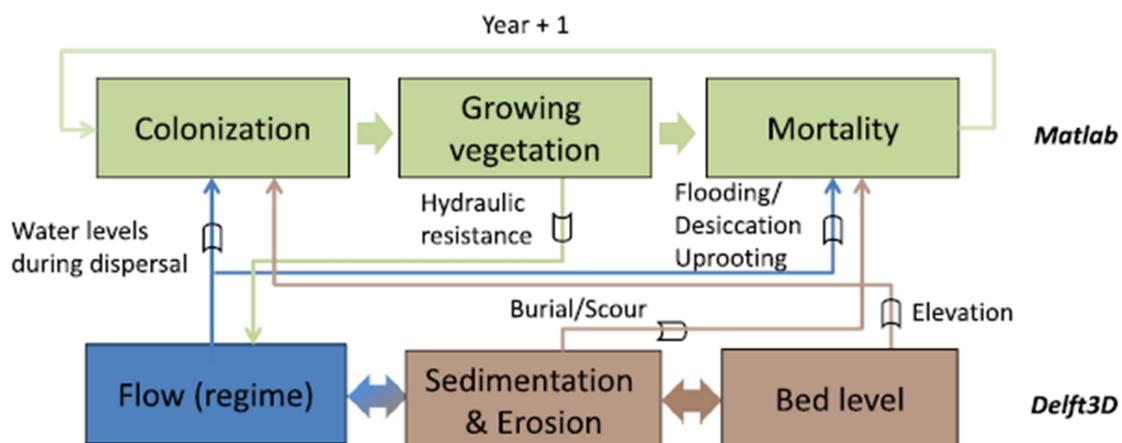
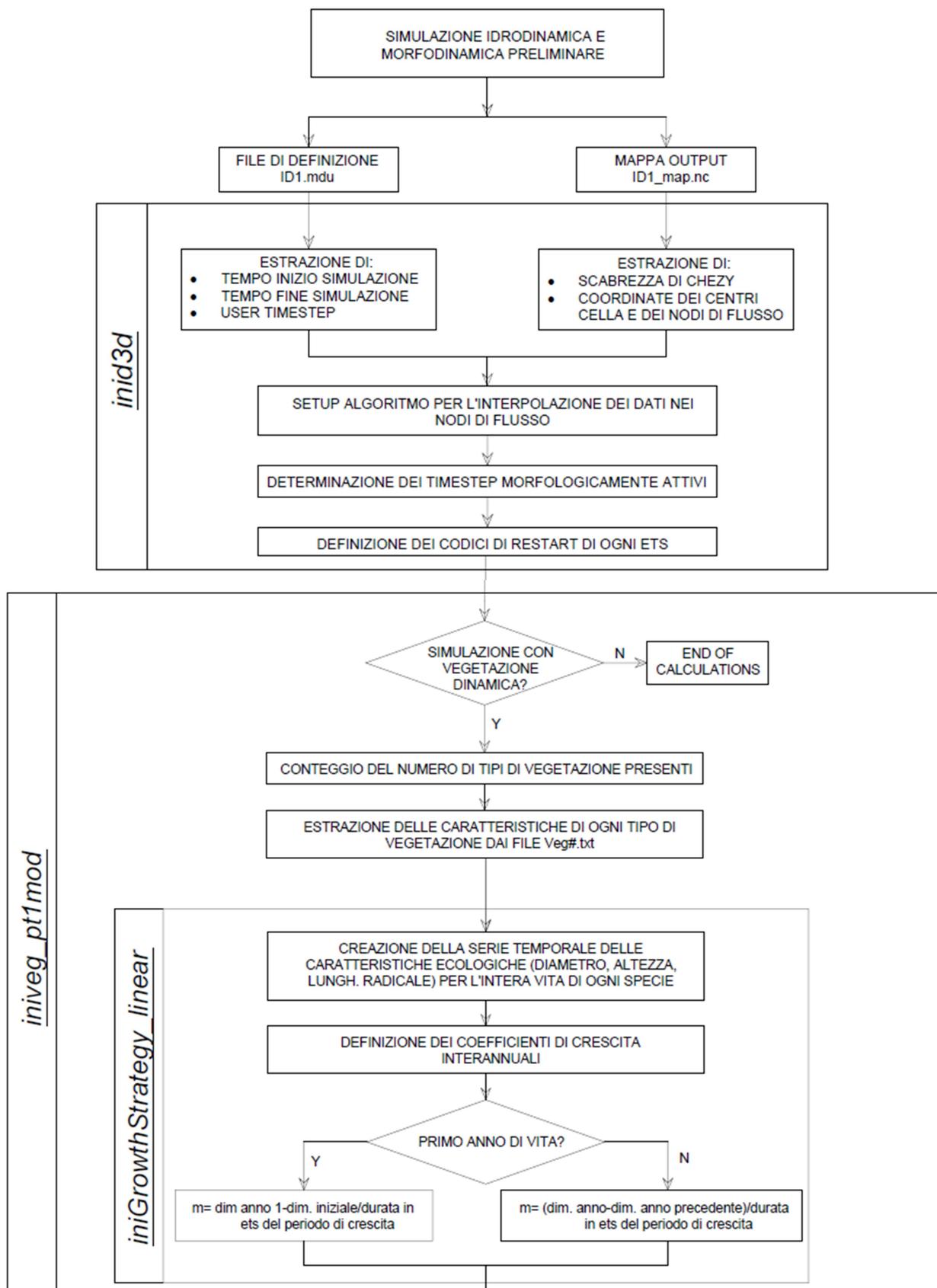
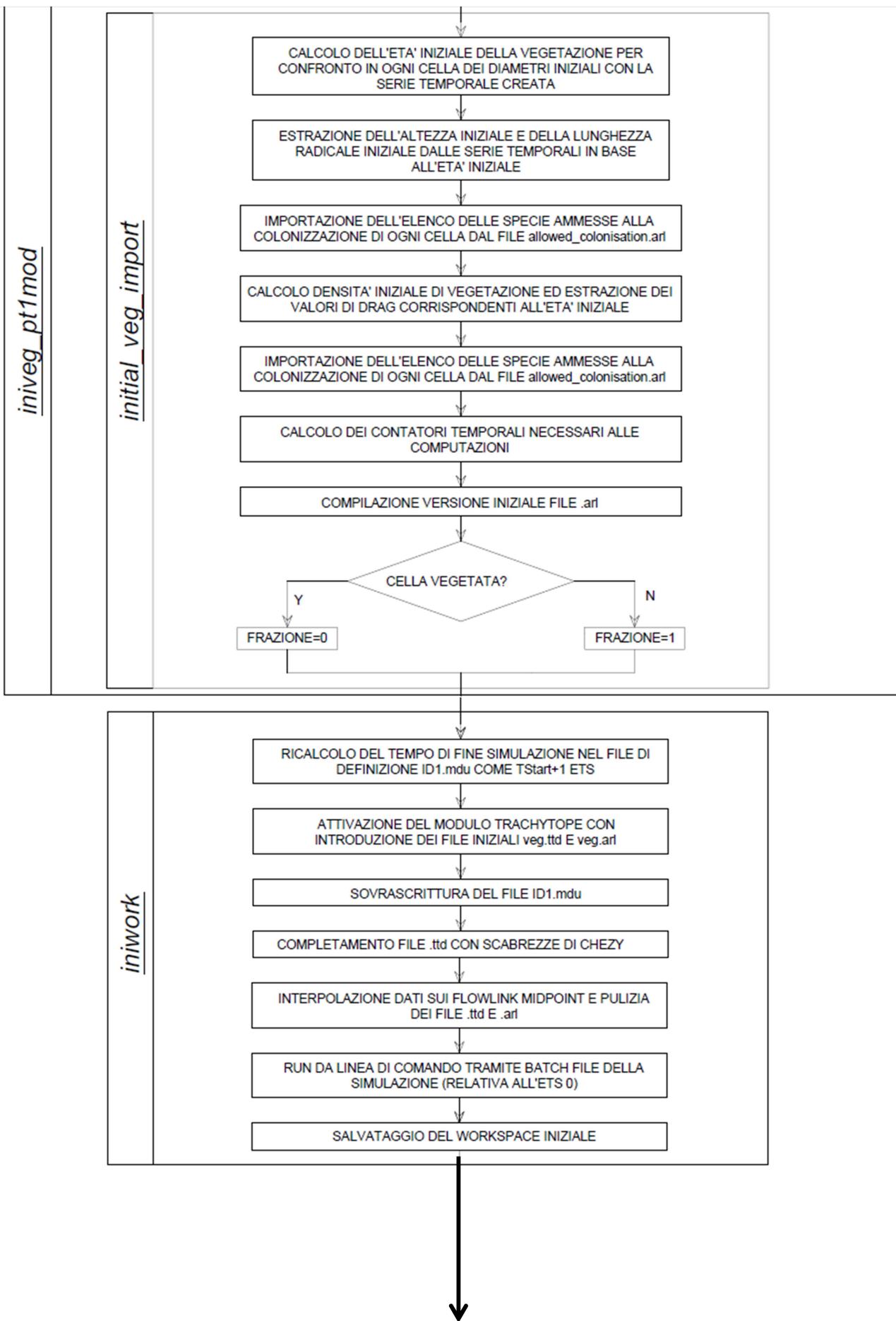
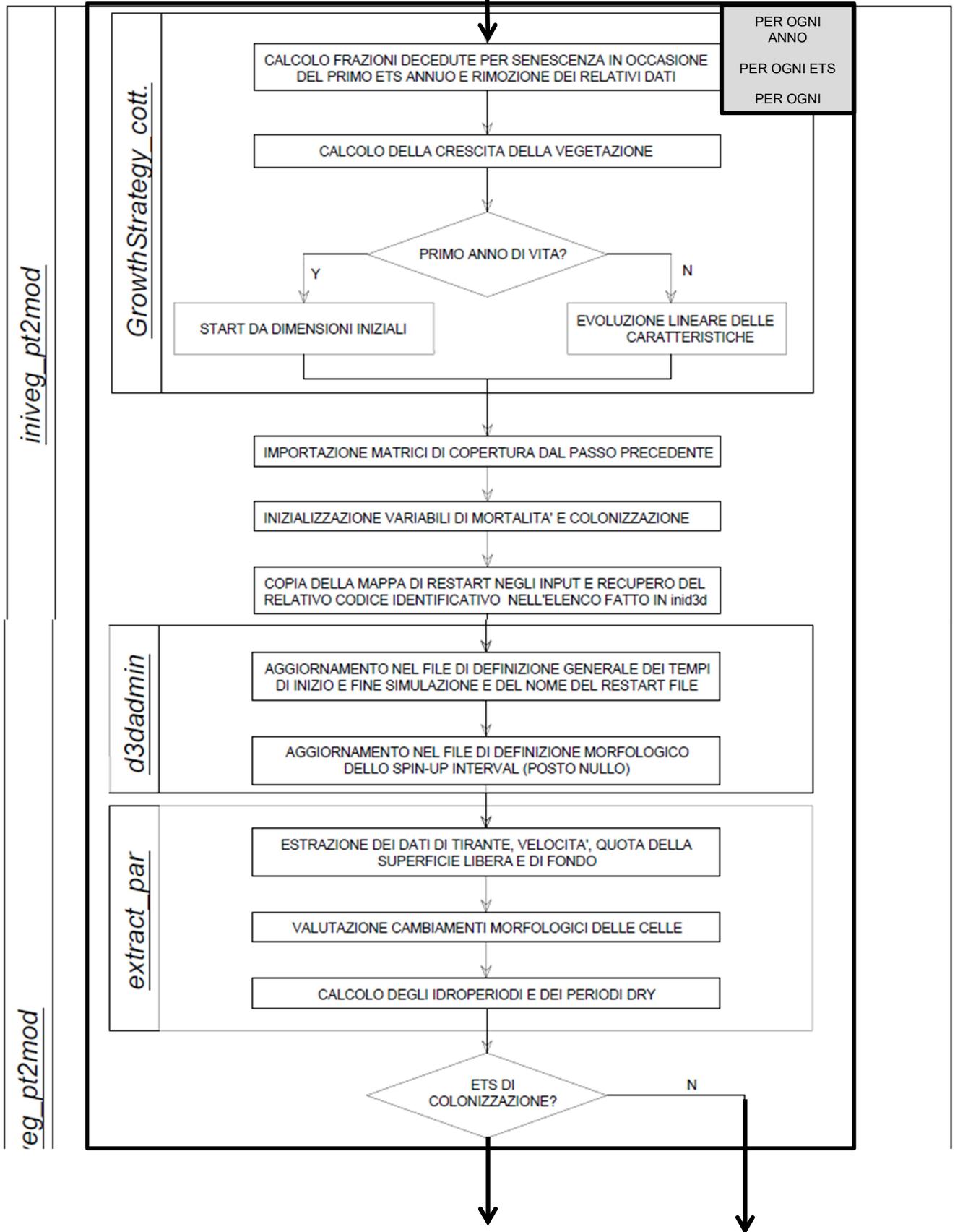


Figura 39 Diagramma di flusso concettuale relativo alla comunicazione fra Matlab e Delft3D (Van Oorschot et al., 2016)

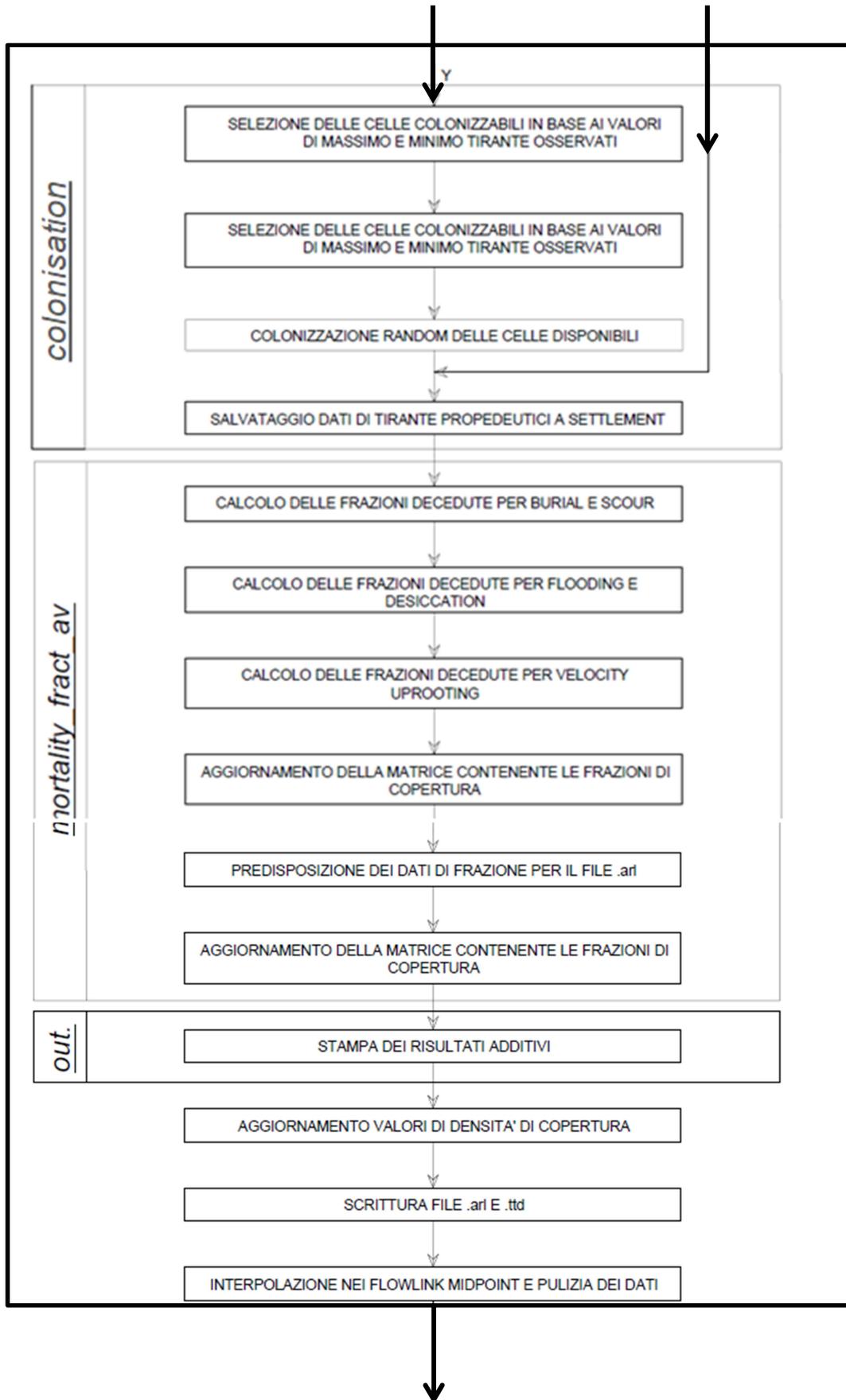






iniv

iniveg_pt2mod



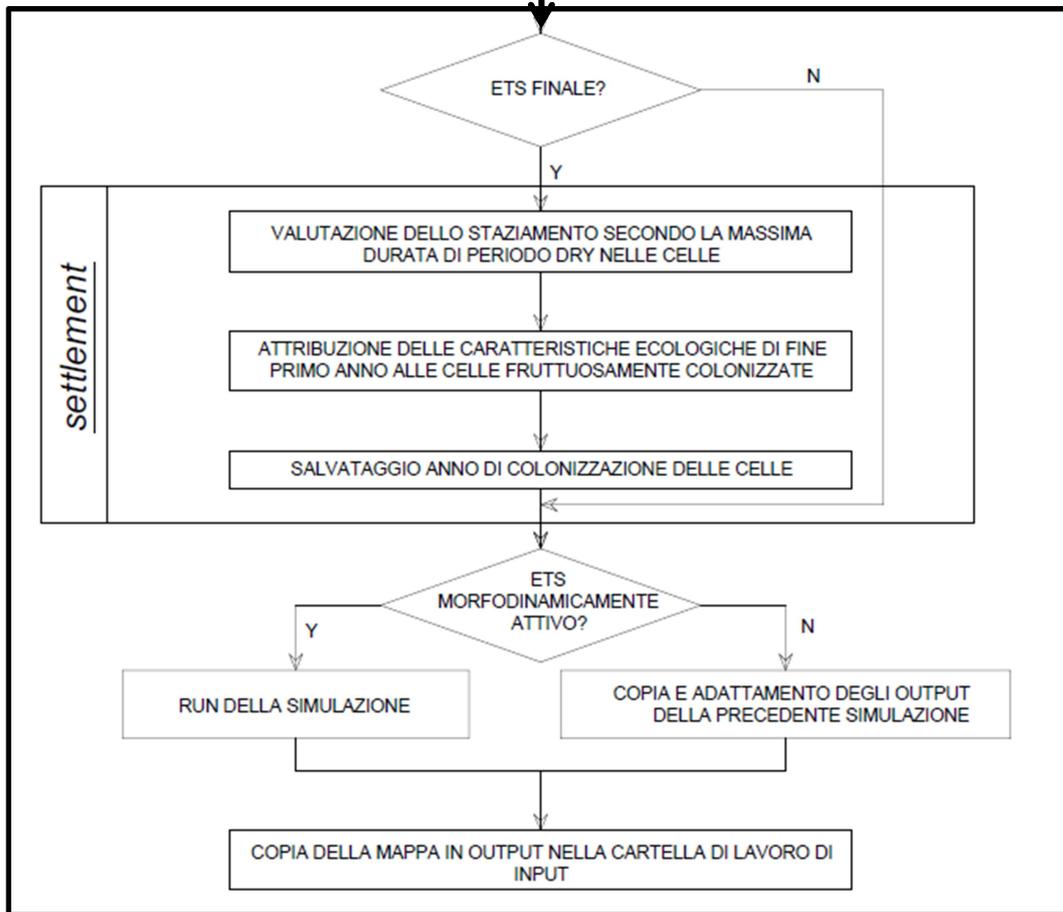


Figura 40 Diagramma di flusso relativo al funzionamento dei codici

6. IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IN MATLAB

Il presente capitolo è focalizzato sulla presentazione e l'analisi esaustiva dei codici Matlab impiegati, con particolare riferimento alle modifiche apportate alla versione originalmente prodotta nel contesto dei lavori di Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020) ed alle leggi ecologiche adottate.

Nella fattispecie, le istruzioni per l'esecuzione della modellazione eco-morfodinamica risultano suddivise in 16 codici separati, ciascuno riconducibile ad un "compartimento" del processo di modellazione, organizzati in una struttura annidata che ne consente il richiamo e la conseguente interconnessione. Di seguito sono elencati i nominativi adottati per ciascuno di essi secondo la gerarchia con cui sono stati organizzati.

- 1) *general_input*
 - a) *Vegetation_model*
 - i) *inid3d_linear*
 - ii) *iniveg_pt1mod*
 - (1) *iniGrowthStrategy_linear*
 - (2) *initial_veg_import*
 - i) *iniwork_linear*
 - ii) *iniveg_pt2mod*
 - (1) *GrowthStrategy_cottonwood_linear*
 - (2) *d3dadmin*
 - (3) *extract_par*
 - (4) *colonisation*
 - (a) *ColonisationStrategyV1sand*
 - (5) *mortality_fract_av*
 - (6) *output_maker*
 - (7) *settlementt*

Rispetto al lavoro di Brückner et al. (2019) sono stati soppressi 3 codici, originariamente designati come *ColonisationStrategyV2mud*, *phyto_calc* e *data_save* relativi rispettivamente al processo di colonizzazione nel caso di specie sensibili al contenuto granulometrico di frazioni fini, identificate come mud, alla simulazione della crescita di eventuali specie di alghe microphytobenthos ed al salvataggio dei risultati nel caso di assenza di vegetazione. Nel presente contesto, date le specie considerate, salici e pioppi, si evince che i primi due aspetti non siano di interesse. Considerando poi gli obiettivi del lavoro, l'ipotesi di assenza di vegetazione è da escludersi del tutto.

Il segmento preesistente *ini_veg* è stato partizionato in due codici, rispettivamente *iniveg_pt1mod* e *iniveg_pt2mod*, vista la necessità di elaborare preliminarmente i dati iniziali per ricavare i dati necessari alla compilazione del primo set di file *.arl* e *.ttf*.

Ulteriore modifica alla configurazione originale è rappresentata dall'introduzione delle porzioni *initial_veg_import*, *iniGrowthStrategy_linear* e *output_maker*, deputate rispettivamente all'estrazione delle caratteristiche della vegetazione già presente, al calcolo dei fattori lineari di crescita delle specie e alla produzione delle mappe aggiuntive di output. A rigore la seconda parte risultava già implementata nella versione originale, tuttavia si è preferito isolarla in una porzione a sé stante. La prima parte, invece, è stata addizionata, in quanto nel contesto originario si ipotizzava di partire da una configurazione glabra di vegetazione.

Le parti *general_input* e *Vegetation_model* svolgono meramente funzioni di definizione preliminare di alcuni parametri, quali ad esempio il numero di specie o il numero di timestep ecologici presenti in un anno e di richiamo delle parti effettivamente funzionali, nel seguito illustrate singolarmente.

6.1. ESTRAZIONE PRELIMINARE DI DATI PER IL SETUP: inid3d linear

Il primo segmento funzionale di codice risulta mirato all'estrazione di informazioni di carattere generale utili per il setup della modellazione, dalla simulazione preliminarmente effettuata e da una coppia di fogli di calcolo. Nella fattispecie, esso è stato ripartito in tre porzioni.

Nella prima, dal file di definizione generale *.mdu* sono estratte le informazioni temporali di inizio simulazione e di timestep adottato per l'aggiornamento delle forzanti esterne e per la compilazione della mappa prodotta in output. Successivamente dal file di definizione morfologico *.mor* sono stati ricavati il fattore di amplificazione dei fenomeni morfologici, utilizzabile per velocizzarne la manifestazione ed amplificare gli effetti, essendo associati a scale temporali nettamente superiori a quelle tipiche dei fenomeni idrodinamici ed il cosiddetto *spin-up interval*, ossia lo sfasamento della partenza dei sopracitati fenomeni rispetto al tempo di inizio simulazione. Nel caso presente, volendo simulare la naturale evoluzione dei processi, il fattore di amplificazione morfologica è sin da subito posto pari ad 1.

Successivamente, la struttura originaria del modello prevedeva la determinazione della durata del timestep ecologico sulla base del numero di anni simulati e sulla durata del periodo considerato, tuttavia, nel presente lavoro si assume per semplicità che esso sia fissato manualmente, sulla base di una serie di criteri, enunciati in seguito nel paragrafo relativo al setup idromorfologico. Al termine del fissaggio si assume altresì di svolgere un controllo della sincronizzazione delle scale temporali, consistente nell'accertamento che il timestep ecologico sia un multiplo intero di quello adottato per l'aggiornamento delle forzanti esterne, nel seguito sinteticamente designato come *User timestep*.

All'interno della seconda parte le coordinate di centri e degli spigoli di cella e dei punti medi dei lati di flusso sono importate dalla mappa in output alla simulazione preliminare, sfruttando le potenzialità Matlab di lettura da file di formato *.nc* attraverso i comandi associati alla libreria *netcdf*.

Tali informazioni risultano utili per l'impostazione dell'algorithmo di interpolazione, innovativo rispetto ai lavori di Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020), dei dati relativi ai centri cella. In particolare esso consiste nella ponderazione dei dati provenienti dalle celle afferenti a ciascun punto medio dei lati di flusso, in seguito designati come *flowlink midpoints*, rispetto all'area di ciascuna cella. In Figura 41 si riporta un estratto del manuale tecnico di D-FlowFM in cui è possibile osservare i nodi, i lati ed i centri delle celle. I *flowlink midpoint* corrispondono ai punti medi dei segmenti congiungenti due centri cella.



Figura 41 Punti notevoli delle celle costituenti la mesh di calcolo in D-FlowFM (D-FlowFM User Manual, 2021)

In base a tale schema dunque in primo luogo si è proceduto con la ricerca delle celle confinanti con ciascun *flowlink midpoint*. Per fare ciò per ciascuna cella sono state calcolate le coordinate dei punti medi di ciascun lato e successivamente sono state poste a confronto con quelle dei sopraccitati punti medi dei lati di flusso, ricavando in definitiva per ciascuno di questi ultimi l'elenco degli identificativi delle celle confinanti. Ottenute tali informazioni è stato anche possibile recuperare le aree delle celle di interesse, così da disporre immediatamente di tutti i dati necessari all'esecuzione dell'interpolazione. Il procedimento vero e proprio è stato poi racchiuso in una funzione al fine di renderne possibile l'esecuzione nelle diverse porzioni di codice in cui i file oggetto di tale elaborazione sono progressivamente prodotti.

Infine, nel terzo segmento del codice viene effettuata l'elaborazione dei dati di portata finalizzata alla ricerca dei periodi ecologici con portate superiori alla soglia di attivazione dei fenomeni di trasporto solido di cui al Paragrafo 4.4. Tale passaggio risulta motivato dalla scelta, per ragioni di ottimizzazione computazionale, di non effettuare la simulazione per quelli in cui le portate siano insufficienti ad attivare i processi morfodinamici, ivi riprendendo esclusivamente i risultati dell'ultimo periodo simulato. Il controllo, quindi, è stato eseguito a partire da due fogli di calcolo, il primo contenente la serie giornaliera delle portate del periodo da simulare ed il secondo contenente le date di inizio e fine di ciascun periodo ecologico identificato all'interno della sopraccitata finestra temporale. Tali informazioni, inoltre sono state elaborate al fine di ricavare per ciascun timestep ecologico il codice numerico del file di restart necessario all'esecuzione della contestuale simulazione. Questo poiché nella stampa della mappa di restart il software D-FlowFM impiega una codifica del tipo "*NomeModello_YYYYMMDD_hhmmss_rst.nc*" ove YYYYMMDD è il codice numerico indicante la data cui fa riferimento il file, che nel caso del giorno 26/02/2019 risulterebbe 20190226, e hhmmss l'analogo relativo al minutaggio, che nel caso di ore 00:00:00 risulterebbe dunque 000000. Come già anticipato al Paragrafo 5.1 l'impiego di tali file risulta necessario nel caso di esecuzione di una sequenza di simulazioni separate, in quanto consente il ricollegamento di ciascuna di esse con le precedenti, essendo null'altro che un file mappa relativo ad un determinato istante temporale, nel caso presente fatto coincidere con il termine di ciascun timestep ecologico, contenente tutte le informazioni di tirante, quota del fondo, velocità e trasporto solido.

Conseguentemente, per ciascun periodo ecologico sorge la necessità di recuperare la mappa prodotta al passo precedente e designata con la specifica sigla sopra descritta e dunque di ricavare il sopraccitato codice numerico.

6.2. COMPUTAZIONI ECOLOGICHE PRELIMINARI: iniveg_pt1mod

Preliminarmente all'esecuzione della prima simulazione, viene eseguita una porzione di codice deputata alla predisposizione dei coefficienti inter-annuali di crescita per le differenti caratteristiche e all'elaborazione dei dati iniziali di vegetazione. Tali operazioni vengono effettuate rispettivamente nelle porzioni *iniGrowthStrategy_linear* e *initial_veg_import* richiamati all'interno del presente codice. Ivi, vengono inoltre estratte dai file di testo inizialmente forniti le caratteristiche generali e specifiche per i vari stadi vitali delle specie considerate. Tali informazioni sono basilari per il segmento di simulazione di crescita, in quanto sono quelle relative alla ripartizione annua fra periodi statici e di crescita ed alle dimensioni iniziali da attribuire nel caso di primo anno di vita della vegetazione.

6.3. CALCOLO DEI FATTORI DI CRESCITA: iniGrowthStrategy linear

In primo luogo è stato impostato, come già anticipato, un codice isolato per la determinazione dei fattori lineari di crescita inter-annuale, contestuali alle leggi prescelte precedentemente evidenziate. Tale scelta è stata motivata dalla necessità di ricostruire una linea temporale di crescita delle specie da confrontare con le dimensioni fornite in input di modo da ricavare l'età iniziale degli esemplari. In particolare, dunque, in primo luogo per ogni anno di vita a partire dal secondo sono state stimate le dimensioni raggiunte applicando le leggi ipotizzate e i corrispondenti incrementi come differenza fra quanto appena determinato e le dimensioni al passo precedente. Si precisa che per quanto riguarda il primo anno di crescita il diametro raggiunto da ciascuna specie è stato posto pari a 0.015 m, inferiore al valore minimo ricavato dal rilievo LiDAR della zona, corrispondente a 0.1320 m per entrambe le specie. L'altezza è quindi stata stimata di conseguenza secondo la legge allometrica. Nel caso delle radici si è optato per un valore fisso di 0.60 m, corrispondente alla tipica lunghezza radicale osservata al termine del primo anno di vita delle specie riparie prolificamente stanziante (Mahooney & Rood, 1998) Gli incrementi associati al primo anno sono stati inoltre ricavati deducendo ai valori di cui sopra quelli supposti da Van Oorschot et al. (2006) per l'inizio vita raccolti in Tabella 8.

Riprendendo dunque quanto fatto da Brückner et al (2019) e Brückner et al (2020), il processo di determinazione è stato strutturato in un ciclo iterativo all'interno del quale il calcolo viene eseguito per ciascun stadio vitale e per ciascun anno all'interno di esso come rapporto fra la variazione di dimensione riconducibile a tale anno e durata del periodo di crescita in termini di numero di timestep ecologici. In tal modo è stato possibile ottenere dei coefficienti di crescita in termini di metri di crescita per eco-timestep. Per quanto attiene i periodi di crescita, si è assunto che le parti sopra suolo ossia fusto e diametro crescano in una finestra temporale compresa fra i mesi di Marzo e Settembre. Nel caso delle porzioni sottosuolo ossia le radici si è ipotizzato un periodo di crescita compreso fra i mesi di Marzo e Ottobre.

6.4. ESTRAZIONE DELLE CARATTERISTICHE INIZIALI: initial veg import

L'ipotesi di vegetazione già presente all'esecuzione della simulazione ha creato la necessità di integrare il codice con una sezione dedicata all'estrazione delle informazioni dai file forniti in input dello stato iniziale della vegetazione, al fine di introdurre tali condizioni iniziali all'interno delle variabili ecologiche.

In particolare, considerando di disporre come da ipotesi di modello delle informazioni per ciascuna cella di frazione di copertura e diametro per ciascuna specie, l'età iniziale è stata stimata tramite confronto dei valori di quest'ultimo con la serie temporale ricavata nel codice precedente e valutazione della posizione che minimizza lo scarto. A partire dell'età, potenzialmente diversa per ognuna di esse, della vegetazione, sono state recuperate le restanti informazioni ecologiche quali altezza e lunghezza radiale ed è stato impostato un algoritmo in grado di ricavare il relativo numero di timestep ecologici trascorsi a partire da inizio vita, corrispondente alla posizione all'interno delle variabili ecologiche. Nella fattispecie, considerando una specie con 1 anno di età, considerando di partire dal primo timestep ecologico dell'anno e che quest'ultimo sia costituito da 26 periodi, le informazioni iniziali saranno allocate alla posizione 26. Nel caso in cui il timestep di partenza sia successivo al primo, per esempio sia il quinto, le informazioni di cui all'esempio precedente sono stoccate alla posizione 30 corrispondente ad un avanzamento nel tempo di 4 timestep ecologici rispetto ad inizio anno.

Sulla base del file "*allowed_colonisation.ar1*" inoltre è stato stilato, per ogni tipo di vegetazione, un elenco delle celle in cui il relativo stanziamento è disponibile, di modo da concentrare le

successive computazioni ecologiche solo alle celle effettivamente di interesse risparmiando tempo computazionale.

Secondo tale approccio, quindi, sono stati compilati i valori iniziali di altezza, diametro, lunghezza delle radici e densità di ciascuna specie di vegetazione e sono stati compilati i file *.arl* e *.ttf* necessari all'esecuzione della prima simulazione. Per quanto riguarda il file *.arl*, laddove la cella risultasse occupata da una specie di vegetazione è stato prescritto come già anticipato, una frazione unitaria. Nel caso in cui fossero compresenti più specie, nel caso presente 2, la frazione è stata equamente suddivisa fra le specie per rispettare il requisito di non esubero del valore unitario in ciascuna cella.

6.5. **ESECUZIONE DELLA PRIMA SIMULAZIONE: iniwork linear**

Il quarto segmento è deputato al setup ed all'esecuzione della prima simulazione in accordo con quanto sviluppato da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020). Questo perché l'algoritmo è stato strutturato per eseguire ad ogni timestep ecologico il processing dei risultati della simulazione effettuata al passo precedente che copre la finestra temporale associata al corrente periodo e successivamente eseguire quella successiva.

Conseguentemente si rende necessario eseguire preliminarmente la simulazione del primo periodo così da innescare il ciclo di calcolo. A tale passo viene associato un valore dell'indice che scorre i timestep ecologici pari al primo della serie minorato di uno, nel caso di partenza da inizio anno risulterebbe ad esempio $1-1=0$, in quanto si fa riferimento allo schema concettuale riportato in Figura 42.

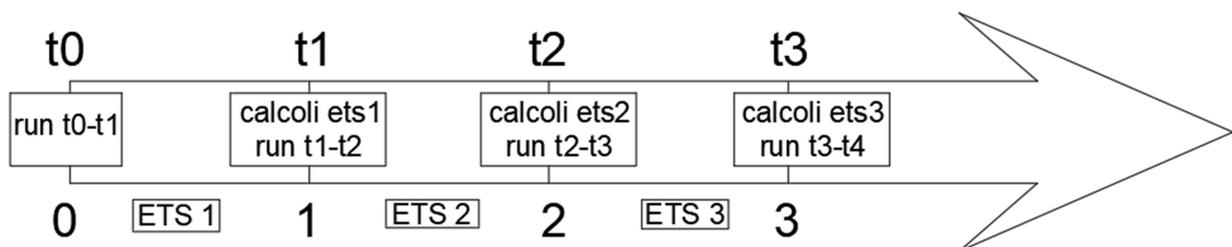


Figura 42 Schema concettuale di funzionamento del ciclo di calcolo

Si sottolinea per chiarezza che la numerazione dei timestep ecologici adottata nei cicli iterativi di cui ai codici successivi faccia riferimento alle estremità dei periodi piuttosto che ai periodi stessi, per cui risulta corretto eseguire all'iterazione corrente la simulazione associata al passo ecologico successivo, in quanto i relativi file di input devono essere prodotti nell'istante considerato.

In seguito, si procede all'adattamento del file di definizione generale della preliminare simulazione apportando le seguenti modifiche:

- Sovrascrittura eventuale del tempo di inizio simulazione, teoricamente immutato rispetto a quella precedentemente effettuata;
- Imposizione del tempo di fine simulazione pari al tempo di inizio maggiorato della durata in secondi del timestep ecologico;
- Attivazione del pannello *trachytopo* relativo alle resistenze di fondo;

- Inserimento dei nominativi dei file *.arl* e *.ttd* necessari al funzionamento del sopradetto pannello;
- Fissaggio del tempo di aggiornamento delle caratteristiche di resistenza *trachytope* pari allo *User timestep*.

Si assume che i file *.arl* e *.ttd* abbiano sempre la designazione rispettivamente “*veg.arl*” e “*veg.ttd*” e che siano di volta in volta sostituiti con quelli contestuali al periodo considerato. In particolare, in questo segmento essi corrispondono ai file iniziali ricavati al passo precedente previo inserimento dei valori di scabrezza di Chezy in output alla simulazione preliminare nel file *.ttd* ed interpolazione dei dati nei *flowlink midpoint*, come già anticipato al Paragrafo 5.4.1. In aggiunta a questo passaggio si assume di effettuare un’ulteriore elaborazione di tali file in quanto il buon esito del loro recepimento da parte di D-FlowFM risulta particolarmente influenzato da sintassi e formalismo (Delft3D Flexible Mesh Suite-Release notes, 2019). In particolare è stata sviluppata una funzione deputata all’eliminazione delle righe associate alternativamente a frazioni di copertura, altezze, densità di vegetazione e scabrezze di fondo nulle, inizialmente mantenute sulla base delle ipotesi di modello precedentemente introdotte. Tale revisione dei file inoltre implica la necessità di riaggiornare gli identificativi dei *trachytope* delle celle rimaste, in modo tale da mantenere una serie continua a partire dal valore unitario. Infine, per le celle a copertura totale da parte della vegetazione il valore è stato forzato ad essere 1, a fronte di un possibile 1.00.

Si precisa inoltre che per quanto riguarda l’interpolazione dei dati nei *flowlink midpoint*, sono stati impiegati due algoritmi distinti per il file *.arl* e *.ttd*. In particolare, nel primo caso le frazioni risultanti sono state ricavate come media dei valori associati alle celle afferenti, mentre per quanto riguarda i dati raccolti nel file *.ttd*, per evitare eccessive sottostime sono stati attribuiti i massimi valori fra quelli delle celle di interesse. Questo perché, ponendo ad esempio il caso di un nodo collegato a due celle, in cui una è coperta al 100% da vegetazione e l’altra è glabra, la frazione di area sottesa al *flowlink* a cui si deve applicare l’incremento di scabrezza risulta effettivamente il 50% ma l’altezza, la densità e il drag da adoperare non corrispondono alla metà di quelli della prima cella, bensì sono gli stessi.

Al termine di tali elaborazioni viene effettuata la simulazione tramite richiamo della linea di comando del sistema operativo e somministrazione ad essa di un file applicativo del tipo *.bat* (D-Flow Flexible Mesh User Manual, 2021). Esso contiene l’istruzione per il sistema stesso di apertura tramite l’applicazione del pacchetto Delft3D deputata al run dei file di configurazione *.dimr* di quello creato per il presente lavoro. In particolare, quest’ultimo deve essere creato all’atto del salvataggio della simulazione preliminare tramite apposito comando all’interno dell’interfaccia grafica di D-FlowFM e consente l’esecuzione da linea di comando di simulazioni con morfologia attivata, come nel caso presente, che alternativamente non sarebbero risolvibili tramite salvataggio del solo file di definizione generale.

6.6. CALCOLI DI CRESCITA : GrowthStrategy cottonwood linear

Il calcolo della crescita dei parametri ecologici viene effettuato per ciascuna iterazione dei cicli che scorrono rispettivamente i tipi di vegetazione considerati, gli anni da simulare ed i periodi ecologici entro ciascun anno. In particolare, sfruttando un'allocazione delle variabili di altezza, diametro, lunghezza radicale e densità di tipo sequenziale secondo un contatore degli ecotimestep complessivamente vivibili per ciascuna specie, è stato possibile snellire la struttura originaria del codice. Inoltre, come già anticipato, quest'ultima è stata adattata all'ipotesi di estensione a tutte le celle del dominio dell'algoritmo, inizialmente sviluppato indipendentemente da tale aspetto, in ragione dell'ipotesi di assenza iniziale di vegetazione e di conseguente partenza per tutte le celle da una condizione comune di altezza, diametro e lunghezza radicale.

In primo luogo, dunque è stata istituita una sezione dedicata alla ricerca della posizione del passo correntemente eseguito all'interno della serie progressiva di periodi ecologici ed all'interno della vita della specie, in termini di stadio vitale e anno di appartenenza del passo esaminato. Tale procedimento ricalca quanto eseguito nella fase di estrazione delle caratteristiche iniziali della vegetazione in quanto consiste anch'esso in una ricerca della posizione di appartenenza nel "quadro" temporale della specie e per tale motivo potrebbe apparire superfluo. Tuttavia, esso risulta imprescindibile in quanto considerando come nel presente lavoro la possibile presenza di vegetazione già precedentemente sviluppata, il valore assunto dal contatore che avanza attraverso gli anni di simulazione non coincide con gli anni di vita della stessa vegetazione e dunque si rende necessario rivalutare ad ogni iterazione, per ogni cella, l'età complessivamente raggiunta e il relativo stadio vitale.

La sezione successiva, comune ai lavori di Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020), prevede il calcolo cella per cella delle dimensioni raggiunte nel caso di anno di vita successivo secondo il seguente schema concettuale:

- Recuperare il valore relativo al timestep ecologico precedente per i periodi antecedenti l'inizio della crescita, corrispondente quindi a quello ricavato al termine dell'anno precedente;
- Maggiorare il valore al passo precedente con il fattore di crescita lineare associato al relativo stadio vitale e al relativo anno per la stagione di crescita;
- Propagare il valore ultimo ottenuto nella stagione di crescita per i periodi ecologici successivi ad essa.

Si precisa che, a differenza del lavoro originario la parte relativa al primo anno di vita risulta inattiva, in quanto risulterebbe valevole solo per le celle soggette ad una colonizzazione, ma data la struttura del processo stesso, l'attribuzione di uno stato colonizzato avviene solo a fine anno ed in tale contesto si fissa direttamente il raggiungimento da parte dei nuovi esemplari delle dimensioni al termine del primo anno di vita. Conseguentemente, il processo di crescita interno al primo anno viene trascurato.

In tale fase di calcolo sono stati anche estratti i valori di coefficiente di drag, recuperando ad ogni iterazione il valore associato allo stadio vitale di riferimento e quelli di densità da impiegare nella formula di scabrezza (Baptist et al., 2007) definita come rapporto fra la frazione di copertura effettiva e l'area di uno stelo, ricavata supponendo un fusto circolare con diametro pari a quello contestualmente ricavato, moltiplicata per il diametro stesso.

Al termine della fase di compilazione delle variabili di cui sopra, predisposte per l'intera durata della vita degli esemplari, da esse sono state estratte all'interno di una variabile separata le

informazioni appena introdotte, in modo tale da disporre immediatamente delle dimensioni da associare alla corrente iterazione e conseguentemente da inserire nei file *.arl* e *.ttd*.

6.7. SETUP PER LA SIMULAZIONE SUCCESSIVA: d3dadmin

Una volta completate le computazioni legate alla crescita della vegetazione si procede all'approntamento di file di definizione generale e morfologica per l'esecuzione della simulazione associata al passo considerato. In particolare, riprendendo quanto fatto da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020), si procede alla ricompilazione dei campi associati ai tempi di inizio e fine simulazione, fissati in modo da assicurare la continuità con il periodo precedente ed una durata pari a quella del timestep ecologico.

In merito alla continuità, inoltre, si provvede all'aggiornamento del nominativo del file di restart da impiegare e dell'istante temporale in cui somministrarlo. Nella fattispecie, come già introdotto al paragrafo 6.1., l'identificativo del file di restart è definito univocamente tramite il relativo tempo di produzione e per ciascun timestep ecologico il nominativo di riferimento è stato ricavato nella suddetta porzione di codice. L'istante di inserimento del file in D-FlowFM viene indicato come data e ora di inizio simulazione, espresse rispettivamente nel formato YYYYMMDD e hhmmss.

Per quanto concerne il file di definizione morfodinamico, gli adattamenti sono applicati al fattore di amplificazione dei fenomeni, mantenuto sempre pari al valore inizialmente ipotizzato, e allo *spin-up interval*, posto pari a 0 trattandosi di simulazioni successive alla prima.

6.8. ESTRAZIONE DEI DATI DALLA SIMULAZIONE PRECEDENTE: extract par

Per procedere ai successivi calcoli di colonizzazione e mortalità si rende necessaria l'estrazione delle informazioni di tipo idraulico e morfologico dalla simulazione relativa al corrente timestep ecologico, condotta quindi come già argomentato al passo precedente. Ricalcando quanto fatto da Brückner et al. (2019) e Brückner et al. (2020), dunque, è stato predisposto un codice in grado di estrarre dal file mappa la serie per ogni cella e per ogni timestep utente simulato, dei dati di quota della superficie libera, tirante, componenti di velocità e quota del fondo, ricavando da quest'ultima la variazione complessiva di quota di fondo come differenza fra i valori relativi rispettivamente agli istanti finali ed iniziali del periodo simulato.

Da tale informazione sono stati isolati gli identificativi delle celle che hanno subito escavazione o *scour*, quelle per le quali la variazione risulta negativa, e viceversa quelle che hanno subito deposizione o *burial*. Nelle successive fasi, dal confronto delle entità di tali variazioni con la lunghezza delle radici nel primo caso e l'altezza del fusto nel secondo è possibile valutare l'insorgenza di fenomeni di sradicamento o seppellimento della vegetazione.

Per quanto attiene i processi di mortalità associati a sommersione idraulica e disseccamento sono state computate le massime durate dei relativi periodi come segue. In primo luogo, le due condizioni sono state distinte tramite confronto del tirante idraulico con un valore soglia di poco superiore a 0 per tenere in conto gli aspetti di saturazione del suolo e di evaporo-traspirazione, designando come *flooded* i punti in cui si osserva il superamento e *dry* viceversa.

Originalmente rispetto al lavoro di Brückner et al (2019) e Brückner et al. (2020), è stato sviluppato un algoritmo mirato alla ricerca ed al conteggio cella per cella dei giorni consecutivi in cui si sperimentano condizioni di *flooding* o *desiccation*. Questo perché la sezione inizialmente deputata a tale funzione non teneva traccia della consecutività dei giorni, facendone solo un computo complessivo. Conseguentemente, è stata creata una parte in cui per il corrente timestep ecologico viene allocata la durata di tutti i periodi al suo interno di *flooding* e *desiccation*, tenendo in conto

dell'eventuale perdurare di una condizione instaurata nei timestep precedenti. Nella fattispecie di tale evenienza, per comodità illustrativa supposta essere un periodo di sommersione, la durata complessiva di tale condizione è stata stimata come somma del numero di giorni consecutivi a partire dall'inizio del periodo ecologico in cui si è ancora osservato *flooding* e del numero di giorni registrati nel timestep precedente. Per maggiore chiarezza, di seguito in Tabella 13 si propone un sintetico esempio.

Tabella 13 Esempio di funzionamento dell'algoritmo di calcolo dei periodi flood/dry

ETS 2					ETS 3				
Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5	Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
D	D	F	F	D	D	F	D	F	F

	Durata periodi dry/flood			
ETS 2	-2	2	-1	
ETS 3	-2	1	-1	2

D= dry	(-) dry
F= flood	(+) flood

6.9. **SIMULAZIONE DELLA COLONIZZAZIONE: colonisation**

Il processo di colonizzazione è simulato ricercando in primo luogo le celle colonizzabili, che come già anticipato, corrispondono a quelle in cui quel predefinito tipo di vegetazione non è ancora presente ed è stato registrato nel corso del timestep un tirante massimo superiore alla soglia di 0.05 m antecedente ad un tirante minimo inferiore a tale soglia. Il requisito di assenza del medesimo tipo di vegetazione nella cella, nasce dal fatto che per ipotesi di modello ogni cella è una regione a caratteristiche ecologiche omogenee, da cui non è in primis coerente e in secondo luogo fattibile tenere traccia in una stessa cella di esemplari di una stessa specie con dimensioni ed età radicalmente diverse.

Una volta evidenziate le celle colonizzabili fra esse ne sono state prescelte un numero arbitrario secondo un approccio di estrazione randomica. Si precisa che a rigore tali istruzioni sono state eseguite nel contesto del codice *ColonisationStrategyV1sand*, richiamato da *colonisation* e sono state eseguite solo all'occorrenza dei timestep ecologici appartenenti al periodo di riproduzione.

Gli indici delle celle in cui si è simulata la dispersione dei semi sono allocate in una struttura contenente per ognuno di essi una serie di altri parametri necessari alla successiva elaborazione effettuata in *settlement* per valutare l'effettivo attecchimento dei germogli, quali giorno corrispondente alla deposizione, indice dei timestep ecologici di interesse (il corrente ed i due successivi, vista la necessità di conoscere dati per i successivi 30 giorni) e dati di tirante idrico. Queste ultime informazioni vengono estratte da una porzione del presente codice, che viene eseguita nei timestep ecologici di riproduzione e in un numero di periodi successivi precisato, nel caso presente 2, in modo da completare il set di dati dei 30 giorni successivi alla deposizione anche nel caso di semi depositi nell'ultimo timestep riproduttivo.

6.10. SIMULAZIONE DELL'ADATTAMENTO: settlement

Il positivo stanziamento dei semi dispersi nelle fasi di colonizzazione viene valutato a fine anno nella presente porzione di codice. In particolare, si effettua un procedimento per la valutazione per ciascun timestep di riproduzione, per ognuna delle celle in cui si è ipotizzata la dispersione, del numero massimo di giorni consecutivi in condizioni dry nel mese successivo alla deposizione. Confrontando tale valore con la soglia di 7 giorni (Guilloy-Froget et al., 2002) sono state isolate le celle in cui i germogli sono in grado di sopravvivere per ciascun periodo di riproduzione. Si sottolinea come sia possibile che una medesima cella sia colonizzata più volte nel corso dello stesso anno, ma che tale aspetto non costituisca un problema in quanto, i risultati associati a ciascun timestep riproduttivo vengono assemblati in modo tale da considerare stanziata la vegetazione quando la procedura di cui sopra ha esito positivo almeno una volta, indipendentemente da eventuali colonizzazioni plurime.

Riprendendo quanto fatto da Brückner et al (2019) e Brückner et al (2020), lo stanziamento è stato effettivamente simulato tramite un aggiornamento della frazione di copertura. In particolare per ciascuna cella è valutata la frazione attuale di copertura ad opera di tutte le specie (nel caso delle celle colonizzate per ipotesi la frazione della specie stessa è nulla) ed è confrontata con la frazione inizialmente necessaria allo stanziamento di quel tipo di vegetazione. Tale valore è stato determinato come la frazione associata alle celle che originariamente ospitavano gli esemplari di dimensione minima. Successivamente, calcolando la frazione disponibile come complemento a uno di quella occupata e confrontandola con quella necessaria sono state identificati due possibili scenari. Nel primo, in cui la quota disponibile è superiore alla frazione iniziale, è stata attribuita quest'ultima. Viceversa, laddove lo spazio non risulti sufficiente, si attribuisce l'intera frazione ancora libera.

Infine, è stata addizionata una porzione per la sovrascrittura dell'età iniziale della vegetazione laddove stanziata e per la compilazione delle variabili ecologiche di diametro, lunghezza radicale e altezza con i dati relativi al termine del primo anno, come già anticipato, nella posizione ottenuta dalla nuova età iniziale.

6.11. COMPUTO DELLA MORTALITA': mortality fract av

L'ultimo segmento funzionale del codice è stato riservato alla stima dei fenomeni di mortalità e al conseguente aggiornamento delle frazioni di copertura vegetale, valutando per ciascuna delle cause previste, l'insorgenza ed il relativo impatto in termini di perdita percentuale. Anche la presente parte è inserita all'interno dei cicli iterativi che propagano sui differenti tipi di vegetazione e nel tempo.

Nella fattispecie, si prevede nel caso di sommersione detritica o *burial* e sottoescavazione che tali condizioni si verifichino qualora rispettivamente l'altezza del fusto sia inferiore allo spessore del deposito e la lunghezza radicale sia inferiore alla profondità di scavo. Ad entrambe le condizioni, analogamente a quanto fatto nel lavoro di riferimento, si associa la morte di tutta la frazione presente.

Per quanto attiene le altre cause, la percentuale deceduta viene stimata come già anticipato secondo una legge dose-effetto caratterizzata da un valore soglia al di sotto del quale non si registra mortalità ed una crescita lineare secondo una predefinita pendenza. Nel prospetto di Tabella 8 sono raccolti tutti i valori necessari all'implementazione di tale relazione per le differenti cause previste. Per quanto riguarda sommersione idraulica e disseccamento si precisa che i risultati di idroperiodo e periodo dry ottenuti nella fase di estrazione dei dati sono stati in parte modificati per evitare un'erronea stima delle mortalità. In particolare, nel caso in cui ad esempio un

idroperiodo abbia durata 30 giorni, di cui 20 associati a timestep precedenti con una soglia inferiore a 20, se si stimasse la frazione ulteriormente deceduta rispetto all'ultimo periodo utilizzando il valore di 30 giorni si commetterebbe una sovrastima. Per tale motivo dunque, nel caso di continuazione attraverso differenti periodi di una fase di *flooding/drying* che già ai passi precedenti aveva una durata sufficiente ad attivare la mortalità, la frazione complessivamente deceduta viene stimata in riferimento alla frazione iniziale registrata prima dell'attivazione del fenomeno di mortalità ed alla durata complessiva. Confrontando poi tale valore con la frazione corrente è possibile determinare la quota ulteriormente deceduta. Tale discriminazione si rende necessaria in quanto si assume che il processo di aggiornamento delle frazioni sia una somma incrementale di quanto ottenuto in timestep successivi e non una sovrascrittura.

Al termine del computo delle frazioni superstiti è prevista la compilazione della matrice contenente per ciascun tipo di vegetazione le frazioni presenti ad ogni timestep ecologico propedeutica alla successiva compilazione del file *.arl*.

6.12. STAMPA DELLE MAPPE ECOLOGICHE: output maker

Contestualmente a ciascun periodo ecologico è stato prevista l'aggiunta di un segmento di codice deputato alla stampa di una serie di output non producibili dal simulatore. Nella fattispecie si tratta delle mappe relative a:

- Profondità di *burial* e *scour* riscontrate al termine di ciascun timestep;
- Altezza di ciascuna delle due specie al termine dell'ETS;
- Biomassa cresciuta nel periodo per ogni specie secondo la relazione 5.8;
- Biomassa rimossa nel timestep per ogni specie tramite la 5.10;
- Incremento netto di biomassa per ogni specie.

Si precisa che i calcoli di biomassa risultano innovativi rispetto a quanto fatto nei lavori precedenti

Nel caso in cui il periodo ecologico sia l'ultimo dell'anno viene stampata anche la mappa di biomassa deceduta per senescenza, ove il relativo valore viene stimata tramite la relazione 5.7 assumendo la completa rimozione degli esemplari. I files prodotti sono in formato *.xyz*. Inoltre, per una mera esigenza di visualizzazione, i dati sono stati stampati anche su un file *.nc*

6.13. ASSEMBLAGGIO DEI CODICI E RUN DELLE SIMULAZIONI: iniveg pt2mod

Come visibile nello schema di Figura 40, le singole porzioni funzionali di codice di cui sopra, a partire da *d3dadmin*, sono assemblate in un codice main che assicura la continuità fra le parti e la corretta esecuzione delle stesse. In particolare, esso è stato strutturato sostanzialmente in due parti.

La prima parte contiene tutte le porzioni funzionali sopra citate. In particolare, all'interno di un ciclo che scorre gli anni di simulazione viene predisposta la creazione di una cartella dei risultati per ciascuno di essi e viene creato il ciclo che scorre per ciascun anno i periodi ecologici. Assumendo che la simulazione possa partire e terminare in qualsiasi periodo dell'anno, per ciascuno di essi vengono specificati gli identificativi dei timestep di partenza e termine ed il ciclo sopracitato spazia fra tali valori. All'interno di questa struttura annidata sono eseguite le seguenti istruzioni:

- Nel caso di prima iterazione del primo anno, la mappa in output ad *ini_work* viene salvata nella cartella dei file di input così da consentirne le successive elaborazioni di *extract_par*;
- La mappa in output al passo precedente viene salvata nella corrispondente cartella annua dei risultati con una designazione in cui si specifica che è valevole per il timestep identificato dal contatore del ciclo;
- All'interno di un ciclo sui tipi di vegetazione viene lanciato il codice di calcolo della crescita
- Al termine del ciclo di cui al punto precedente viene creato l'elenco completo degli identificativi per il file *.ttd* e vengono effettuate le interpolazioni dei dati costituenti tale file per il passaggio da cento cella a *flowlink midpoint*;
- Sono inizializzate alcune variabili necessarie alla parte di mortalità ed è importata la matrice delle frazioni ottenuta al passo precedente;
- Il file di restart da impiegare per la successiva simulazione è importato previa ricostruzione del corrispondente identificativo come già spiegato in precedenza;
- Vengono lanciati nell'ordine i codici relativi all'adeguamento dei file di definizione, all'estrazione dei parametri, alla colonizzazione, allo stanziamento ed alla mortalità;
- I file *.ttd* e *.arl* sono compilati nella cartella di input tramite la funzione impiegata per effettuarne l'adeguamento ai canoni del simulatore e sono copiati nella cartella degli output annui;
- Viene introdotto un ciclo decisionale in merito all'esecuzione della simulazione. In particolare, se il periodo è considerato morfodinamicamente attivo viene eseguita da linea di comando la simulazione. Alternativamente, vengono copiate nella posizione in cui usualmente D-FlowFM produce i risultati le mappe di restart e di output, previo riadattamento delle stesse. La mappa di restart, all'atto della copia viene inoltre rinominata con l'identificativo necessario ad assicurare la continuità e la prosecuzione delle successive simulazioni.
- Al termine della simulazione o della sovrascrittura il file mappa prodotto nella posizione degli output viene copiata nella cartella degli input, in analogia a quanto fatto nel caso della prima iterazione.

Il riadattamento di cui sopra delle mappe consiste nell'aggiornamento degli istanti temporali nelle relative variabili e nella sovrascrittura delle variabili tirante, quota variabile di fondo, scabrezza di Chezy, quota della superficie libera e velocità di flusso con l'ultimo set di valori registrato nella simulazione precedente, così da ricreare una condizione stazionaria di invariabilità dei parametri.

Impiegando tale struttura è quindi possibile effettuare tutte le computazioni ed avanzare nel tempo con le simulazioni.

7. CALIBRAZIONE DELLE LEGGI DI CRESCITA E SETUP DEL MODELLO

Il presente capitolo è focalizzato all'esposizione ed all'analisi degli aspetti di calibrazione e setup operativo del modello, in riferimento alle leggi di crescita ed alle impostazioni adottate per l'esecuzione della simulazione. Scopo comune di taluni aspetti è la predisposizione di un modello quanto più possibile fedele alla realtà.

7.1. CALIBRAZIONE DELLE LEGGI DI CRESCITA

La maggioranza dei parametri adottati nel processo di crescita discendono da valori di letteratura, quali ad esempio le soglie di tolleranza agli stress idro-morfodinamici ed il fattore di crescita delle radici, tuttavia, quelli di maggior spessore, ove possibile, sono stati calibrati sulla base dei dati disponibili, in modo da ricreare un modello maggiormente aderente al caso studio. Nella fattispecie, tale processo interessa indirettamente i parametri della legge allometrica, in quanto già effettuato da Redoglia (2021) e direttamente i coefficienti della legge di crescita dei diametri.

In particolare, riportando in 7.1 per chiarezza la relazione di Botkin et al. (1972) di cui si ipotizza l'impiego, la calibrazione ha interessato i parametri G e q.

$$\frac{d\vartheta}{dt^*} = \frac{G(\vartheta D_m^*)^{q-1} [(\vartheta^3 - 2\vartheta^2 + 1)H_m^* - (\vartheta - 1)^2 \vartheta H_0^*]}{2[H_0^* + \vartheta(2\vartheta - 3)(H_0^* - H_m^*)]H_m^*} \quad 7.1$$

Disponendo della mappa che per salici e pioppi riporta i valori di diametri ed altezza relativi al 28/02/2019 ed al 23/03/2021 è stato possibile calcolare per ciascun esemplare l'aumento di diametro. Corredando tale informazione con l'intervallo temporale intercorso, pari a 755 giorni, è stato possibile determinare in primo luogo il membro sinistro della 7.1 e successivamente la parte destra moltiplicativa al coefficiente da calibrare. Rapportando questi due termini, per ogni pianta, è stato determinato un valore di G, considerando di propagare la crescita dal 2019, assumendo conseguentemente come diametro per il calcolo di ϑ quello relativo a tale anno, e di farla regredire dal 2021, in modo da avere un maggior assortimento di valori. Di questi sono stati estratti il valor medio e la varianza nel caso di differenti assunzioni del valore di q, compreso fra 1.5 e 3 (Camporeale & Ridolfi, 2006). In Tabella 14 sono riportati i risultati ottenuti al variare del fattore q.

Tabella 14 Risultati della calibrazione del coefficiente G della legge di crescita dei diametri

Statistiche di G	q						
	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3
Valor medio progressione 2019	5,6774	6,2359	7,0565	8,3397	10,5081	14,5116	22,6015
Deviazione standard progressione 2019	24,6337	23,039	21,6383	20,6405	21,2091	29,1667	62,7518
Valor medio regressione 2021	4,5253	4,5501	4,5791	4,6149	4,662	4,7274	4,8243
Deviazione standard regressione 2021	238,7979	238,03	237,3645	236,788	236,2893	235,8588	235,4906
Media dei valori medi	5,10135	5,393	5,8178	6,4773	7,58505	9,6195	13,7129

Come visibile da Tabella 14 i valori medi provenienti dalla progressione sono più alti di quelli relativi alla regressione ma sono caratterizzati da una deviazione standard inferiore. Ricercando in particolare quello per il quale se ne registra il minimo valore è possibile osservare che corrisponde alla scelta di $q=2.25$, cui consegue un valor medio di $G=8.34$. Si sottolinea che tali valori sono stati ricavati esprimendo la variazione temporale in anni. La scelta vera e propria della combinazione, tuttavia è stata principalmente condizionata dal confronto dei risultati ottenuti con quanto suggerito in letteratura, ossia una coppia di valori G e q tali da assicurare il raggiungimento di un'altezza pari a $2/3$ del valor massimo entro un periodo pari alla emivita della specie. In particolare, per ciascuna ipotesi di q, si è proceduto al calcolo del diametro "target" tramite legge allometrica e, successivamente, fissando la finestra temporale, il diametro adimensionalizzato iniziale, pari al valore specificato da Van Oorschot et al. (2017), e la variazione di diametro, è stato possibile stimare il valore di G necessario alla chiusura dell'equazione. Si precisa che il calcolo è stato condotto distintamente per salici e pioppi, essendo caratterizzati da periodi vitali differenti e per entrambe le specie i valori massimi di diametro e altezza sono stati assunti pari a quelli massimi registrati, non essendo stata fatta una distinzione vera e propria fra salici e pioppi nella fase di identificazione degli esemplari. In Tabella 15 sono riportati i risultati ottenuti.

Tabella 15 Valori di riferimento di G al variare di q

Valore di riferimento di G	q						
	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3
Salici	0,9454	3,1514	10,504	35,0157	116,7719	389,0595	1296,9
Pioppi	0,4554	1,518	5,06	16,8667	56,22221	187,4061	624,6835
Media	0,7004	2,3347	7,782	25,9412	86,49703	288,2328	960,7918

Dal confronto dei valori in Tabella 15 con quelli provenienti dalla calibrazione in Tabella 14 è possibile notare che in termini medi, la combinazione maggiormente aderente al riferimento teorico è costituita da $q=2$ e $G=7.06$. Tale scelta risulta avvalorata dal fatto che pur non essendo minima, la deviazione standard della succitata coppia di valori è comunque fra le più basse registrate.

7.2. SETUP IDRO-MORFOLOGICO

Come già anticipato al Paragrafo 1, il presente lavoro è mirato alla validazione dell'approccio di modellazione di vegetazione dinamica tramite confronto con i dati LiDAR acquisiti nei due voli CNR-IRPI eseguiti nei giorni 28/02/2019 e 23/03/2021. Per tale ragione, il periodo netto di simulazione è assunto coincidente con il periodo trascorso fra i due voli. Tuttavia, a livello pratico, si è assunto l'inizio in data 26/02/2019, in quanto si ipotizza di eseguire la simulazione a partire da condizioni di fondo completamente emerso, da cui si rende necessaria l'istituzione di un iniziale periodo di riempimento, che non interferisca con la simulazione falsandone i risultati.

Al fine di procedere alla modellazione, in primo luogo è stata realizzata una griglia quadrata in corrispondenza del tratto esaminato, ossia la Zona C, di lato 8.5×8.5 m, come evidenziato in Figura 43. La struttura quadrata delle maglie è stata adottata per evitare la formazione di direzioni preferenziali di deflusso, mentre la dimensione è stata selezionata come compromesso fra massima risoluzione e minimo onere computazionale. Sulla griglia sono stati interpolati i dati batimetrici provenienti dall'elaborazione del volo CNR-IRPI effettuato il 28/02/2019 e sono state inserite due polilinee immediatamente al di fuori della mesh entro la distanza di un ordine di celle contenenti le condizioni al contorno, ottenendo quanto visibile in Figura 43.

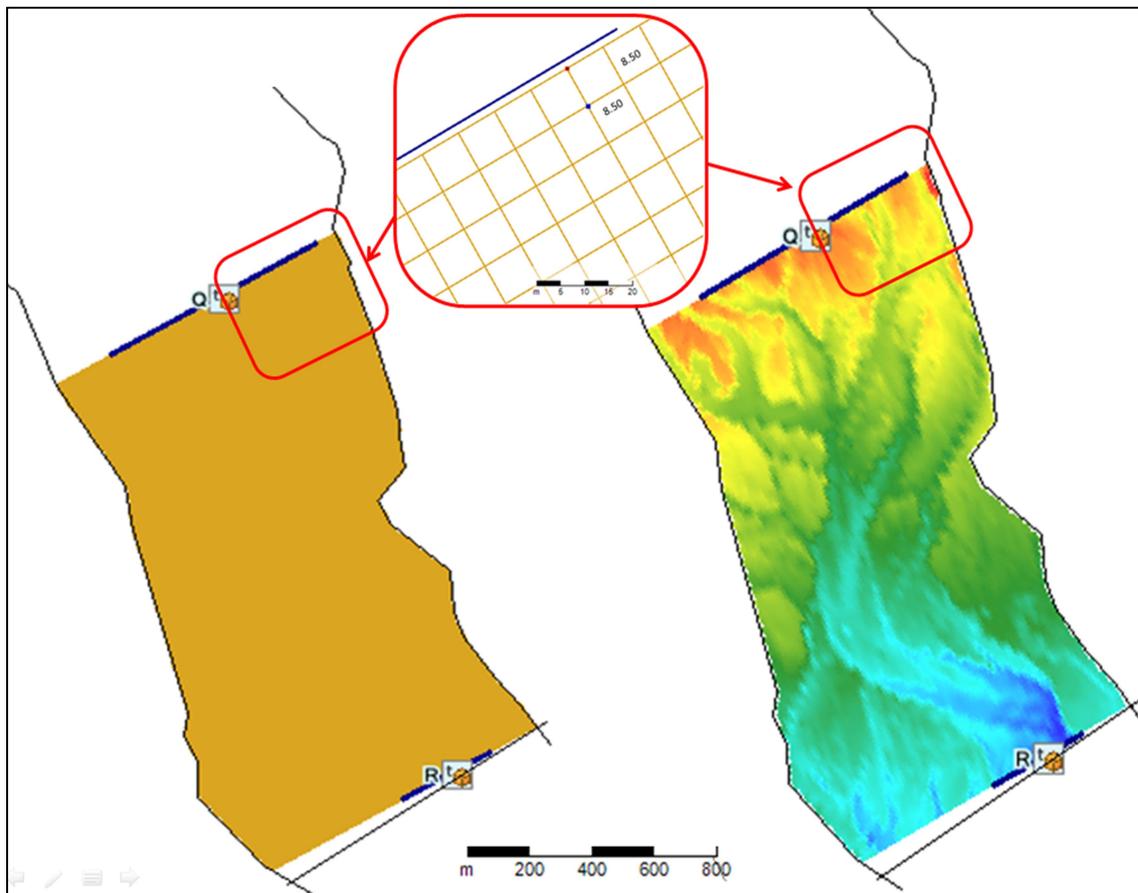


Figura 43 Viste del modello D-FlowFM dell'area studio con e senza batimetria con particolare della griglia quadrata

A livello morfologico è stata inserita una singola frazione di sedimento caratterizzata da spessore uniforme pari a 10 m e diametro mediano $d_{50}=77.74$ mm. Essa è stata catalogata come *bedload* (D-Morphology User Manual, 2022) ossia come frazione soggetta a soli fenomeni di trasporto solido di fondo, dato l'elevato valore di diametro mediano. Inoltre è stata prescritta la risoluzione del problema di trasporto solido tramite la relazione di Meyer-Peter-Mueller, deducibile dalla sostituzione nella formulazione di Ashida-Michue di cui alla 7.2 dei coefficienti in 7.3

$$\Phi = \Gamma(\tau_* - \tau_{c*})^a (\sqrt{\tau_*} - p\sqrt{\tau_{c*}})^b \quad 7.2$$

$$\Gamma = 8; a = \frac{3}{2}; b = 0; p = 1; \tau_{c*} = 0.047 \quad 7.3$$

In cui Φ rappresenta l'intensità di trasporto solido definita come $\Phi = \frac{q_s}{\sqrt{\Delta g d^3}}$ ove q_s rappresenta la concentrazione areale media di particelle trasportate in $[m^2/s]$. Il termine τ_* rappresenta la tensione al fondo adimensionalizzata rispetto al termine $(\rho \Delta g d_{50})$, mentre τ_{c*} è la tensione critica di mobilitazione anch'essa adimensionalizzata rispetto allo stesso termine.

Tale ipotesi risulta avvalorata dall'elevato diametro mediano del sedimento, corrispondente ad una ghiaia grossolana, che conseguentemente per condizioni di portata ordinaria risulta al più in regime di trasporto solido di fondo. In particolare, facendo riferimento alle relazioni disponibili in letteratura, la modalità di trasporto solido di fondo si verifica qualora sia rispettata la condizione riportata in 7.4

$$0.6 < \frac{w_s}{u_*} < 6 \quad 7.4$$

Dove w_s rappresenta la velocità di sedimentazione del solido e $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ è definita come velocità di attrito e corrisponde al rapporto fra la tensione al fondo e la densità del fluido. La velocità di sedimentazione può essere stimata come funzione del Reynolds Particle, pari a 87205, e del diametro mediano secondo diverse formulazioni. Nel presente caso si fa riferimento alla relazione di Dietrich, implementata nel foglio di calcolo di Parker reperito nel materiale didattico del corso di Idraulica Fluviale (Camporeale, A.A. 2020/2021), dalla quale si ottiene un valore pari a $w_s = 173.12$ cm/s.

Per la stima della tensione al fondo si è fatto riferimento al massimo valore registrato nelle simulazioni condotte in caso di portata pari/prossima alla portata media annua di San Benigno Canavese, determinata al Capitolo 2 come 20.90 m³/s e per valori prossimi al massimo della serie relativa agli anni oggetto di simulazione, pari a circa 450 m³/s. Le tensioni massime in tali condizioni risultano pari rispettivamente a 40 e 140 Pa, come visibile da Figura 30 e Figura 31. Calcolando la corrispondente velocità di attrito si ottiene un rapporto pari ad 8.65 nel caso di portata medi, corrispondente alla condizione di assenza di trasporto solido, coerente con quanto desunto nel Paragrafo 4.4 mentre per la portata massima si ricava un rapporto pari a 4.62, indice di un trasporto solido esclusivamente di fondo, più precisamente per saltellamento.

La scelta delle condizioni al contorno da applicare è stata principalmente condizionata dallo scopo per cui la simulazione è stata realizzata, ossia la validazione dell'approccio di simulazione tramite ricostruzione di una condizione reale. In base a tale proposito dunque le condizioni al contorno sono state scelte in modo da essere meno vincolanti possibile rispetto ai fenomeni, consentendo l'instaurazione di un regime quanto più prossimo a quello naturale. Nella fattispecie, dunque, non sono stati imposti vincoli di alcun tipo alle estremità del dominio a livello di trasporto solido,

consentendo lo sviluppo di un naturale regime in conseguenza alle portate in entrata. A livello idrodinamico, a monte è stato prescritto l'idrogramma giornaliero ottenuto dall'elaborazione dei dati ARPA di portata disponibili per il periodo esaminato presso la stazione di San Benigno Canavese reperiti dalla banca dati idrologica (2022) e dai bollettini idrologici di portate (2022). A valle, è stata prescritta l'assenza di riflessione verso monte di eventuali perturbazioni, tramite l'imposizione dell'annullamento del parametro invariante di Riemann.

Si precisa che i dati di portata impiegati collimano parzialmente con quelli oggetto di elaborazione nel Paragrafo 4.1 in quanto nella serie storica ivi impiegata non risulta disponibile, per alcuna delle tre stazioni, la serie di dati per l'anno 2021, in corso di svolgimento all'atto della realizzazione del presente lavoro, in quanto elaborata da ARPA solo a compimento dell'anno. Per tale ragione i sopracitati dati sono stati integrati con i valori giornalieri reperiti nei bollettini idrologici ARPA quotidiani (2022).

Tale elaborazione ha introdotto la necessità di far riferimento ai soli dati della stazione di San Benigno Canavese, in quanto unica di cui siano presenti e disponibili dati nei bollettini giornalieri, poiché nell'elenco di stazioni risulta presente anche Castellamonte Spineto ma per essa non sono sempre disponibili osservazioni di portata.

Per compensare dunque la disparità fra la localizzazione della zona in esame e della stazione di misurazione delle portate, la serie di queste ultime è stata corretta tramite l'introduzione di un coefficiente moltiplicativo per la riscalatura dei valori in base alla superficie di bacino idrografico intercettato ad una determinata progressiva dell'asta fluviale.

Tale coefficiente è stato fornito pari a $\frac{702.501939103}{845.61231101}$

In definitiva, è stata ottenuta la serie graficizzata in Figura 44.

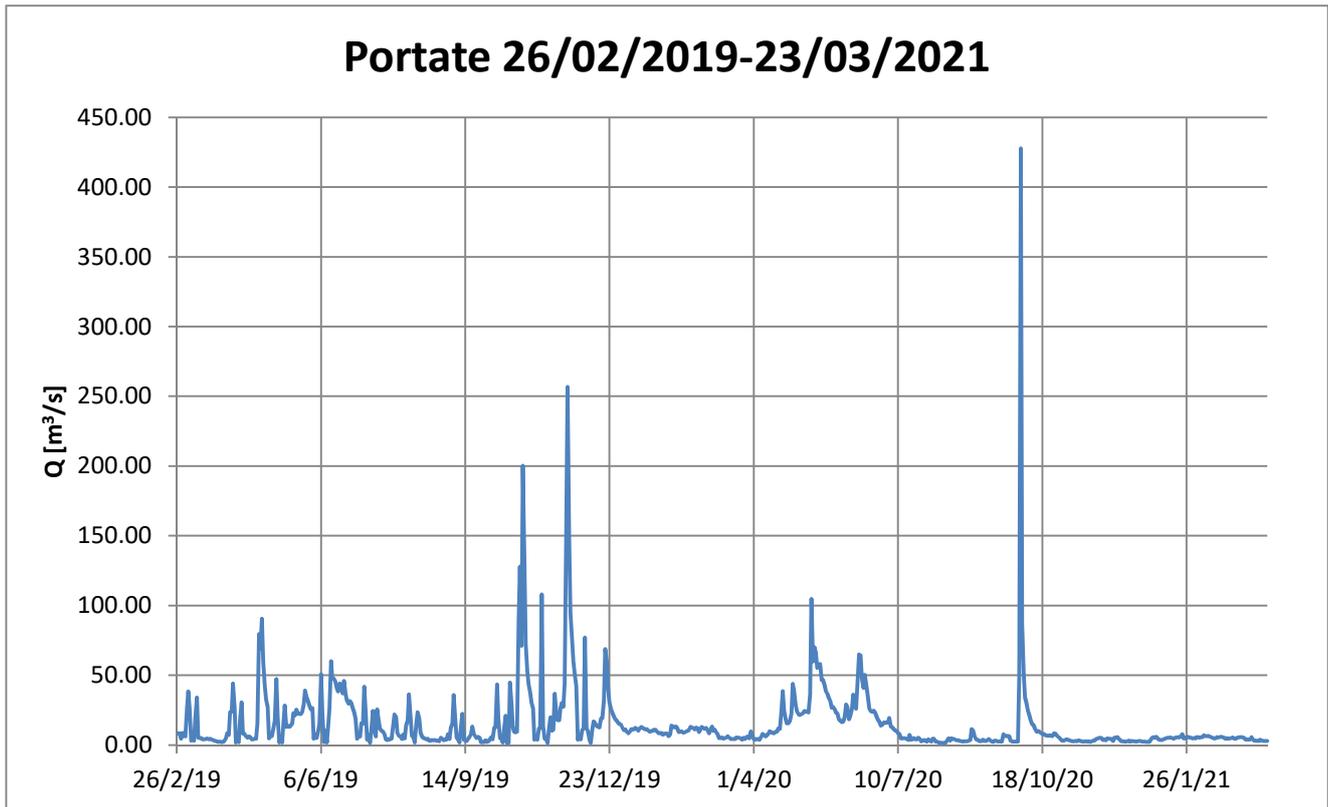


Figura 44 Serie di portate per la zona studio nel periodo di simulazione 26/02/2019-23/03/2021

A livello temporale è stato ipotizzato di impiegare un passo per l'aggiornamento delle forzanti esterne di 24 ore, compatibile con la definizione giornaliera delle portate in ingresso e dell'invariante di Riemann. Per quanto concerne i passi temporali di integrazione si considera di impiegare un valor massimo di 10 s ed un valore iniziale di 1 s. La scelta di tali parametri è stata motivata dalla condizione di Courant di imprescindibile rispetto per assicurare la convergenza della soluzione ricavata dal simulatore. In particolare, essa prescrive una relazione fra il passo spaziale e quello temporale nei termini advettivi delle equazioni alle derivate parziali di tipo iperbolico, sancendo che la somma nelle diverse direzioni dei prodotti di tale rapporto con la corrispondente componente di velocità di flusso non debba eccedere un valor massimo di ordine di grandezza 1. Nel caso di algoritmi di integrazione al passo di tipo esplicito come quello impiegato da D-FlowFM, tale soglia deve essere strettamente inferiore all'unità. In condizioni standard nelle impostazioni di modello risulta già fissato un valor massimo pari a 0.7, di cui all'interno del manuale utente D-FlowFM (D-Flow Flexible Mesh User Manual, 2021) si sconsiglia il superamento. Per tale ragione, considerando in direzione assiale una velocità forfettaria di 3 m/s in direzione assiale e 2 m/s in quella trasversale ed osservando una dimensione delle celle di 8.5x8.5m, volendo rispettare la soglia di 0.7 è consigliabile adottare un passo massimo temporale inferiore a 1.20 s. Per tale ragione dunque si è optato per l'imposizione di un timestep iniziale di 1 s e di un valor massimo di 10 s.

Si assume inoltre la produzione di output con frequenza giornaliera, in modo tale da disporre nel file mappa in uscita di serie su scala giornaliera di informazioni quali ad esempio tirante idraulico e quota di fondo.

Una volta definito il setup idro-morfologico intrinseco alle simulazioni, si è proceduto alla scelta del timestep idrologico da adottare, ponderata sul rispetto delle seguenti condizioni:

1. La durata deve essere congrua con i principali processi ecologici, in analogia a quanto ipotizzato da Van Oorschot et al. (2006);
2. Deve essere assicurata la massima copertura possibile della finestra annua di 365 giorni con un numero intero di periodi ecologici, minimizzando gli scarti i termini di giorni in esubero o in deficit;
3. La ripartizione dell'anno in base a tale timestep dovrebbe per quanto possibile essere adattabile al periodo di simulazione, consentendo di allineare l'inizio ed il termine della stessa ad estremi dei periodi ecologici minimizzando il numero di giorni al di fuori della finestra teorica ma necessari all'esecuzione corretta.

Sulla base di tali requisiti si è optato per un timestep ecologico di 14 giorni. In particolare, tale scelta consente di ricoprire la finestra annua pressochè completamente, 364 giorni considerando 26 periodi ogni anno, e consente l'ottimizzazione temporale della simulazione. Questo perché partizionando con un passo di 14 giorni a partire da Gennaio 2019, l'inizio della simulazione ricade nel quinto periodo, con un "ritardo" di 2 giorni, non problematico, bensì risolutivo in quanto consente di assorbirvi l'iniziale fase di riempimento del letto. Inoltre, assumendo di trascurare il giorno 29/02/2020, il termine simulazione risulta perfettamente allineato con il termine del periodo ecologico. In tale modo risulta possibile ricoprire l'intera finestra temporale fra i due voli LiDAR minimizzando l'esborso di tempo computazionale dovuto ai giorni in esubero da simulare ugualmente. Conseguentemente, come già anticipato all'inizio della presente sezione, la simulazione si assume sia condotta a partire dal giorno 26/02/2019 sino al 23/03/2021.

8. MODELLO RADICALE ALTERNATIVO

Il presente capitolo è finalizzato all'introduzione e la descrizione di un modello di crescita dell'apparato radicale alternativo maggiormente sofisticato rispetto a quello adottato da van Oorschot et al (2006), in grado di tenere in conto degli aspetti di interazione con i livelli idrici in relazione alla loro dinamica stocastica. In tal modo, predisponendo anche tale modello, risulterà possibile effettuare un ulteriore confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

8.1. DEFINIZIONE TEORICA

A corredo di quanto sopra descritto, è stato sviluppato un ulteriore modello basato sulla raffinazione degli aspetti legati al segmento radicale. In particolare, tale assunzione è stata tradotta nell'adozione della legge di crescita descritta da Tron et al. (2014) e Caponi et al. (2020), descrittiva dell'interazione fra l'apparato radicale e la posizione della superficie libera stocasticamente variabile. E' stato inoltre revisionato il segmento relativo alla mortalità per uprooting indotto da sottoescavazione, sostituendo la condizione relativa alla profondità di erosione con una relativa alla biomassa esposta.

Preliminarmente alla descrizione delle modifiche effettivamente introdotte nei codici, si ritiene doveroso fornire un sintetico ma esaustivo inquadramento teorico dell'argomento.

Per quanto riguarda il modello di crescita descritto da Tron et al. (2014), occorre in primo luogo definire un sistema di riferimento in corrispondenza del piano campagna con orientamento positivo verso il basso, come visibile in Figura 45

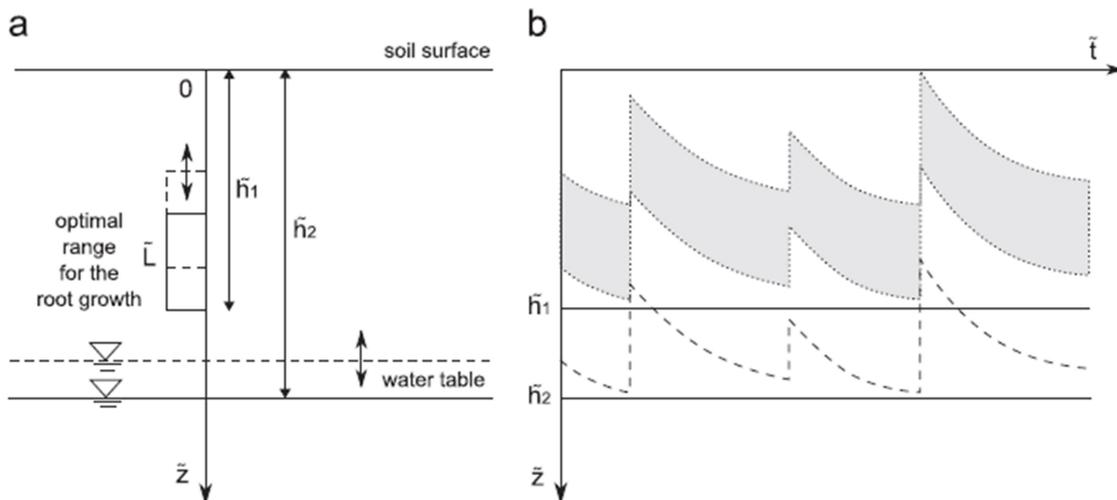


Figura 45 Sistema di riferimento adottato nel modello di Tron et al (2014) ed indicazione dei parametri in gioco

In esso è possibile identificare la coordinata della tavola d'acqua \tilde{z}_w , che assume valore massimo \tilde{h}_2 ed una fascia di spessore \tilde{L} , la cui estremità inferiore è localizzata alla quota \tilde{h}_1 . Tale zona è indicativa della porzione di suolo insaturo in cui si assume sia favorita la crescita radicale e si estende sino alla posizione \tilde{h}_1 , corrispondente alla quota della tavola d'acqua dedotta di un termine almeno pari allo spessore della frangia capillare. Come visibile da Figura 45, la posizione della superficie freatica, e conseguentemente della fascia di crescita ottimale, risultano temporalmente variabili secondo una dinamica stocastica guidata da un rumore bianco Poissoniano, descrivibile dalla relazione 8.1.

$$\frac{d\tilde{z}_w}{d\tilde{t}} = \eta(\tilde{h}_2 - \tilde{z}_w) - \xi \quad 8.1$$

In cui \tilde{t} [T] è il tempo, η [1/T] è un parametro che descrive il tasso di decrescita temporale dei livelli idrici e ξ [L/T] è il rumore Poissoniano. Questo descrive l'incremento stocastico istantaneo del livello ed è caratterizzato da una frequenza media λ [1/T] e da un'altezza media degli impulsi pari a $\tilde{\alpha}$ [L]. Dalla 8.1, è possibile ricavare la funzione densità di probabilità allo steady state, (Ridolfi et al., 2011), ottenendo quanto riportato in 8.2.

$$p(z_w) = \frac{\alpha^{-\frac{\lambda}{\eta}}}{\Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}\right)} e^{\frac{z_w-1}{\alpha}} (1 - z_w)^{\frac{\lambda}{\eta}-1} \quad 8.2$$

Dove $z_w = \frac{\tilde{z}_w}{\tilde{h}_2}$ rappresenta il livello adimensionalizzato rispetto al massimo valore osservabile, $\alpha = \frac{\tilde{\alpha}}{\tilde{h}_2}$ e $\Gamma(\cdot)$ è la funzione Gamma (Abramowitz & Stegun, 1964).

I parametri η, λ ed $\tilde{\alpha}$ sono correlate alle caratteristiche statistiche della serie temporale dei livelli rispettivamente secondo le relazioni 8.3, 8.4 e 8.5.

$$\eta = \frac{1}{\tau} \quad 8.3$$

$$\lambda = \frac{\mu^2}{\tau\sigma^2} \quad 8.4$$

$$\tilde{\alpha} = \frac{\sigma^2}{\mu} \quad 8.5$$

Ove μ, σ e τ corrispondono a media, deviazione standard e scala integrale dei livelli.

A partire da tali parametri è possibile stimare la probabilità $k(z)$ che una generica profondità adimensionalizzata ricada entro la zona a crescita radicale favorita come in 8.6.

$$k(z) = \begin{cases} \frac{\Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}, \frac{h_1-z-L}{\alpha}\right) - \Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}, \frac{h_1-z}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}\right)} & \text{if } -\infty < z < h_1-L, \\ 1 - \frac{\Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}, \frac{h_1-z}{\alpha}\right)}{\Gamma\left(\frac{\lambda}{\eta}\right)} & \text{if } h_1-L < z < h_1, \end{cases} \quad 8.6$$

In cui $\Gamma(\cdot, \cdot)$ rappresenta la funzione gamma incompleta superiore. Dalla 8.6 è possibile osservare come la probabilità sia differenziata in due casi, il primo corrispondente ad una localizzazione al di sopra della fascia a crescita ottimale, a rigore definita sino a $-\infty$ anche se effettivamente ragionevole sino a 0, ed il secondo associato alle profondità ricadenti entro lo spessore di cui sopra.

A partire dalla suddetta probabilità, è possibile ricavare un profilo di distribuzione verticale della densità di biomassa radicale b_r come da 8.7.

$$b_r(z) = \frac{2\sigma(z)k(z)}{\sigma(z) + \sigma(z)k(z) + 1 - k(z)} \quad 8.7$$

Il parametro $\sigma(z)$ rappresenta il rapporto fra i tassi di crescita e decadimento delle radici, come evidenziato da Caponi et al. (2020).

Integrando la presente densità sulla profondità è dunque possibile determinare l'andamento verticale di biomassa radicale adimensionalizzata rispetto al valore massimo raggiungibile, esplicitato in 8.8.

$$B_r(z) = \int_0^z b_r(z) dz \quad 8.8$$

Si precisa che per ottenere l'effettiva biomassa è ancora necessario moltiplicare il valore ricavato dalla 8.8 per la quota corrispondente al minimo livello, impiegata per adimensionalizzare le profondità.

Nel contesto di questo approccio stocastico, l'evoluzione della massima profondità radicale è descrivibile dalla legge di 8.9 (Caponi et al., 2020).

$$\frac{d\zeta_r}{dt} = \sigma_r(\zeta_{r,max} - \zeta_r) \quad 8.9$$

In cui $\zeta_r [L]$ è la profondità radicale, $\zeta_{r,max} [L]$ corrisponde alla quota sopra designata come \tilde{h}_2 e $\sigma_r [L/T]$ rappresenta il fattore di crescita.

Nel presente lavoro si assume di adottare questa nuova legge di crescita dell'apparato radicale, previa determinazione della lunghezza iniziale degli esemplari presenti, ricavata tramite implementazione delle relazioni di cui sopra e dell'equazione di bilancio di biomassa totale riportata in 8.10.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{dB_{canopy}}{dt} + \frac{dB_{root}}{dt} \quad 8.10$$

$$\frac{dB_i}{dt} = \lambda_i \frac{dB}{dt} \text{ per } \begin{matrix} i = c \text{ (canopy)} \\ i = r \text{ (root)} \end{matrix} \quad 8.11$$

Dalla 8.11 è possibile osservare come le variazioni di biomassa associate alle porzioni al di sopra ed al di sotto della superficie, siano correlabili a quella di biomassa totale tramite due coefficienti λ_i , di valore variabile fra 0 e 1 a somma unitaria, descrittivi della ripartizione di massa nei due segmenti. Nella presente analisi si sono assunti rispettivamente pari a 0.50.

Per quanto attiene la mortalità per uprooting indotto da sottoescavazione, la biomassa critica adimensionale che deve essere esposta per indurre la mortalità è stimabile come in 8.12 (Caponi et al., 2020).

$$B_{r,cr} = \int_0^{\hat{\zeta}_{upr}} b_r(z) dz = \beta_{upr} \int_0^1 b_r(z) dz \quad 8.12$$

In cui $\hat{\zeta}_{upr} = \frac{\zeta_{upr}}{\zeta_r}$ rappresenta il rapporto fra la profondità di uprooting e quella radicale e β_{upr} è un parametro costante descrittivo della capacità del sistema radicale di far fronte ai fenomeni erosivi. Interpretando quest'ultimo come frazione della biomassa complessiva, è possibile giungere rapidamente alla definizione della nuova condizione di mortalità delle piante, previa definizione del valore di β_{upr} da prendere a riferimento. Quest'ultimo è un tema attualmente ancora aperto di discussione scientifica, per cui nella presente analisi si assume pari a 0.80, in analogia a quanto fatto da Caponi et al (2020).

La struttura della 8.6 evidenzia come la biomassa possa distribuirsi, in base all'approfondimento della tavola d'acqua, secondo due pattern prevalenti (Caponi & Siviglia, 2018). Il primo, designato come *shallow*, descrittivo delle condizioni in cui questa è particolarmente superficiale, è caratterizzato da un andamento iperbolico con massimo valore in corrispondenza della superficie. Tale caratteristica suggerisce come la maggioranza delle radici tenda ad essere allocata a livello del suolo con una giacitura suborizzontale, e che lo sviluppo in profondità sia affidato pressochè alla sola radice principale, o fittone. La seconda tipologia, definita *deep*, presenta un andamento simile ad una parabola, con posizione del massimo approfondita rispetto al suolo. Questo è descrittivo di un apparato più sviluppato in profondità, teso al raggiungimento della tavola d'acqua particolarmente approfondita. Quanto qui descritto è visualizzabile in Figura 46.

La disparità nell'architettura del sistema radicale per diverse condizioni di soggiacenza, indica come gli esemplari a sviluppo più superficiale siano maggiormente suscettibili a fenomeni di uprooting, presentando una elevata concentrazione di biomassa negli strati più vicini al suolo, come visibile in Figura 46, estratta dal lavoro di Caponi & Siviglia (2018).

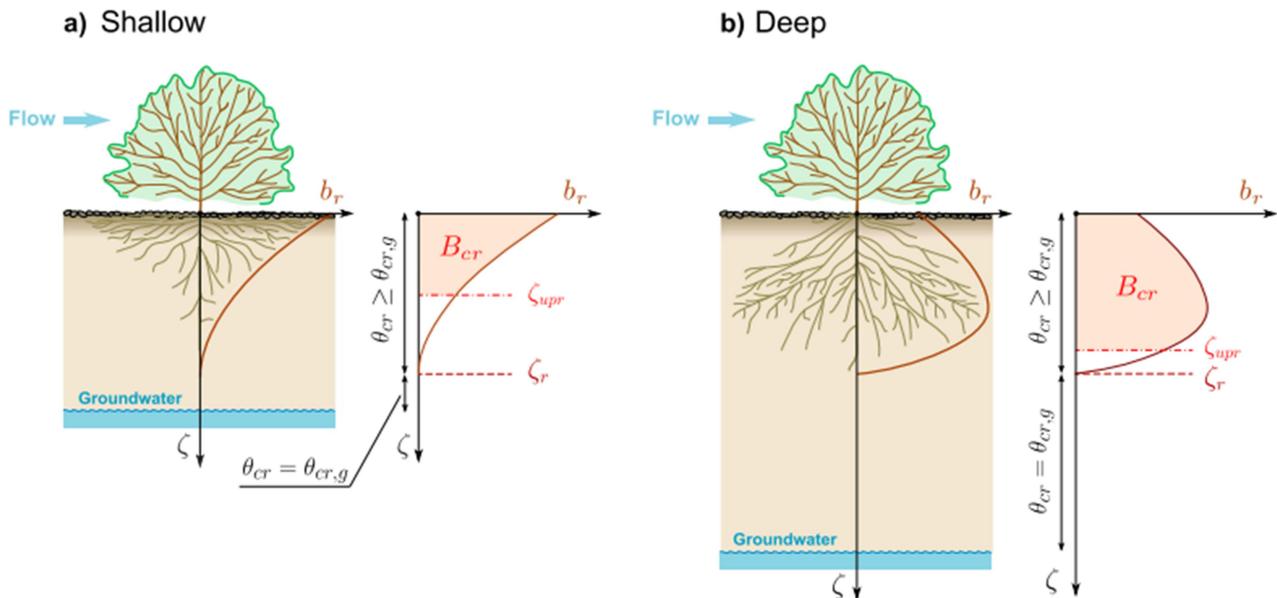


Figura 46 Pattern di distribuzione di biomassa radicale in funzione del livello e relazione con il valore critico da esporre (Caponi & Siviglia, 2018)

8.2. IMPLEMENTAZIONE DELL'APPROCCIO STOCASTICO PER LE RADICI

Al fine di implementare il suddetto approccio stocastico, è stata in primo luogo effettuata un'analisi di una serie di simulazioni di moto stazionario condotte per differenti valori di portata, nell'ottica di ricavare per ciascuna cella della maglia di calcolo la terna di coefficienti λ , η e $\tilde{\alpha}$ descrittivi della dinamica dei livelli idrici e necessari al calcolo della probabilità $k(z)$.

Nella fattispecie, dunque, sono state effettuate 15 simulazioni a portata costante, variabile fra 2000 m³/s e 1.31 m³/s, corrispondente alla portata al giorno di inizio delle simulazioni ecologiche, e per ciascuna di esse sono state ricavate le quote della tavola d'acqua in ciascuna cella della mesh. Si precisa che la mappa di tiranti o quote della superficie libera fornite in output dal simulatore non sono descrittive delle zone emerse, di massimo interesse nella presente applicazione, e laddove presenti sono espresse secondo un sistema di riferimento con orientamento positivo verso l'alto, in disaccordo con quello adottato da Tron et al. (2014) nello sviluppo del modello stocastico. Per tale motivo è stato sviluppato un ulteriore algoritmo in grado di ricavare le quote nel nuovo datum tramite i seguenti passaggi:

1. Individuazione grafica della linea di thalweg del tratto e calcolo della relativa lunghezza;
2. Determinazione delle quote di fondo associate ai punti di partenza e fine del thalweg;
3. Calcolo della effettiva pendenza del fondo come rapporto fra variazione di quota e sviluppo longitudinale;
4. Definizione per ogni cella delle quote corrispondenti ad un piano passante per il punto a quota minima con pendenza pari al valor medio di cui sopra;
5. Detrendizzazione delle quote di fondo e della superficie libera per sottrazione dalle quote assolute fornite dal simulatore di quelle del piano di riferimento;
6. Identificazione delle celle appartenenti ad un buffer di qualche metro intorno al canale attivo sin dai minimi valori di portata;
7. Estrazione per ogni valore di portata simulata della minima quota detrendizzata della superficie libera, tramite analisi delle celle bagnate entro il contorno di ritaglio;
8. Creazione di un piano passante per il punto a quota minima di superficie libera descrittivo della tavola d'acqua, assunta orizzontale nel sistema detrendizzato;
9. Calcolo per ciascuna cella, per ogni simulazione, della posizione della tavola d'acqua nel sistema di riferimento definito da Tron et al. (2014) tramite sottrazione dei valori di cui al punto precedente dalle quote terreno.

La ricerca dei punti di partenza e fine della linea di thalweg è stata condotta tramite la realizzazione di due poligoni contenuti rispettivamente la prima e l'ultima fila di celle, in modo tale da isolare direttamente i dati delle corrispondenti celle.

A partire dalla serie di livelli appena ottenuta, è stato possibile procedere alla taratura per ogni cella del dominio di una relazione di deflusso strutturata come in 8.13 utile per ricavare i livelli associati alla serie ventennale di portate disponibile per la stazione di San Benigno Canavese.

$$h = kQ^m \quad 8.13$$

I valori ottenuti dal database ARPA (Banca dati idrologica ARPA, 2022), sono stati in primo luogo riscaldati alla zona oggetto di esame tramite il coefficiente descrittivo della effettiva frazione di bacino drenata e sono stati filtrati in modo da rimuovere i giorni di assenza di osservazioni, al fine di agevolare il processing statistico.

Si precisa che ai fini della stima della scala integrale del fenomeno, tali dati, così come quelli originari, non risultano attendibili, per via della presenza di discontinuità che falserebbero il risultato. Per questo motivo, il calcolo è stato condotto su una porzione ristretta di serie, corrispondente al periodo di maggior durata in cui si dispone di osservazioni continue. Al termine delle analisi statistiche, sono stati stimati i tre parametri caratterizzanti il processo stocastico ed è stato impostato un segmento separato di algoritmo in grado di profilare la distribuzione sotterranea di biomassa implementando le relazioni 8.6, 8.7 e 8.8.

Per quanto concerne il calcolo della probabilità di appartenenza alla zona a crescita ottimale $k(z)$, si è ipotizzato che essa abbia uno spessore sempre pari alla soggiacenza calcolata al giorno di inizio simulazione \tilde{h}_1 dedotta dello spessore della frangia capillare, cautelativamente assunta pari a 5 cm, data la granulometria particolarmente grossolana del torrente Orco. Questa assunzione è stata motivata principalmente dall'impossibilità di reperire degli opportuni riferimenti letterari, con conseguente introduzione di una maggiore incertezza modellistica e dall'intento di ricavare la lunghezza radicale iniziale degli esemplari presenti. Inoltre, rifacendosi al lavoro di Caponi et al. (2020), è stato adottato un rapporto unitario fra crescita e declino delle radici per tutta la zona appartenente alla fascia ottimale e un valore nullo al di fuori di essa.

L'algoritmo è stato strutturato in modo da ricavare per una predefinita terna di coefficienti della legge stocastica e per un valore precisato di localizzazione del limite inferiore della fascia ottimale, l'andamento delle informazioni di biomassa sotterranea su di una verticale suddivisa in 100 parti fra quota adimensionalizzata nulla ed \tilde{h}_1/\tilde{h}_2 . Applicandolo su ogni cella vegetata, è stato dunque possibile ricostruire per ciascuna di esse la distribuzione di biomassa radicale rapportata al massimo valore osservabile a qualsiasi quota, ottenuto come rapporto fra la massima biomassa radicale, a sua volta ricavata tramite la 8.10 e la 8.11 da quella above-ground in condizioni di diametro ed altezza massimi, e la lunghezza radicale raggiungibile al limite, posta pari ad \tilde{h}_2 .

Una volta ricavato il suddetto andamento, è stato possibile ricavare la profondità radicale iniziale per ciascuna specie confrontando tali valori con l'omologo ricavato dalla biomassa aerea iniziale, trasformata in sotterranea tramite la manipolazione delle relazioni 8.10 e 8.11, e ricercando la quota cui corrisponde il minimo scarto. In aggiunta, è stato possibile procedere alla taratura del coefficiente di crescita σ_r della 8.9 sfruttando l'equazione di bilancio di variazione di biomassa riportata in 8.10. In particolare, assumendo che il periodo di calcolo coincida con l'età iniziale, è stato possibile tradurre la biomassa iniziale in variazione rispetto ad inizio vita ed applicare conseguentemente la succitata relazione. Come lunghezza limite $\zeta_{r,max}$ è stata impiegata la massima soggiacenza \tilde{h}_2 stimata dai dati ventennali, coerentemente con l'assenza di esemplari ad età maggiore di tale limite.

Al termine di tali elaborazioni, si dispone dunque per ogni specie e relativa cella vegetata, dei dati di biomassa, lunghezza e fattore di crescita radicale utili per le successive elaborazioni effettuate negli algoritmi. Si precisa che nel caso di celle non vegetate, ma eventualmente colonizzabili da una specie, il calcolo del fattore di crescita è stato comunque effettuato adottando per il calcolo della biomassa aerea i valori di diametro ed altezza associati ad età unitaria, così da disporre di dati calibrati anche per le eventuali celle colonizzate. A partire da questi, la porzione di algoritmo deputata al calcolo della crescita radicale è stato modificato introducendo la nuova legge di crescita raccolta in 8.9. Per quanto concerne la mortalità per uprooting indotto da sottoescavazione, il principio teorico è stato tradotto calcolando la biomassa al corrente timestep ecologico, tramite estrazione del valore associato alla relativa lunghezza radicale e confrontandola con quella escavata, analogamente ricavata dalla profondità di erosione.

9. CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Nel presente capitolo si presentano i risultati ottenuti dall'esecuzione della modellazione descritta nei capitoli precedenti, secondo le due leggi di crescita delle radici, e si effettua un confronto fra essi, le immagini satellitari della zona ed i dati ottenuti dal rilievo LiDAR eseguito in data 23/03/2021.

Si anticipa che l'analisi delle simulazioni effettuate ha posto in evidenza la necessità di effettuare un'ulteriore calibrazione delle leggi adottate, in quanto i risultati ottenuti risultavano nettamente in contrasto rispetto alla reale distribuzione degli esemplari.

Al termine di tale fase risulterà dunque possibile formulare una serie di conclusioni a riguardo della bontà delle simulazioni stesse e dell'approccio di modellazione dinamica della vegetazione.

9.1. SIMULAZIONE A MORFOLOGIA COSTANTE

La corrente sezione è dedicata alla presentazione ed all'analisi dei risultati ottenuti dall'esecuzione dell'algoritmo. Si ritiene utile introdurre in primo luogo i risultati ottenuti dall'implementazione pura dei codici, fissando forzatamente l'assenza di periodi morfologicamente attivi e conseguentemente di simulazioni da effettuare al di fuori della prima, necessaria all'innescio dei calcoli. Tale scelta si ritiene sia opportuna, in quanto particolarmente descrittiva del funzionamento dei codici. Infatti, l'assunzione di assenza di periodi attivi dal punto di vista morfologico implica direttamente la propagazione rigida nel tempo della condizione registrata al termine del timestep iniziale e conseguentemente pone in risalto gli effetti di mortalità, in particolar modo quella per disseccamento. Si procede dunque innanzitutto in Figura 47 alla presentazione delle altezze raggiunte dalle due specie in diversi istanti lungo il periodo di simulazione.

Osservando Figura 47 è possibile notare come gli esemplari siano caratterizzati da un'altezza iniziale generalmente compresa fra 5 e 40 m e che, come auspicato, subiscano una graduale crescita nell'arco del periodo di simulazione, apparentemente solo sino alla fine dell'anno 2020, con una rimozione pressoché completa dei salici entro il mese di Agosto. Questo perché, a partire dal mese di Ottobre 2019 si verifica una progressiva rimozione degli esemplari, in conseguenza all'attivazione, avvenuta a partire dal mese di agosto, della mortalità indotta da siccità. Ciò risulta evidente osservando gli andamenti di biomassa deceduta riportati in Figura 49, caratterizzati da un'iniziale quiescenza di durata coerente con quella del periodo di tolleranza dello stress da parte degli esemplari, dell'ordine di 200 giorni, e da una massiccia attivazione a partire da Agosto, e conseguentemente visibile da Ottobre, con progressivo esaurimento concomitante alla morte della totalità della popolazione vegetale. L'isteresi fra l'inizio del fenomeno e l'esaurimento è indicativa della dinamica evolutiva dose-effetto dello stesso ed ha una durata di circa 1 anno, coerente con la pendenza definita per le leggi delle due specie.

L'analisi della biomassa cresciuta entro ciascun timestep ecologico, riportata in Figura 48 conferma la dinamica sopra descritta, visualizzando un valore nullo a partire da Ottobre 2020. Osservando tali andamenti, tuttavia è possibile visualizzare valori nulli anche per istanti precedenti a quello di effettiva morte di tutti gli esemplari. Questo perché occorre sottolineare che i valori di biomassa cresciuti sono strettamente dipendenti dall'appartenenza del periodo considerato alla finestra di crescita, dunque è possibile osservare valori nulli anche qualora gli esemplari siano ancora vitali.

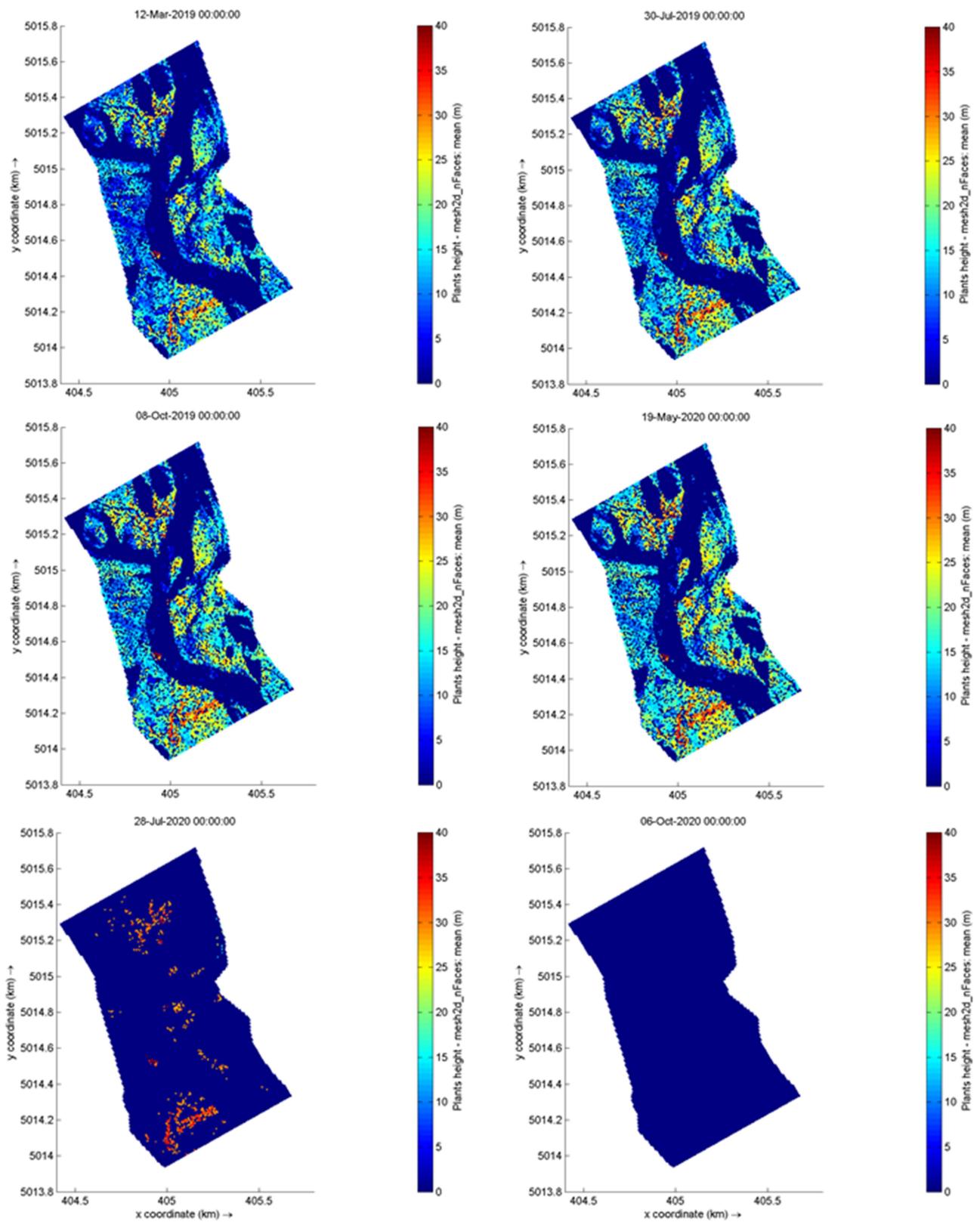


Figura 47 Mappe di altezza delle due specie in risultato alla simulazione statica dell'intero periodo

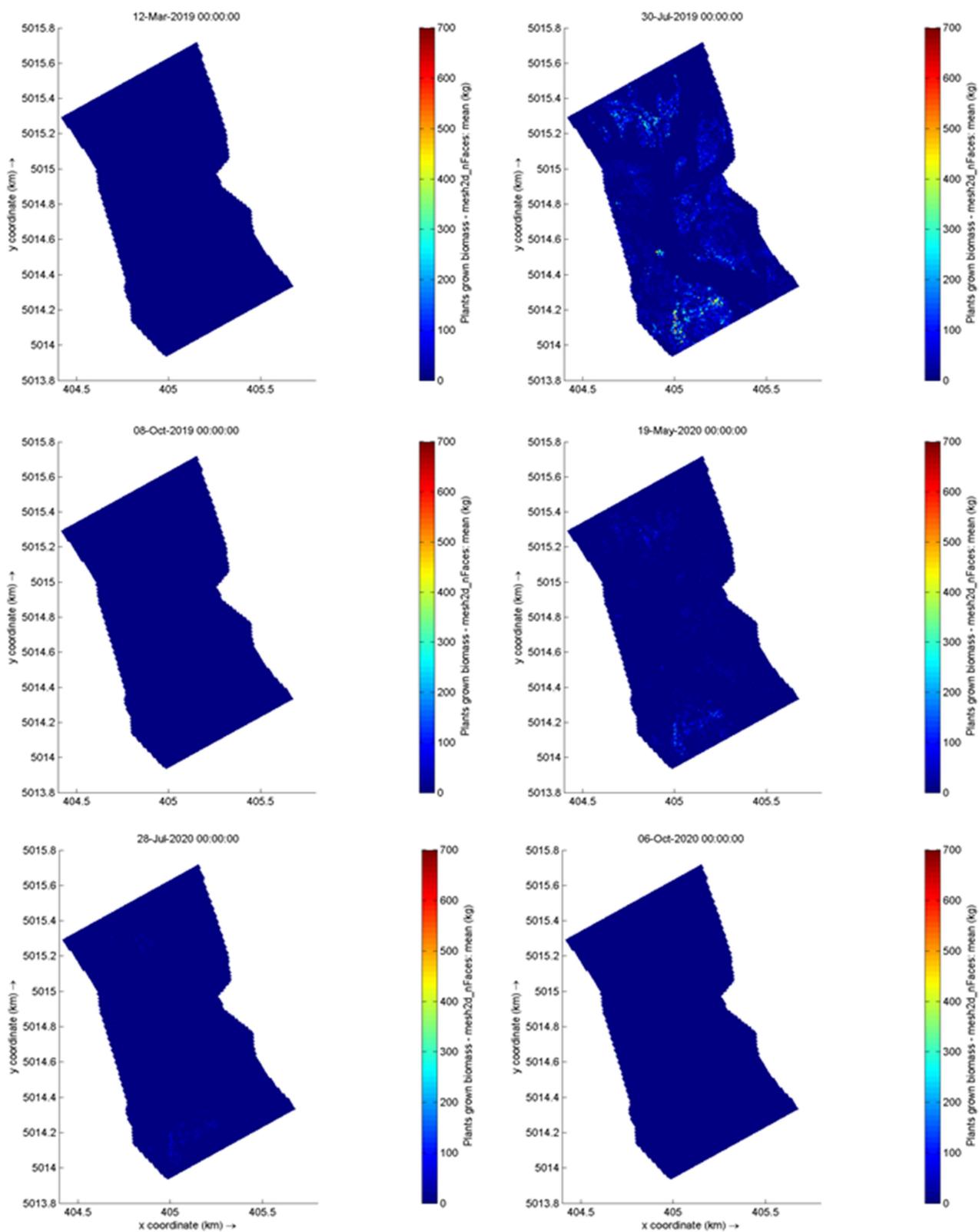


Figura 48 Mappe di biomassa cresciuta delle due specie in risultato alla simulazione statica

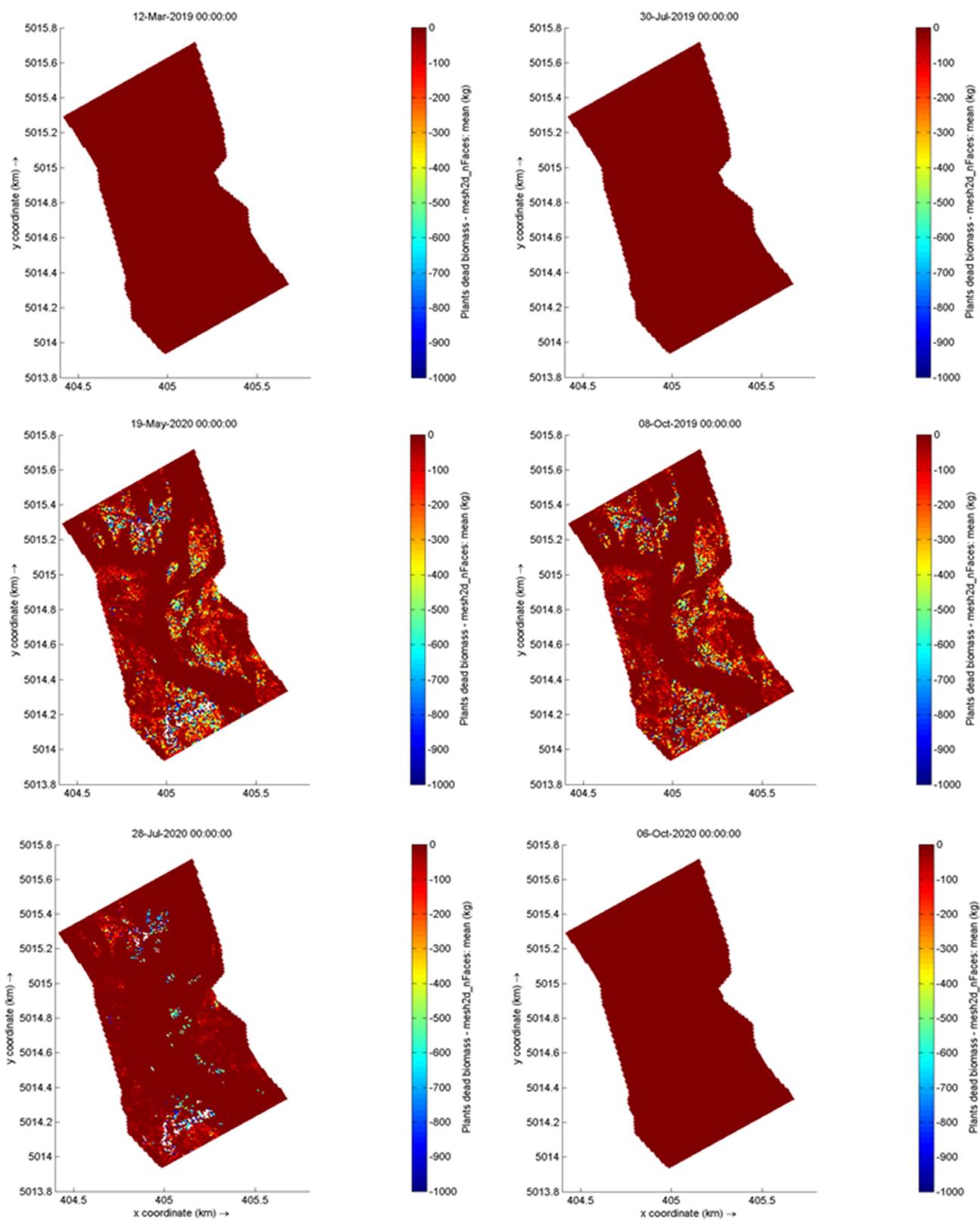


Figura 49 Mappe di biomassa deceduta delle due specie in risultato alla simulazione statica

9.2. SIMULAZIONE CON MORFOLOGIA DINAMICA

Si procede dunque all'analisi dei risultati provenienti dall'esecuzione del processo di calcolo effettivo. In Figura 50, Figura 51 e Figura 52 si riportano rispettivamente le evoluzioni delle altezze, della biomassa cresciuta e deceduta delle due specie.

Dall'analisi delle altezze, riportate in Figura 50, è possibile notare come anche in questa circostanza, al termine del periodo di modellazione gli esemplari siano pressoché completamente rimossi a causa degli stress da siccità, ad indice di un'inadeguatezza dei coefficienti adottati alla descrizione del caso studio. In particolare, infatti, per le zone ripariali più distanti dal canale ordinariamente attivo risulta troppo pregiudizievole assumere che la morte occorra per un'assenza di contatto diretto con l'acqua di durata superiore a circa 1 anno, essendo zone ordinariamente mai bagnate. Per tale motivo, si anticipa che i coefficienti delle leggi di mortalità, in particolar modo la pendenza, sono stati rivisti, al fine di ottenere una maggiore aderenza alla condizione reale.

Gli andamenti di biomassa cresciuta, riportati in Figura 51, sono poco descrittivi nel presente caso, essendo caratterizzati da una massiccia presenza di periodi di stasi, legati alla non appartenenza ai periodi di crescita, degli istanti prescelti per evidenziare l'evoluzione della distribuzione degli esemplari. In ogni caso, è possibile osservare la crescita degli esemplari sopravvissuti nel periodo a partire da fine Luglio 2020.

In termini di biomassa deceduta, è nuovamente possibile osservare la presenza di mortalità a partire dal mese di Ottobre 2019 e il relativo esaurimento, concomitante alla rimozione di pressoché tutte le frazioni di vegetazione preesistente nell'arco dell'anno successivo.

L'evoluzione delle altezze, pone inoltre in luce gli effetti del processo di colonizzazione, che come auspicato coinvolgono le zone antistanti il canale attivo.

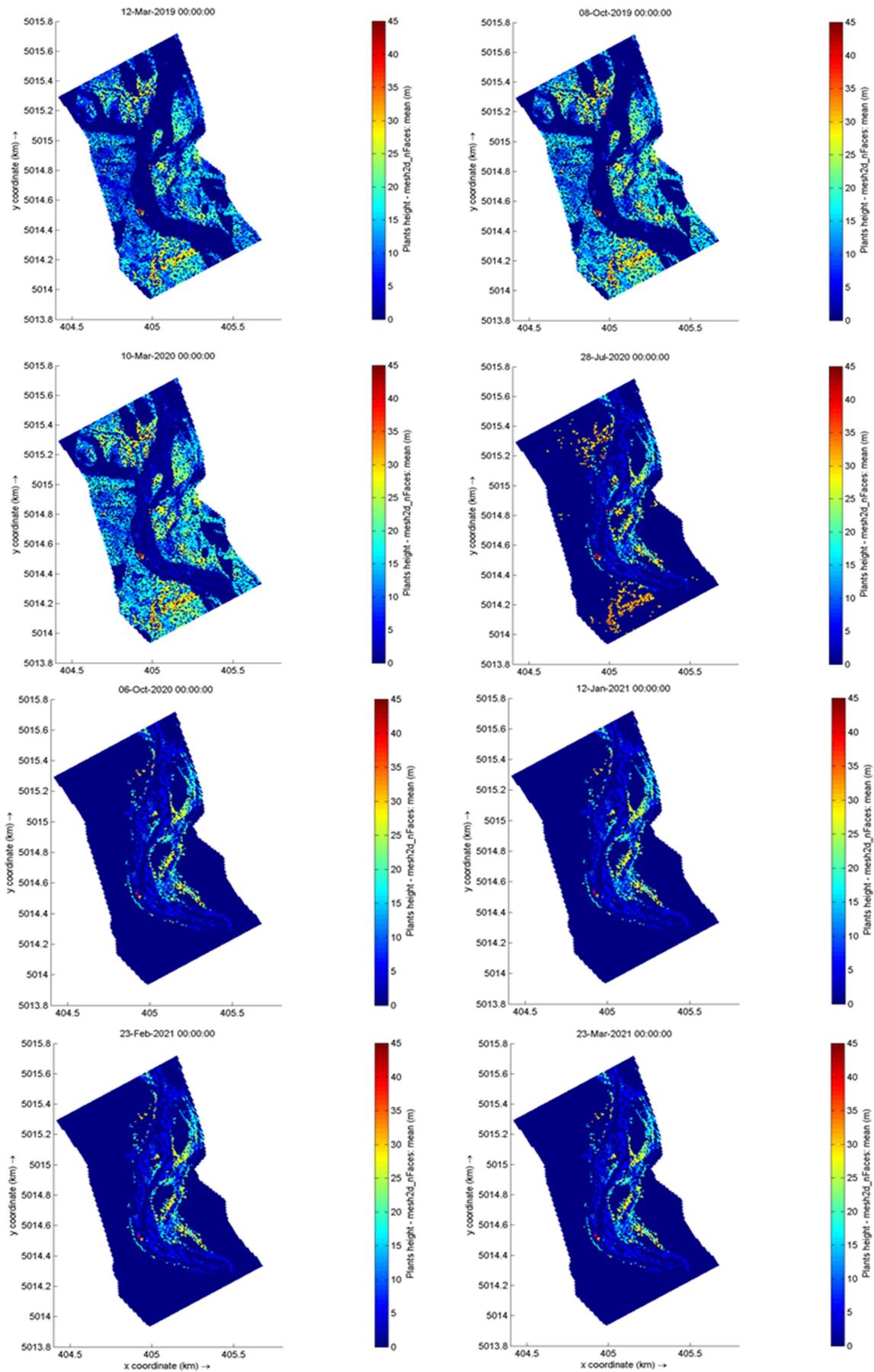


Figura 50 Mappe di altezza delle due specie in risultato alla simulazione dinamica dell'intero periodo

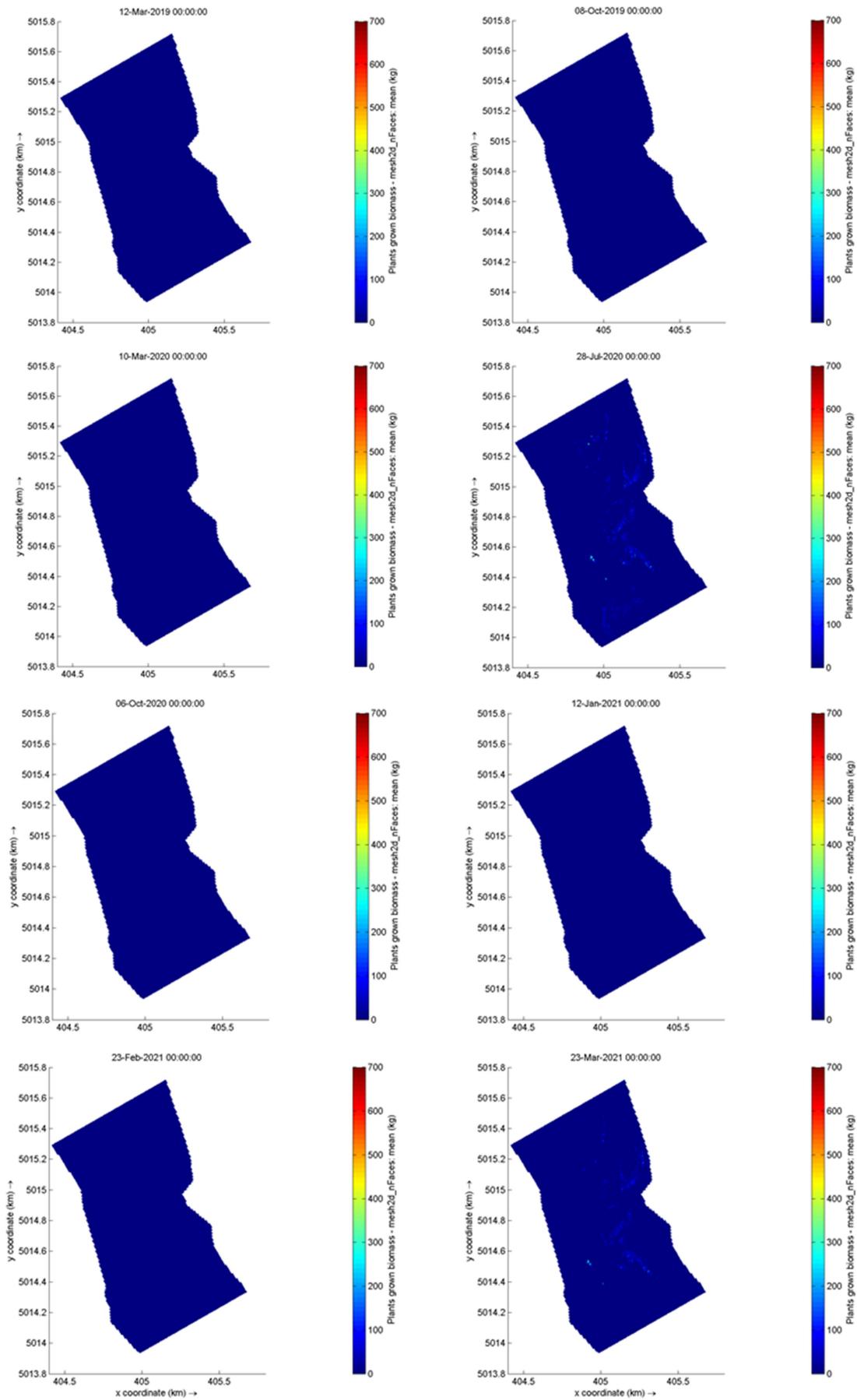


Figura 51 Mappe di biomassa cresciuta delle due specie in risultato alla simulazione dinamica

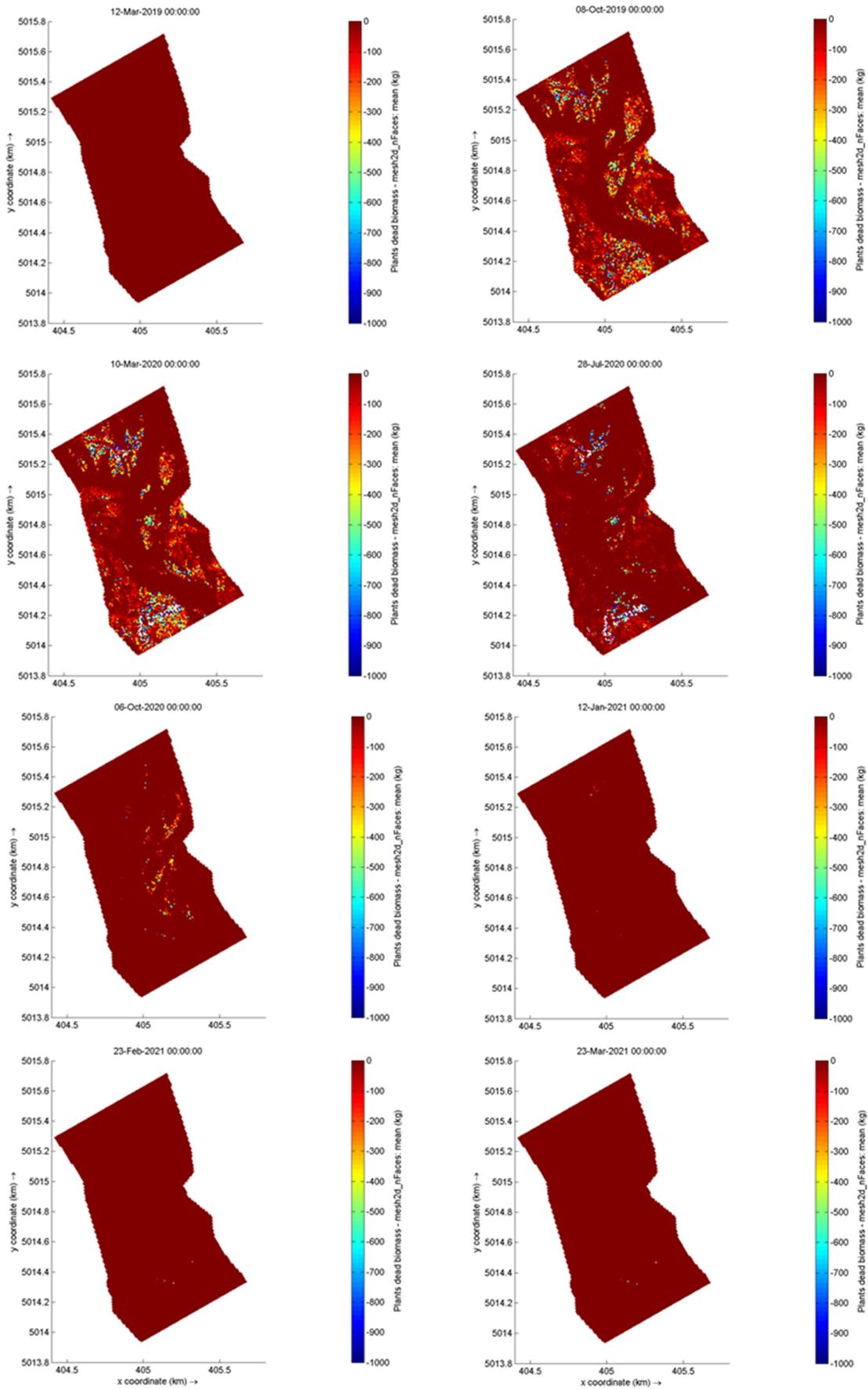


Figura 52 Mappe di biomassa deceduta delle due specie in risultato alla simulazione dinamica

Come già anticipato al paragrafo precedente, dal confronto con la ripresa satellitare della zona (Google Earth, 2021) e la distribuzione degli esemplari secondo il rilievo LiDAR del 2021, riportato in Figura 53, risulta evidente come il risultato della simulazione sia irrealistico, a causa della massiccia rimozione di esemplari indotta da stress siccitosi.

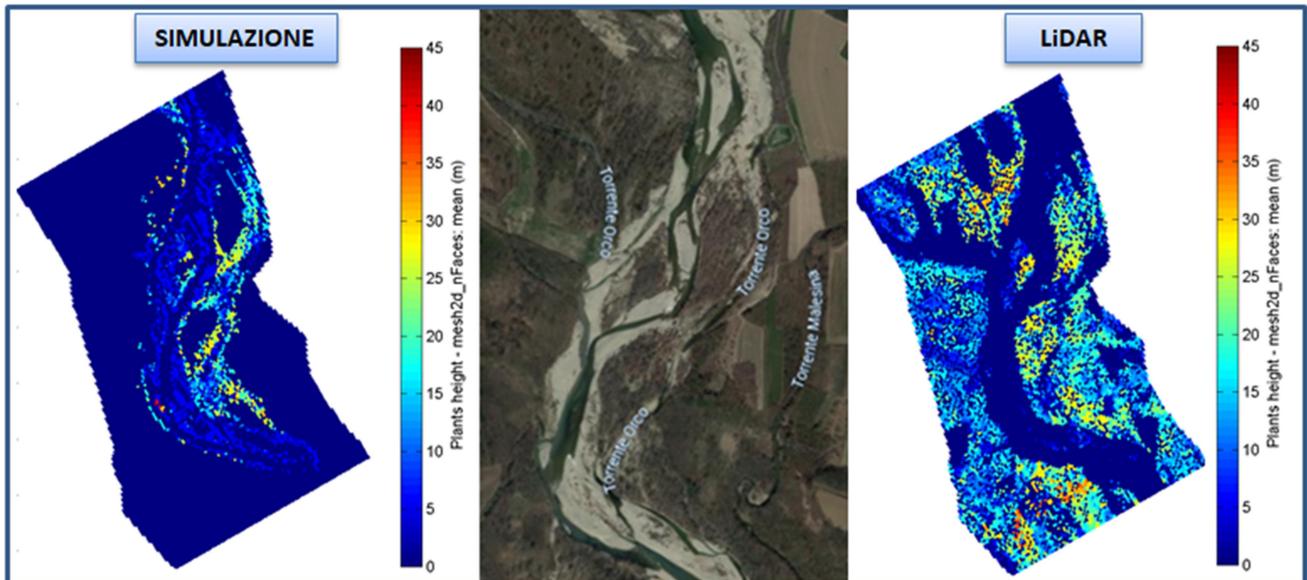


Figura 53 Confronto dei risultati della simulazione dinamica non calibrata con la ripresa aerea della zona (Google Earth, 2021) e la distribuzione degli esemplari secondo il rilievo del 2021

Inoltre, è possibile notare come in corrispondenza dell'alveo attivo, non si riscontri una presenza così massiccia di esemplari di nuovo stanziamento, da cui si rende necessaria l'esecuzione di una ulteriore calibrazione del modello in termini di legge di mortalità per disseccamento e relazioni del segmento riproduttivo.

Per quanto attiene la mortalità per disseccamento, sono stati condotti una serie di tentativi per valori variabili di pendenza, mirati alla ricerca di una corrispondenza fra la biomassa totale degli esemplari nel tratto esaminato ricavata dal rilievo LiDAR e quella stimata dalla simulazione, che hanno portato all'adozione di un valore pari a 0.015 per entrambe le specie.

In termini di stanziamento, è stata introdotta una condizione additiva rispetto a quanto già presente. In particolare, si assume che un esemplare possa stabilirsi in una cella solo qualora nella settimana successiva della dispersione dei semi, i tiranti idrici registrati non abbiano superato una soglia, che per tentativi successivi è stata ricavata pari a 0.10 m. Inoltre, è stata apportata una lieve modifica alla condizione di colonizzazione, di modo da renderla maggiormente realistica. Inizialmente infatti, questa prescriveva che il minimo tirante registrato lungo l'intero timestep ecologico dovesse essere successivo al massimo valore non nullo, volendo simulare un processo di idrocoria. Tale condizione risulta tuttavia poco realistica, in quanto anche qualora una cella sia stata correttamente esposta, se l'entità del relativo minimo tirante è inferiore al minimo storico, la cella non era ritenuta valida. Conseguentemente, la condizione è stata trasformata in modo tale che la colonizzazione sia possibile qualora a seguito del giorno di deposizione, corrispondente a quello in cui si osserva il massimo, si osservi un tirante minimo inferiore alla soglia di 0.05 m precedentemente introdotta e definita per tener conto dei fenomeni di evaporo-traspirazione.

In Figura 54, Figura 55 e Figura 56 si riportano i risultati ottenuti dall'esecuzione della simulazione a seguito di tali modifiche.

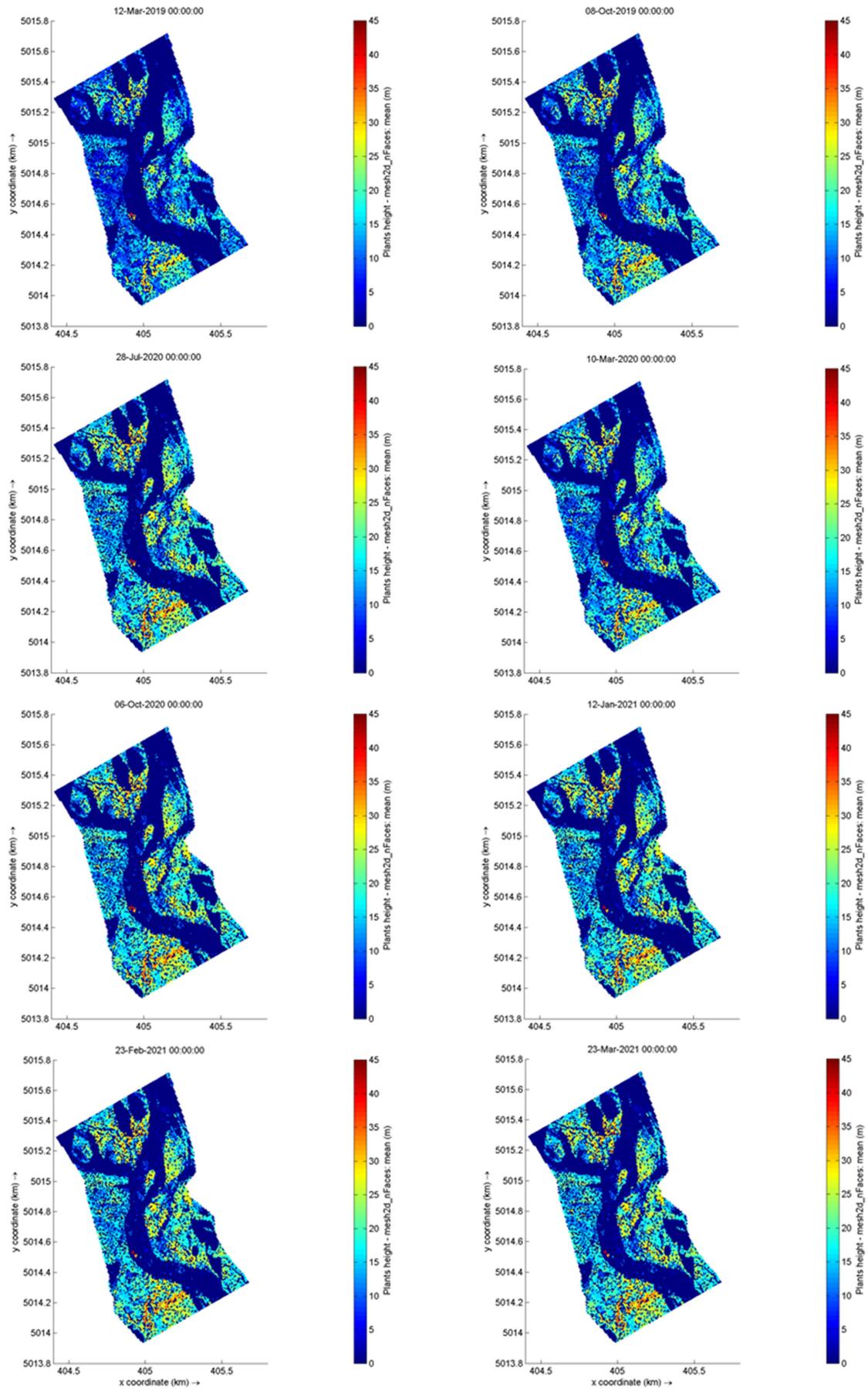


Figura 54 Mappe di altezza delle due specie in risultato alla simulazione dinamica ricalibrata

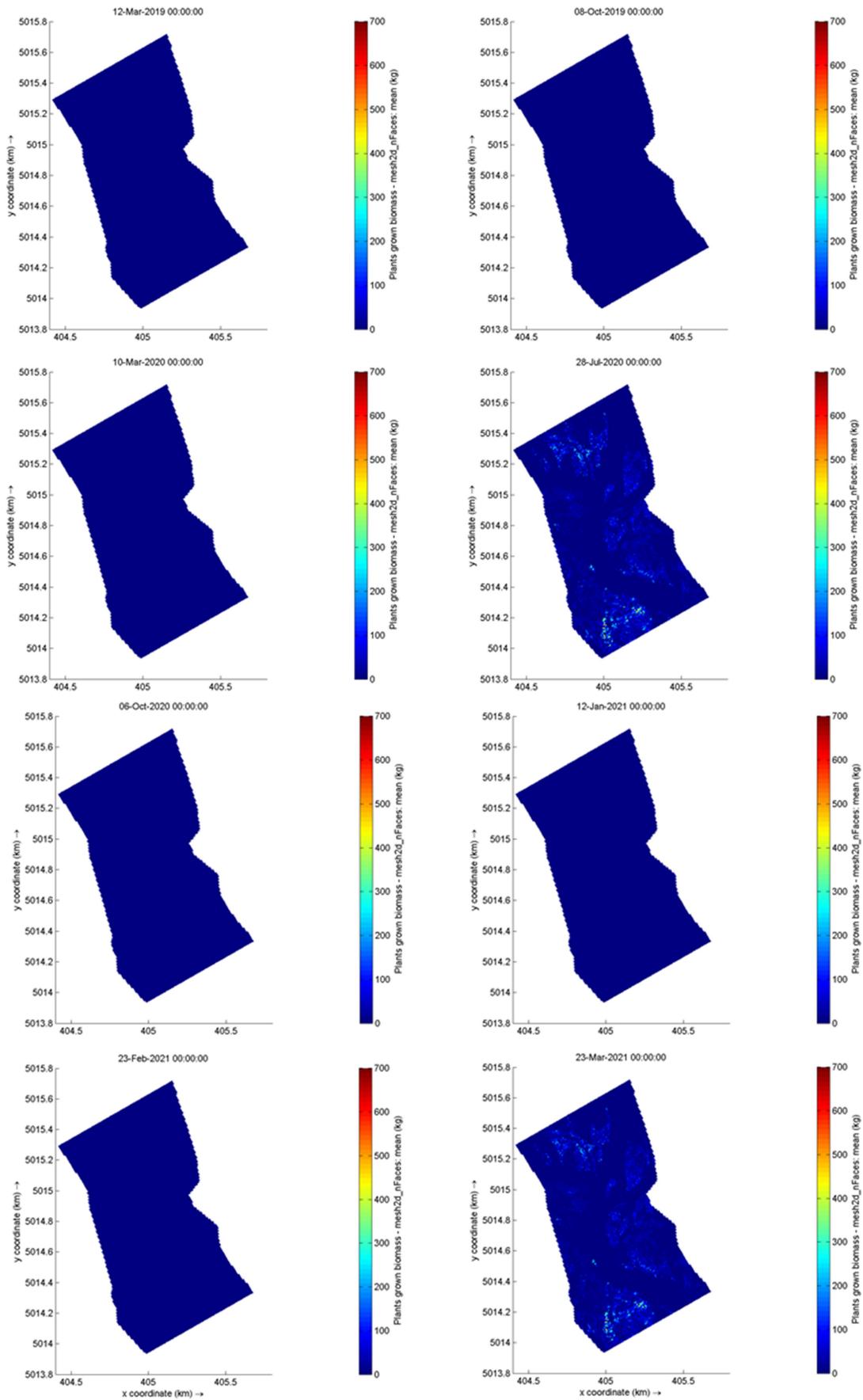


Figura 55 Mappe di biomassa cresciuta delle due specie in risultato alla simulazione dinamica ricalibrata

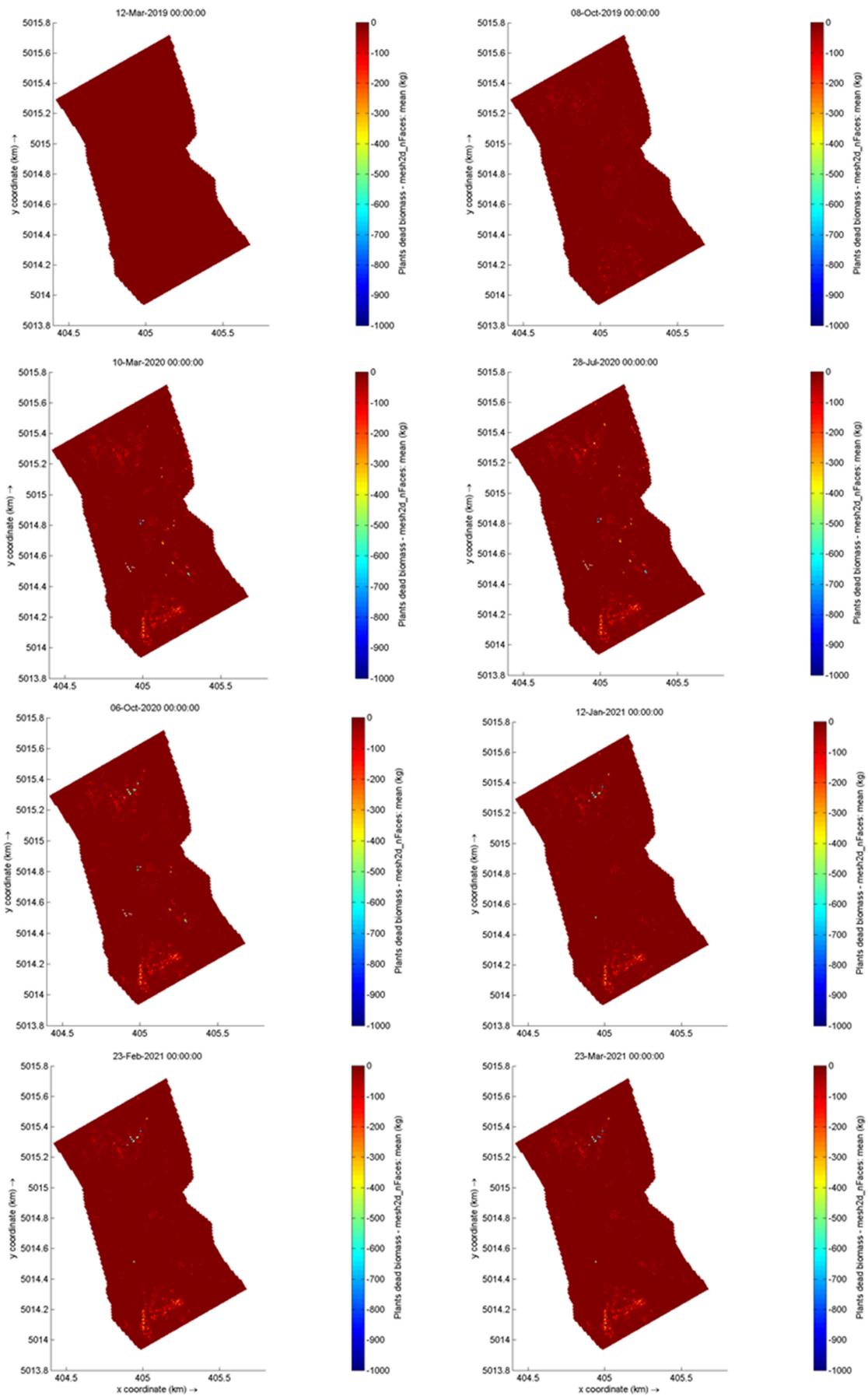


Figura 56 Mappe di biomassa deceduta delle due specie in risultato alla simulazione dinamica ricalibrata

Dall'analisi delle mappe di altezza riportate in Figura 54 e del confronto effettuato in Figura 57, è visibile come la quasi totalità degli esemplari si sia conservata, in virtù della riduzione del fattore di mortalità associato agli stress idrici. La rimozione più cospicua è osservabile in corrispondenza della traccia del canale secondario in sinistra idraulica, in seguito all'attivazione dello stesso ed all'insorgenza di condizioni prolungate di sommersione idraulica tali da generare la morte delle piante. Quanto detto è confermabile dall'osservazione in Figura 56 delle mappe di biomassa deceduta, che evidenziano come mediamente i quantitativi rimossi non eccedano 200 kg, a fronte di un valore superiore a 300 kg nel caso della simulazione non calibrata.

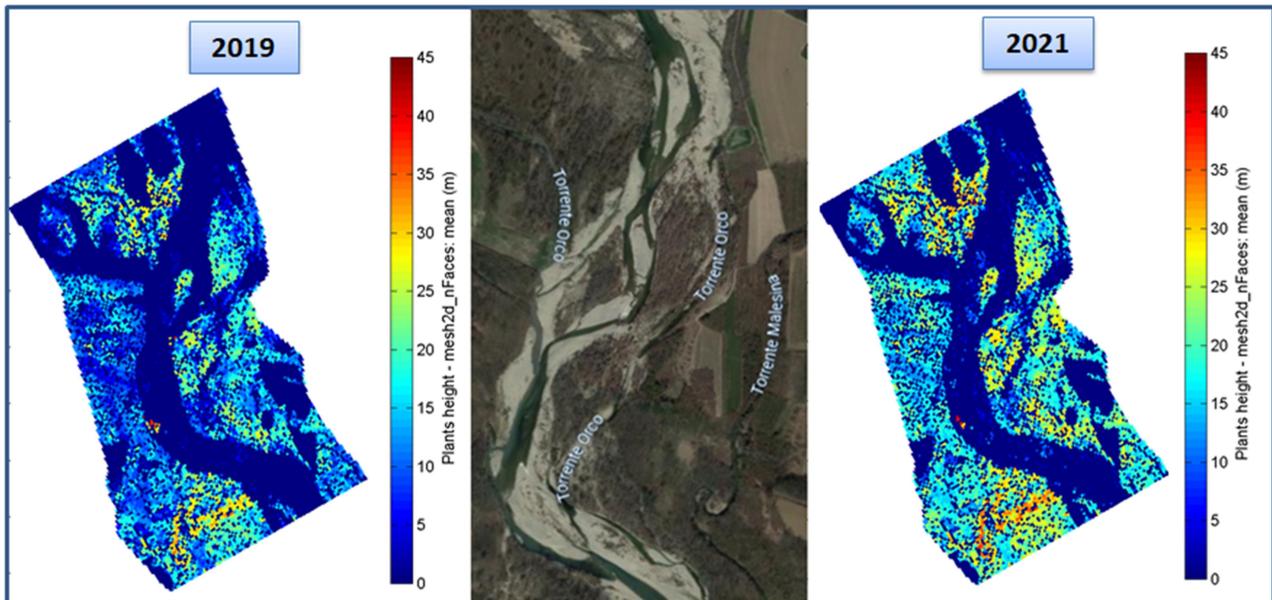


Figura 57 Confronto dei risultati del modello ricalibrato con foto aerea della zona (Google Earth, 2021)

Come auspicato e visibile in Figura 57, anche lo stanziamento di nuovi esemplari è stato sensibilmente ridotto, concentrandone la dispersione in corrispondenza delle unità di canale emerso, coerentemente con la disposizione degli esemplari ricavata dal rilievo del 2021, visibile in Figura 58.

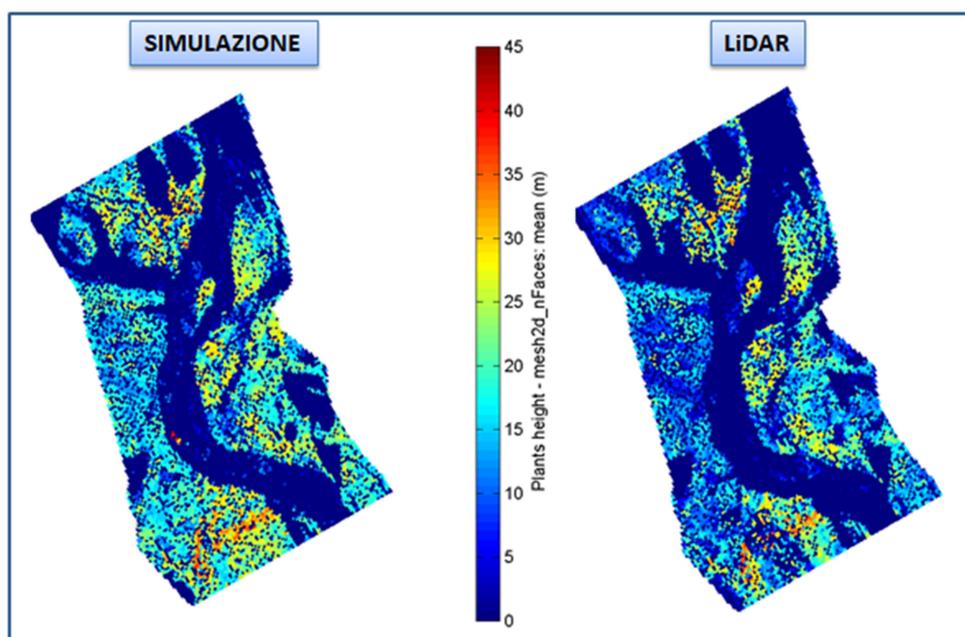


Figura 58 Confronto fra i risultati della simulazione e i dati LiDAR

Dal confronto delle mappe riportate in Figura 58 è possibile osservare la presenza di discrepanze in termini di altezza fra i risultati della simulazione e del rilievo LiDAR effettuato in data 23/03/2021. Le ragioni di tali variazioni si ritiene tuttavia siano ascrivibili all'adozione per tutti gli esemplari di ciascuna specie di uno stesso set di coefficienti della legge di crescita dei diametri, trasposto dunque anche alle altezze visto l'impiego di una legge allometrica fissa. Questi sono stati ricavati da un processo di calibrazione statistico effettuato a partire da tutti i dati di vegetazione ottenuti dai rilievi LiDAR in modo da massimizzare la robustezza statistica. Risulta dunque evidente che sia pressoché inevitabile riscontrare degli scostamenti rispetto alle condizioni reali.

Inoltre, tali variazioni evidenziano anche come l'ipotesi, comune ai precedenti lavori di ricerca, che gli stress ecologici non abbiano dirette ripercussioni sulla crescita di fusto e radici sia irrealistica, visto che le maggiori differenze si osservano nelle zone più distanti dal corso d'acqua, maggiormente soggette a condizioni siccitose.

Tale ipotesi, introdotta per ridurre la complessità del modello, non risulta tuttavia incoerente, in quanto le presenti analisi non sono condotte in un'ottica di equivalenza stretta in termini di altezza, bensì è stato assunto come parametro ecologico di riferimento la biomassa, funzione anche di diametro e frazione di copertura vegetale.

Conseguentemente, nella fase di calibrazione già citata ai paragrafi precedenti, le lacune di cui sopra sono state interamente compensate tarando i parametri di mortalità e colonizzazione in modo da ottenere una biomassa complessiva degli esemplari pari a quella ricavata dal rilievo LiDAR.

In Figura 59 e Figura 60 è proposto un confronto di maggiore dettaglio fra le riprese satellitari e gli esiti della simulazione, con indicazione delle principali zone colonizzate riscontrabili anche dalle riprese aeree. Per una migliore resa grafica il tratto è stato partizionato in un segmento di monte ed uno di valle.

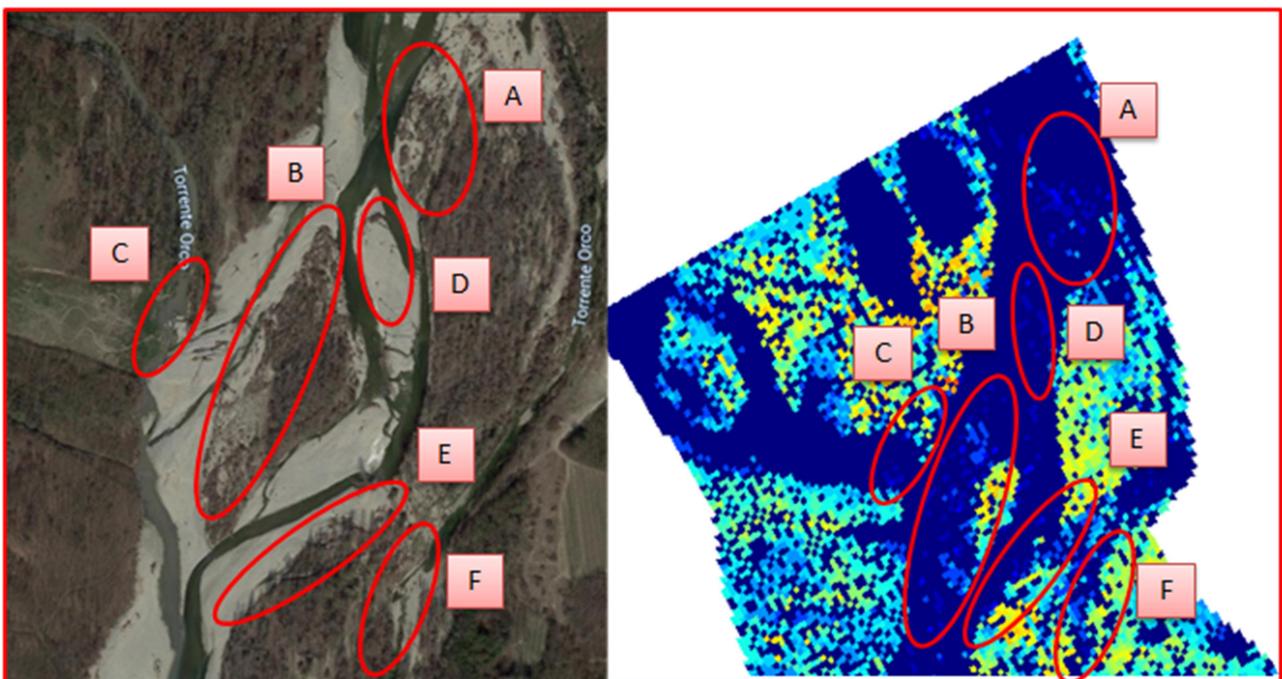


Figura 59 Confronto fra la mappa ottenuta e la foto aerea del tratto di monte con particolare delle zone colonizzate

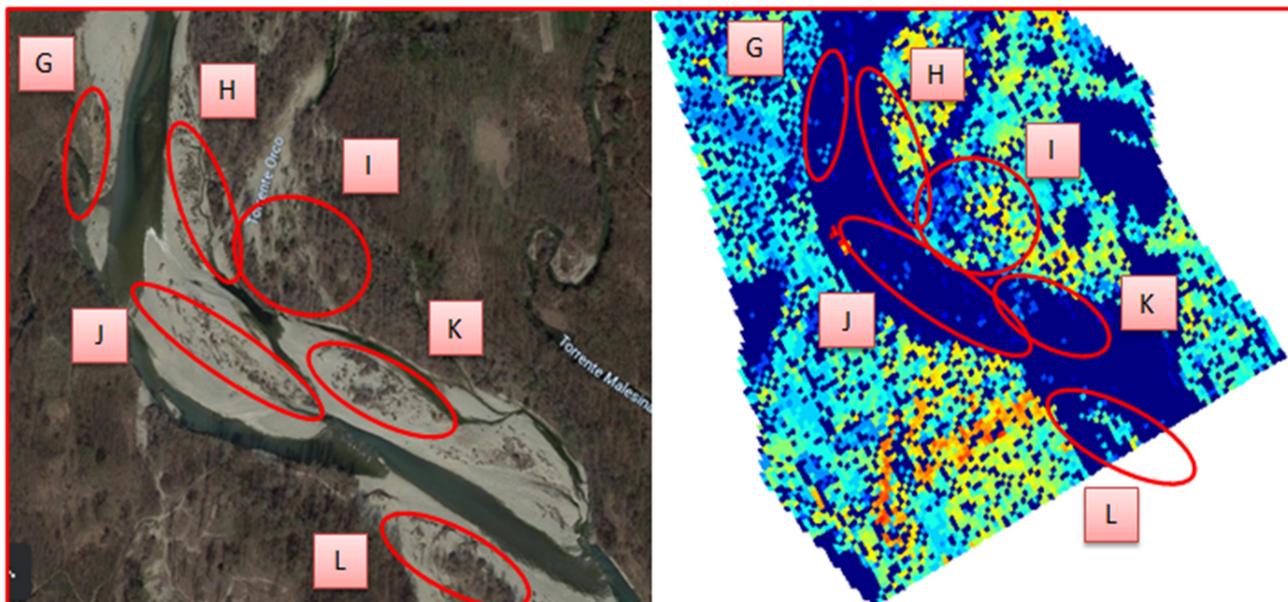


Figura 60 Confronto fra la mappa ottenuta e la foto aerea del tratto di valle con particolare delle zone colonizzate

In Figura 59 è ben visibile come nel tratto di monte, la maggiore colonizzazione abbia interessato la barra centrale già parzialmente vegetata ad inizio simulazione, designata dal marcatore grafico B, con una concentrazione degli esemplari in destra idraulica all'unità emersa, coerentemente con quanto visibile dalla ripresa aerea. In corrispondenza della zona designata come A è possibile notare la parziale vegetazione della barra laterale in sinistra idraulica.

Inoltre, anche se di misura nettamente inferiore, si ritiene degno di nota evidenziare lo stanziamento di sporadici esemplari in corrispondenza dell'altra barra centrale, designata come D, dove è possibile riscontrare la medesima frammentarietà anche dalle immagini satellitari. Analoga considerazione può essere estesa alle altre unità emerse laterali, indicate con le lettere C ed E.

Infine in corrispondenza del canale secondario in sinistra idraulica è possibile osservare che a seguito della già citata rimozione di alcuni esemplari è osservabile lo stanziamento di nuove piante, in coerenza con quanto effettivamente riscontrabile ed evidenziato con il marcatore F.

Per quanto attiene al tratto di valle, in Figura 60 è ben visibile come nuovamente, la maggior concentrazione di nuovi esemplari sia in corrispondenza delle barre centrali e laterali, coerentemente con la dinamica riproduttiva ipotizzata, strettamente legata alle fluttuazioni dei livelli idrici. In particolare, ciò è ben visibile in corrispondenza delle zone indicate con J, K ed L.

Ulteriori stanziamenti di minore portata sono visibili in corrispondenza delle aree indicate con le lettere G ed H. Inoltre, analogamente a quanto visibile nel tratto di monte, nella zona designata con la lettera I, adiacente al canale secondario riattivato, è possibile osservare una ulteriore colonizzazione.

Volendo condurre inoltre un analogo confronto per quanto attiene alla mortalità, in Figura 61 è possibile notare come le rimozioni più consistenti di esemplari abbiano interessato le zone evidenziate e designate con le lettere M, N ed O, corrispondenti rispettivamente al canale secondario già citato in precedenza, ad un cluster isolato di esemplari in sinistra idraulica e ad una zona in destra idraulica situata in un tratto in curva. In quest'ultima, la canalizzazione del flusso

verso l'estradosso ha portato alla rimozione degli esemplari ivi stanziati ed alla formazione di un'isola con quelli sopravvissuti, come visibile anche dalle riprese aeree.

In Figura 61 si riporta anche una mappa degli esemplari ad inizio simulazione, così da rendere maggiormente efficace il confronto.

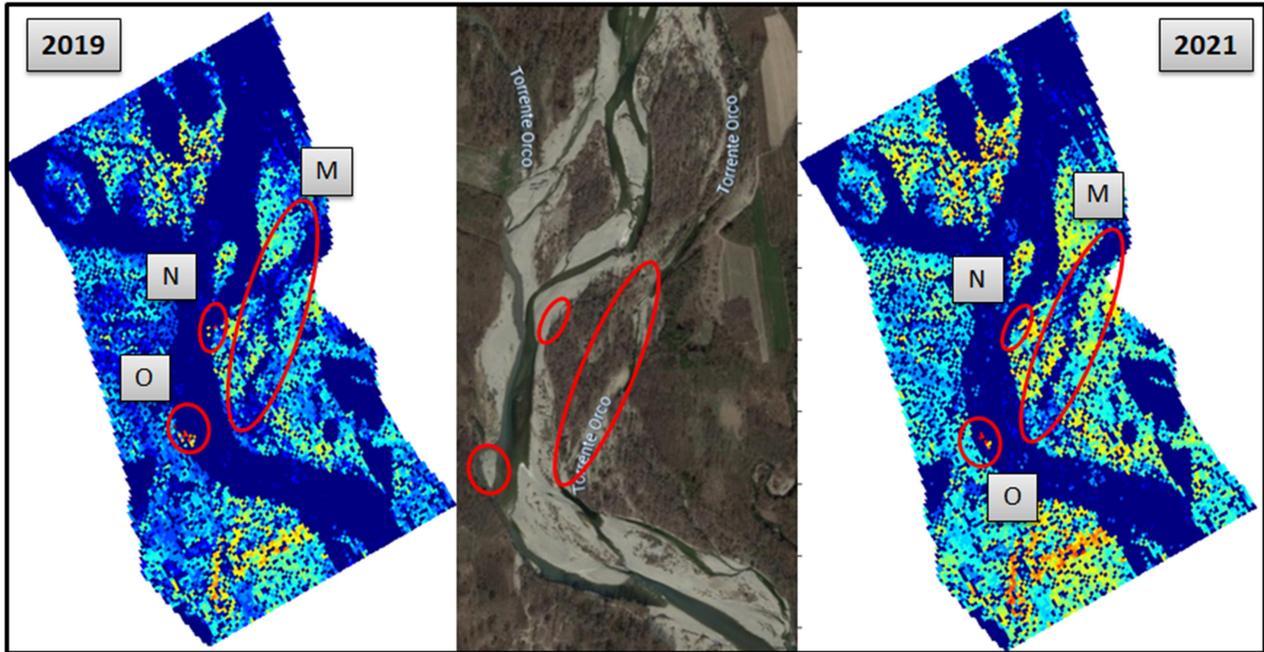


Figura 61 Confronto fra le mappe iniziali e finali e la foto aerea del tratto (Google Earth, 2021) con particolare delle zone soggette a mortalità

In linea generale, dunque, è possibile notare sin d'ora come la calibrazione effettuata sulle leggi di mortalità e riproduzione abbia consentito di ottenere una distribuzione degli esemplari molto aderente alla condizione reale.

9.3. SIMULAZIONE CON MODELLO RADICALE AVANZATO

Si procede ora alla presentazione dei risultati ottenuti dall'implementazione del modello radicale avanzato. In primo luogo si riportano in Figura 62 a titolo illustrativo gli andamenti verticali della densità di probabilità b_r , ottenuti per tre celle del dominio.

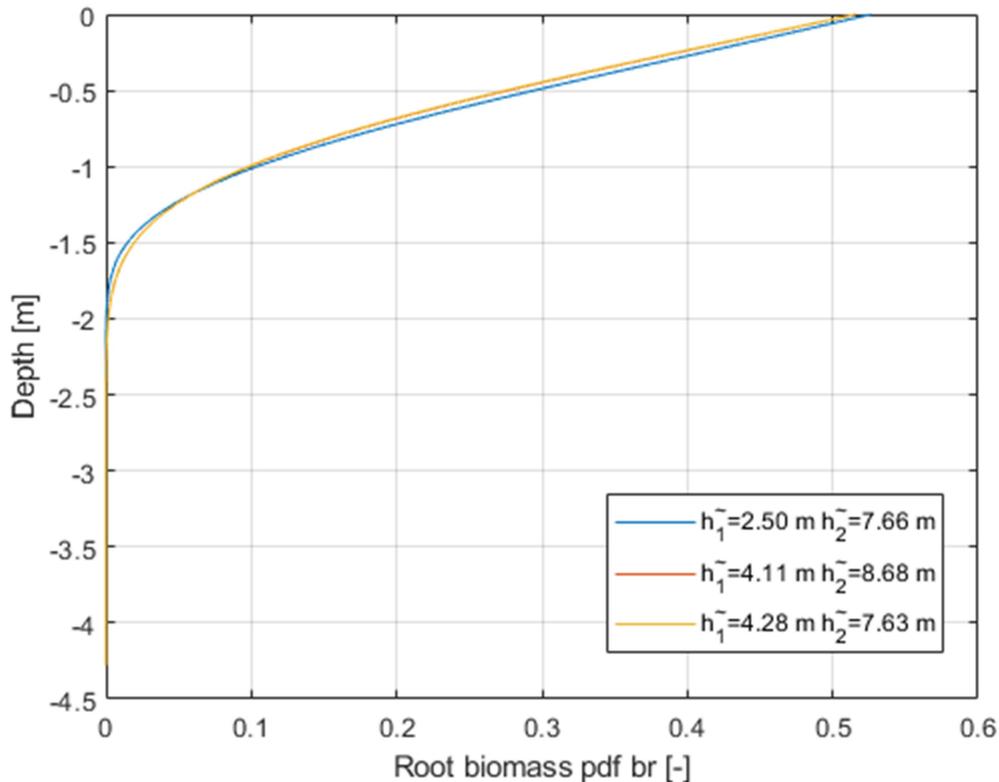


Figura 62 Probability Density Function (PDF) b_r della biomassa radicale per tre celle del dominio

Come visibile in Figura 62 In ognuno dei tre casi la densità di probabilità di biomassa si esaurisce entro la quota corrispondente al limite inferiore della zona a crescita favorita. Le lunghezze radicali iniziali ottenute corrispondono rispettivamente a 1.54 m, 2.32 m e 1.90 m.

In Figura 63 si riportano i risultati in termini di altezza degli esemplari ottenuti implementando il nuovo modello radicale ed in Figura 67 un confronto fra le altezze a termine simulazione ricavate rispettivamente dall'impiego della legge logaritmica originariamente (blu) e dalla legge stocastica (verde).

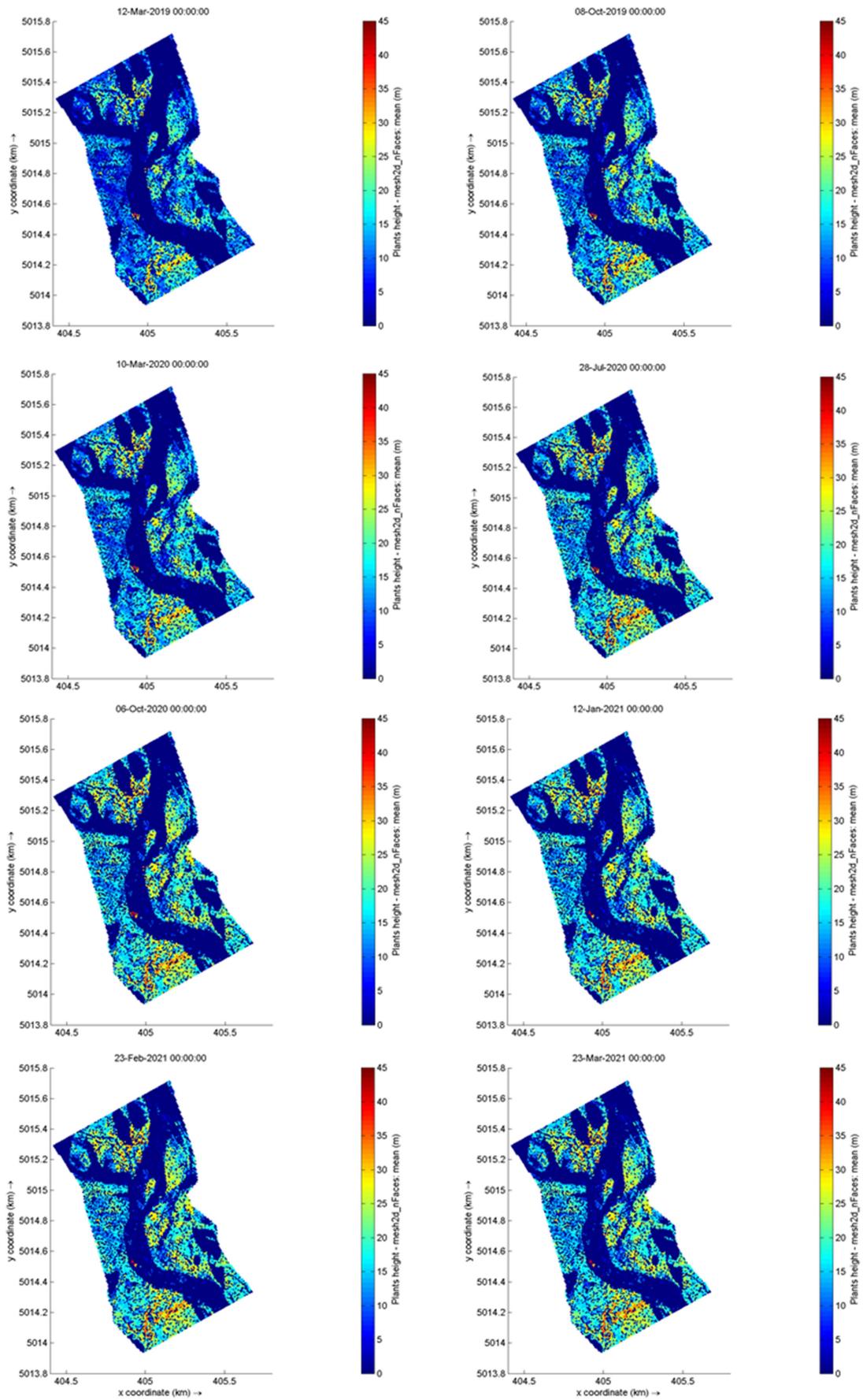


Figura 63 Mappe di altezza della vegetazione in esito alla simulazione dinamica con il modello radicale avanzato

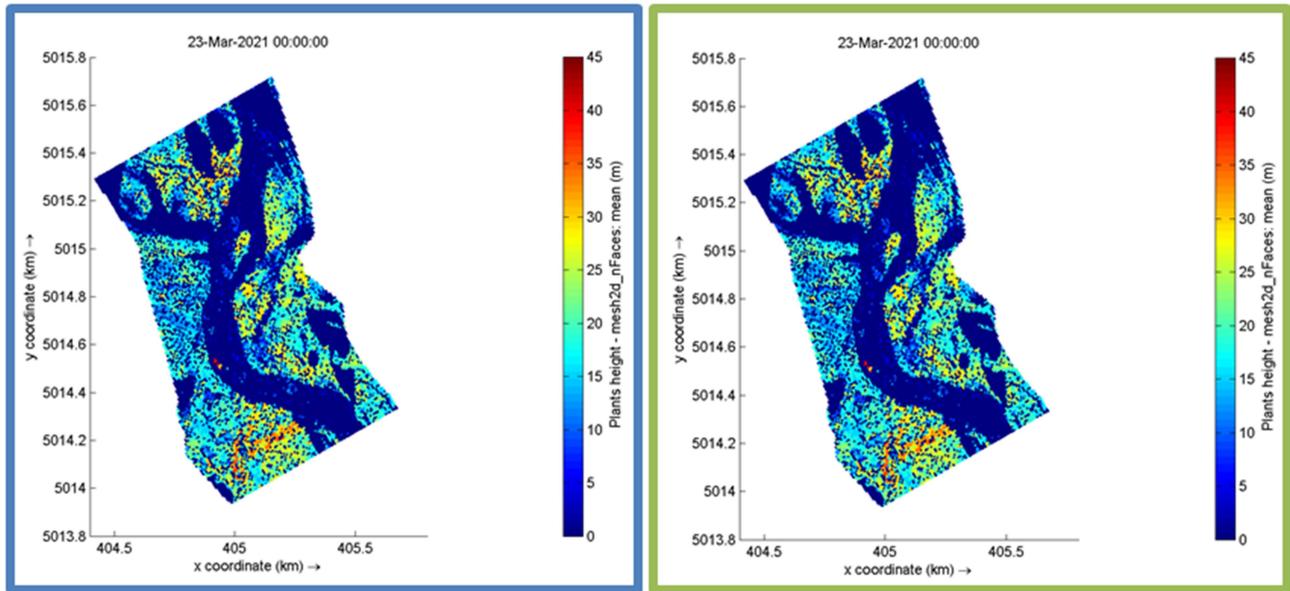


Figura 64 Mappe di altezza a fine simulazione associate alla legge logaritmica (sinistra, blu) e stocastica (destra, verde)

Dall'analisi delle mappe di altezza e dal confronto effettuato in Figura 63 e Figura 66 dei risultati in esito ai due approcci, risulta evidente come in termini di distribuzione degli esemplari non siano presenti differenze sostanziali. Tale fenomeno si anticipa sia legato alle maggiori lunghezze radicali ricavate dal nuovo modello, cui consegue una minore suscettibilità degli esemplari ai fenomeni di sottoescavazione, già intrinsecamente influenti nell'arco temporale analizzato.

In ragione della succitata similitudine, il confronto effettuato in Figura 65 fra i risultati del modello radicale stocastico e del rilievo LiDAR effettuato il 23/02/2021 evidenzia la medesima ricostruzione della distribuzione degli esemplari, caratterizzata dalla presenza delle già analizzate discrepanze in termini di altezza, indotte dall'impiego sistematico dei medesimi coefficienti della legge di crescita dei diametri, calibrati su base statistica.

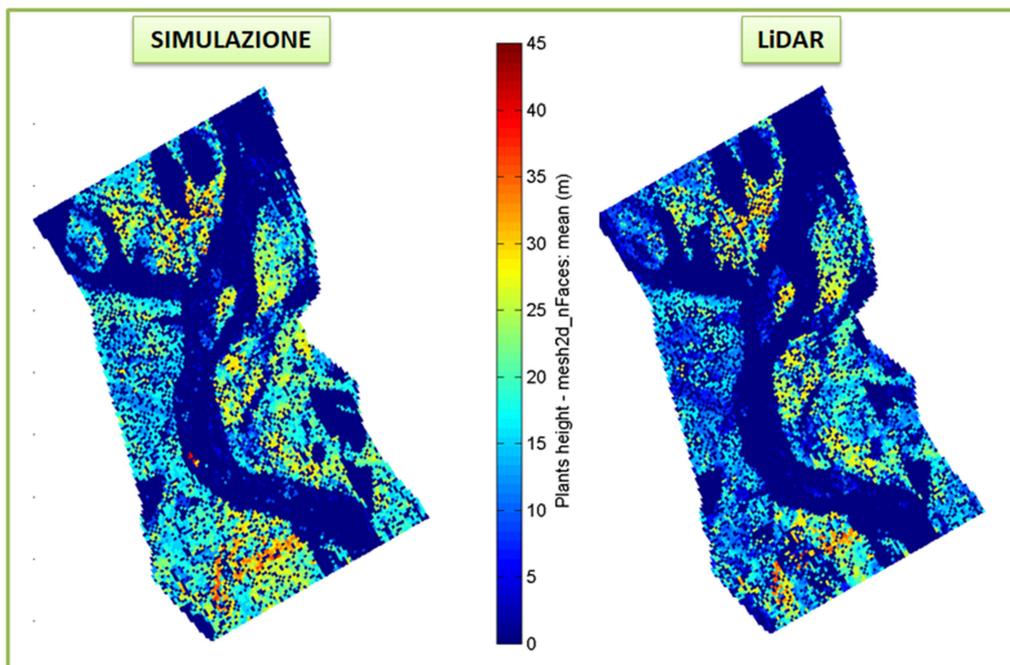


Figura 65 Confronto fra i risultati della simulazione con modello radicale stocastico e i dati LiDAR

In Figura 66 si propone inoltre il confronto fra le lunghezze radicali a termine simulazione in esito ai due approcci. In generale è possibile osservare un maggiore approfondimento ed una maggiore eterogeneità dei valori raggiunti nel caso di modello stocastico, coerentemente con l'analisi condotta cella per cella. Tali variabilità non risultano tuttavia casuali, in quanto rivelano la presenza di apparati più superficiali nelle vicinanze delle regioni di flusso attivo e più approfonditi altrove, coerentemente con lo sviluppo di architetture radicali rispettivamente di tipo *shallow* e *deep*.

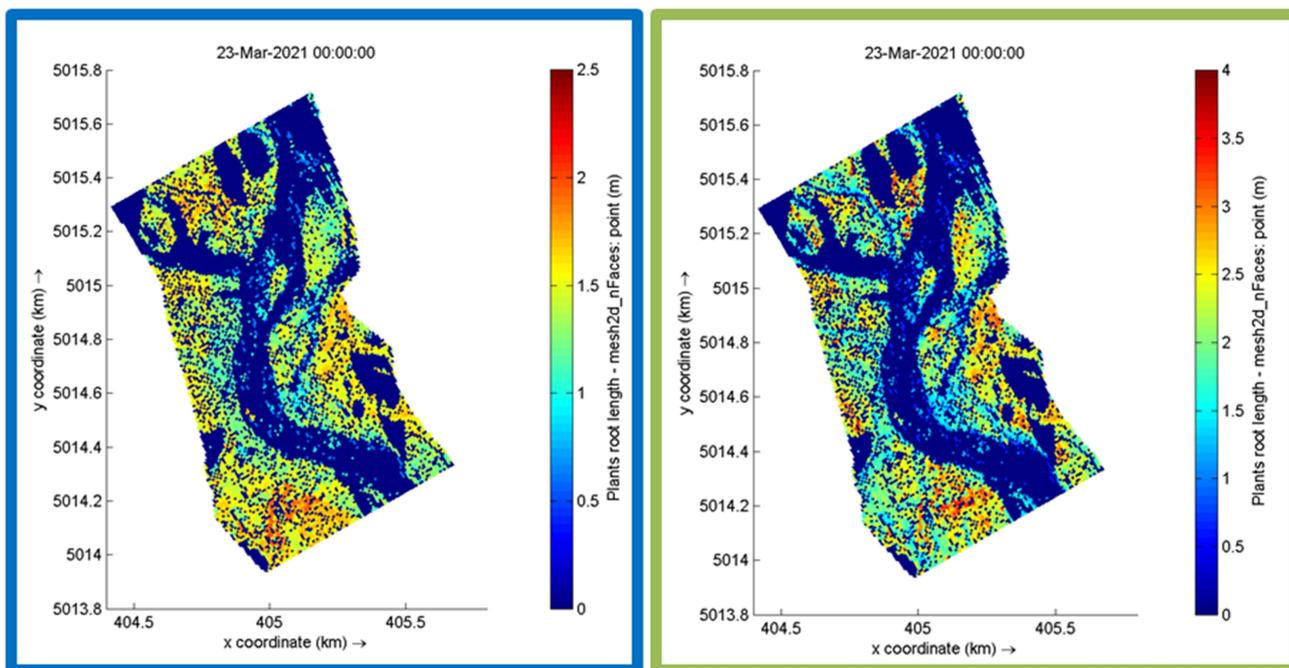


Figura 66 Lunghezze radicali finali associate alla legge logaritmica (sinistra, blu) e stocastica (destra, verde)

In Figura 67 e Figura 68 si riporta il confronto lungo l'intero periodo simulato fra le lunghezze radicali provenienti dall'impiego della legge logaritmica (blu) e di quella stocastica (verde).

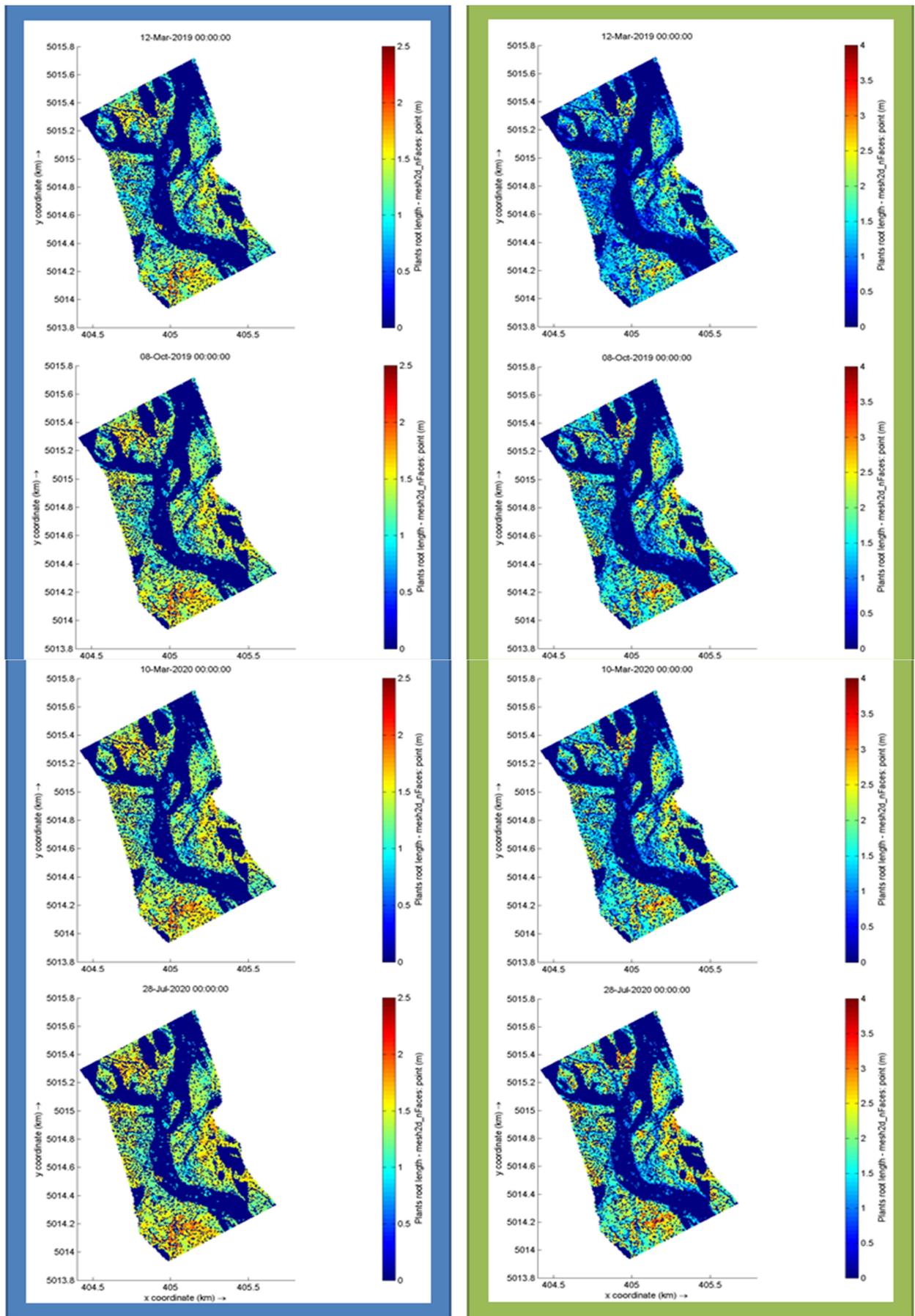


Figura 67 Lunghezze radicali associate alla legge logaritmica (sinistra, blu) e stocastica (destra, verde) sino al 2020

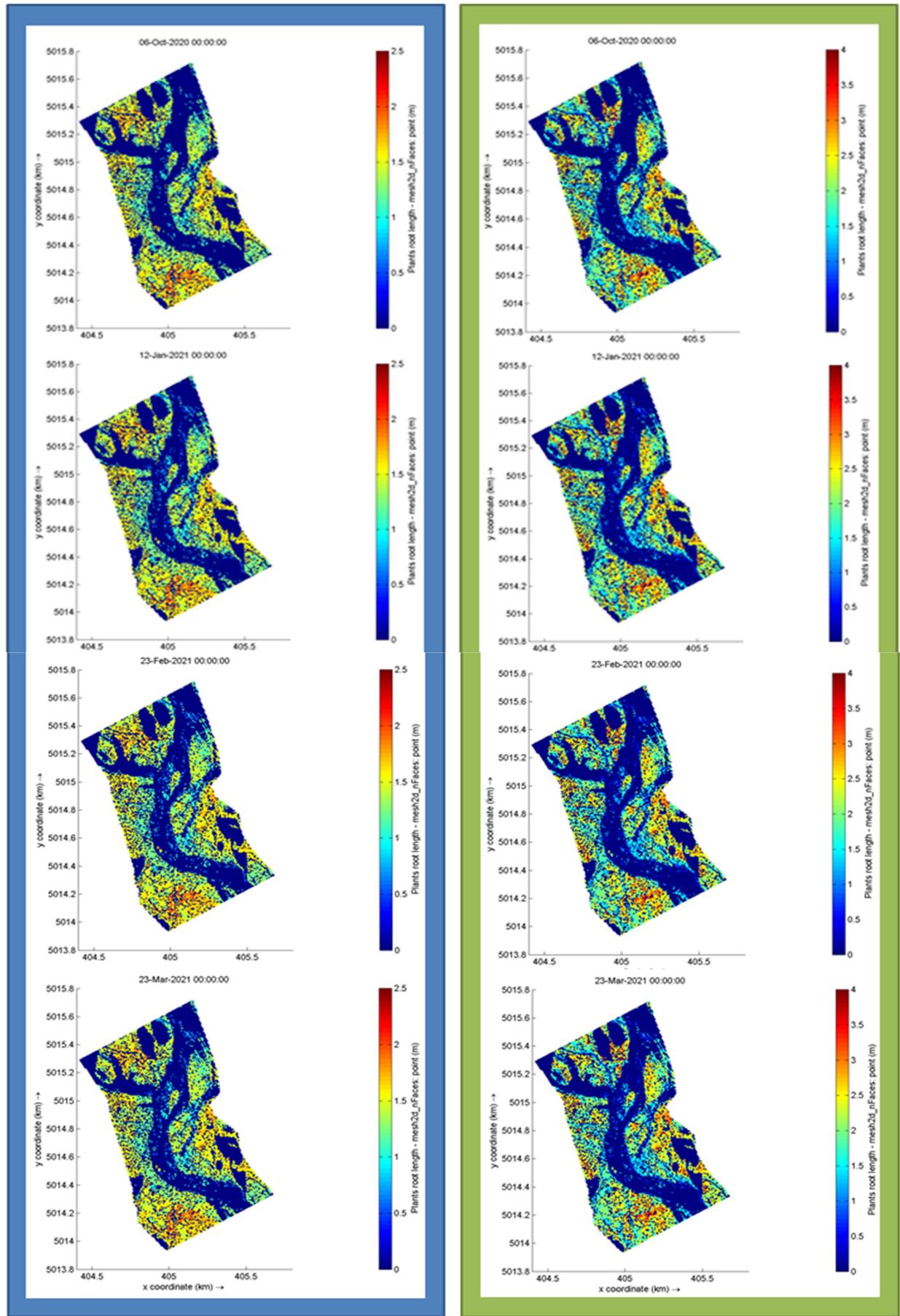


Figura 68 Lunghezze radicali associate alla legge logaritmica (sinistra, blu) e stocastica (destra, verde) sino al 2021

Concentrando l'attenzione sull'evoluzione delle lunghezze nel modello stocastico, risulta particolarmente evidente la presenza di percorsi trasversali alla vegetazione in cui l'apparato radicale risulta meno sviluppato. Tale fenomeno è ascrivibile alla presenza di canalizzazioni del flusso, non manifeste in condizioni di deflusso ordinario, lungo le quali tuttavia, la tavola d'acqua risulta più superficiale e conseguentemente le piante non necessitano di un apparato radicale particolarmente approfondito per approvvigionare acqua.

Tale risultato si ritiene particolarmente interessante in quanto fornisce un'importante informazione sulle dinamiche di flusso sotterraneo, diversamente non reperibili, data l'indisponibilità di tale tipo di informazioni fra gli esiti dei principali software di simulazione idrodinamica.

Quanto sopra detto è suffragabile dal confronto effettuato in Figura 69, in cui la mappa radicale è accostata a quella dei tiranti durante l'evento di piena di Ottobre 2020 al fine di evidenziare i percorsi di flusso di cui sopra.

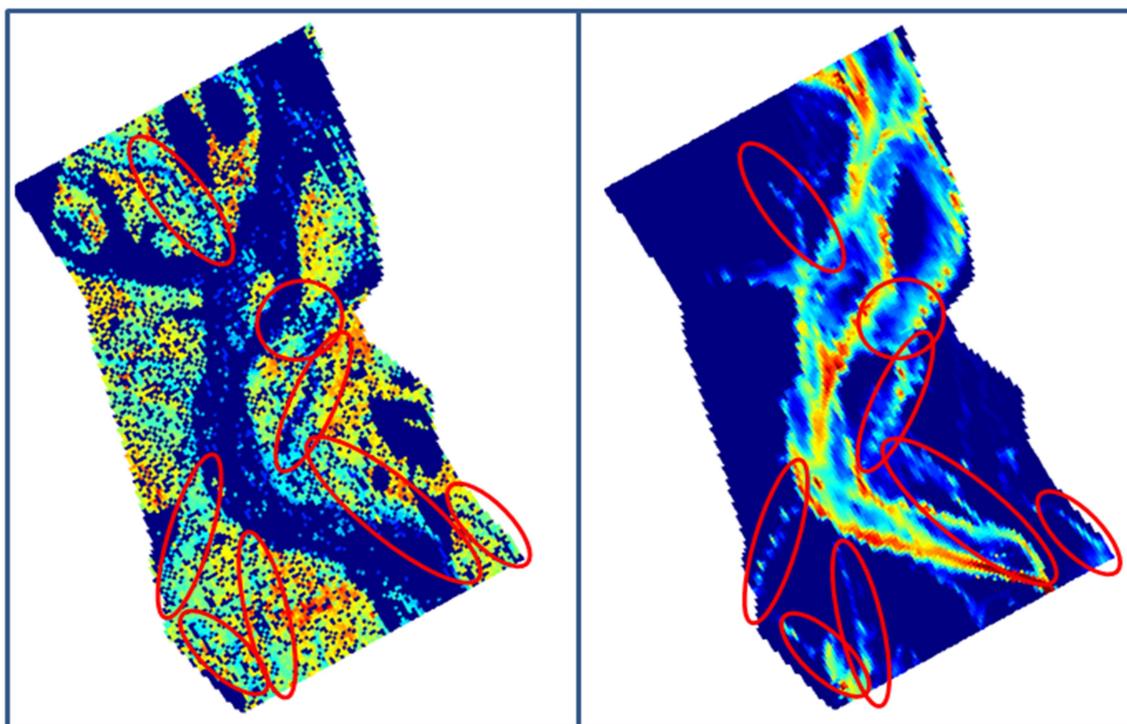


Figura 69 Confronto fra la mappa di lunghezza radicale e i tiranti in condizioni di piena con indicazione delle canalizzazioni osservabili

Si precisa che l'impiego della mappa in condizioni di piena è legato alla possibilità di osservare per portate più elevate dinamiche di deflusso ordinariamente non visibili. Inoltre, si specifica che l'impossibilità di osservare l'attivazione di tutte le canalizzazioni individuate dalle distribuzioni radicali è imputabile alle condizioni di deflusso prese a confronto, severe ma non in modo sufficiente ad evidenziare tutta la circolazione sotterranea.

10. CONCLUSIONI

L'analisi critica dei risultati condotta al capitolo precedente ha portato allo sviluppo di una serie di considerazioni.

In primo luogo, nell'arco temporale analizzato gli stress principali indotti dai processi fluviali alla vegetazione sono stati quelli associati ai fenomeni di disseccamento ed in minor parte a quelli di anossia per sommersione idraulica. Le variazioni di batimetria indotte dal trasporto solido e le tensioni al fondo non sono state di magnitudo tale da attivare le corrispondenti cause di mortalità.

L'esecuzione di un primo set di simulazioni con il setup basato sui valori identificati da van Oorschot et al. (2016) ha evidenziato l'inadeguatezza al caso studio dei coefficienti relativi alla mortalità per disseccamento ed alla colonizzazione. In particolare, il fattore lineare della legge di mortalità dose-effetto inizialmente fissato a 0.75 per entrambe le specie è risultato eccessivamente gravoso, conducendo alla rimozione pressoché completa degli esemplari entro il periodo di simulazione. Dal punto di vista della colonizzazione, invece, il confronto fra i nuovi esemplari individuati nella simulazione e quelli effettivamente censiti in sede del volo LiDAR del 23/03/2021 ha evidenziato come di contrario, la condizione iniziale risultasse eccessivamente lasca, portando allo stanziamento di un numero di esemplari ampiamente maggiore di quelli effettivamente presenti.

Conseguentemente, si è resa necessaria l'esecuzione di un'ulteriore calibrazione del modello, condotta in modo tale da riprendere al meglio la distribuzione reale degli esemplari, mantenendo l'equivalenza in termini di biomassa totale degli esemplari presenti nella zona analizzata.

Tale procedura ha portato alla riduzione del parametro lineare della legge dose-effetto ad un valore di 0.015 ed all'introduzione di una ulteriore condizione allo stanziamento dei nuovi esemplari, corrispondente all'osservazione nella prima settimana a seguito dell'evento di deposizione di livelli idrici sempre inferiori a 0.10 m.

L'analisi dei risultati della modellazione calibrata ha evidenziato un buon grado di ricostruzione dello scenario reale, con concentrazione della colonizzazione alle isole ed alle porzioni delle barre laterali più prossime all'alveo e con la rimozione di esemplari in corrispondenza di un canale in sinistra idraulica, riattivato nell'arco temporale simulato.

Il confronto dei risultati con la mappa proveniente dal rilievo LiDAR del 23/03/2021 ha portato all'osservazione della presenza di discrepanze in termini di altezze degli esemplari, riconducibili tuttavia all'adozione in sede di modellazione di un set unico di coefficienti della legge di crescita dei diametri, e conseguentemente delle altezze, calibrati statisticamente sulla base dei dati di tutti gli esemplari censiti lungo l'intero tratto rilevato. Inoltre, tali differenze hanno posto in luce la scarsa realistica dell'ipotesi di assenza di ripercussione degli stress ecologici sulla crescita degli esemplari. Tale assunzione, comune ai lavori presi a riferimento, risulta tuttavia ragionevolmente impiegabile in quanto l'analisi è stata condotta in un'ottica di equivalenza in termini di biomassa e non di altezza.

In risultato all'implementazione del modello radicale stocastico è stato possibile osservare maggiori approfondimenti degli apparati rispetto a quelli stimati a partire dalle leggi logaritmiche ed una maggiore eterogeneità in virtù della valutazione cella per cella dei parametri determinanti la lunghezza radicale. Tali variabilità non risultano casuali, in quanto corrispondenti ad una ragionevole superficialità degli apparati nelle zone antistanti i canali di flusso attivi e ad un maggior approfondimento per quelli più distanti.

In termini di altezza non si sono riscontrate sostanziali variazioni rispetto al modello originario, data l'assenza di fenomeni di sottoescavazione di magnitudo tale da indurre mortalità negli esemplari e conseguentemente differenze fra i risultati dei due approcci.

A latere della modellazione è stata evidenziata la possibilità di dedurre informazioni relative al deflusso sotterraneo sia direttamente, tramite l'algoritmo di estrazione delle soggiacenze, che indirettamente, analizzando la distribuzione delle lunghezze radicali della vegetazione in alveo, rivelatrici della presenza di direzioni privilegiate di deflusso.

Tali osservazioni consentono in definitiva di ritenere questo nuovo approccio di modellazione efficacemente validato, aprendone le possibilità di impiego in diversi contesti, al di là di quello puramente idraulico.

Possibile applicazione può essere infatti trovata in ambito forestale, volendo ricostruire l'evoluzione temporale della vegetazione in modo da dedurre le pressioni ecologiche indotte dal contesto fluviale, evidenziando quelle di spicco nella vita degli esemplari. Nel contesto idraulico, invece, ciò può essere utilizzato per procedere alla simulazione di scenari maggiormente realistici, come auspicato nel capitolo introduttivo, con la possibilità di evidenziare le variazioni occorse alle variabili idrauliche rispetto all'approccio di modellazione tradizionale.

L'impiego del presente sistema, non è tuttavia da intendersi limitato all'ambito della ricostruzione di scenari passati, bensì potrebbe risultare particolarmente significativa nelle analisi previsionali condotte nei contesti di river engineering e river restoration.

Basti pensare ad esempio alla possibilità di utilizzo per la valutazione dell'impatto creato alla vegetazione riparia dall'esecuzione di interventi sull'asta fluviale, quali realizzazioni di invasi, sistemazioni di fondo, rettificazioni del tracciato o modifiche dell'officiosità idraulica dell'alveo attivo. Vicendevolmente, potrebbe trovare applicazione anche nella previsione degli effetti indotti sui processi idraulici e sulla vegetazione stessa dall'esecuzione di interventi di ripopolamento forestale o disboscamento. In merito poi a quest'ultimo caso, immaginando di implementare il modello su una scala spaziale più ampia, esso potrebbe essere utile anche nelle analisi legate agli aspetti di cambiamento climatico.

Al di là della vastità di possibili applicazioni di questo nuovo approccio di modellazione, occorre sottolineare come quanto sinora fatto sia solo una prima versione e che per tale motivo presenti una serie di aspetti che potenzialmente potrebbero essere raffinati.

In particolare, in riferimento alle leggi di crescita, sarebbe auspicabile poter effettuare una distinzione per ogni cella o quantomeno per cluster omogenei, così da modellare le naturali disparità fra gli esemplari, legate ad esempio alla posizione rispetto all'alveo attivo, a differenti coefficienti di crescita o condizioni di salute e stress ecologico. In tal senso poi, tali leggi potrebbero essere rivalutate, al fine di includere le diminuzioni di crescita indotte dai fenomeni di mortalità. Questo perché attualmente vige una distinzione secondo la quale la crescita avviene indistintamente dall'insorgenza di mortalità e quest'ultima interessa esclusivamente la frazione di copertura vegetale delle celle. Tale funzionamento, tuttavia, non risulta particolarmente realistico, in quanto la presenza di pressioni ecologiche, genera un'inibizione alla crescita dei segmenti aerei e radicali. Conseguentemente, l'adozione di leggi di crescita e mortalità maggiormente raffinate ed interconnesse potrebbe consentire il raggiungimento di un risultato ancora più realistico.

Per quanto riguarda le leggi di mortalità, sarebbe opportuno procedere ad una revisione, in particolar modo per quanto riguarda quella associata a disseccamento. Attualmente, infatti, essa prescrive per tutti gli esemplari una relazione dose-effetto governata dai medesimi coefficienti, in

cui la pressione ecologica corrisponde a numero di giorni in cui nella cella si è registrato un tirante nullo o comunque inferiore alla soglia di evaporo-traspirazione.

Tale relazione, tuttavia, non è realisticamente applicabile allo stesso modo per gli esemplari in regione di alveo attivo, giornalmente a contatto con l'acqua, e quelli situati nelle porzioni più distanti delle fasce riparie, lambiti dai livelli solo eventualmente in condizioni di piena. Conseguentemente, sarebbe opportuno introdurre quantomeno una distinzione dei coefficienti della legge di mortalità basata sulla distanza rispetto all'alveo attivo, oppure individuare un parametro maggiormente descrittivo degli stress siccitosi, quale ad esempio la distanza fra la tavola d'acqua e la radice più sviluppata.

L'altro punto nevralgico su cui si ritiene possibile introdurre delle migliorie è la riproduzione degli esemplari. Attualmente, infatti, si considera solo il meccanismo di riproduzione sessuata per dispersione di semi. Per le specie riparie, tuttavia, gioca un ruolo fondamentale anche il meccanismo asessuato legato ai fenomeni di diffusione radicale e di attecchimento di rifiuti vegetali, ossia segmenti di radici o parti aeree distaccatisi dalla pianta madre in grado di porre radici (Vesipa et al., 2007), trasportati e depositi dalla corrente.

In termini funzionali, si potrebbe pensare infine di modificare la struttura dell'algoritmo, focalizzando l'analisi sulle singole piante. Questo perché allo stato attuale, esso è strutturato in modo da individuare gli esemplari appartenenti a ciascuna cella e ad attribuire a ciascuna di esse le relative caratteristiche ecologiche, così da impostare un'analisi cella per cella in coerenza con i dati disponibili in esito alle simulazioni idro-morfodinamiche e agli input da esse richiesti.

Tale funzionamento potrebbe essere tuttavia modificato, compatibilmente con i requisiti di efficienza computazionale, impostando un'analisi sui singoli esemplari ed effettuando l'interpolazione dei dati sulle celle del dominio computazionale solo poco prima della somministrazione degli input al software di simulazione. In tal caso occorrerebbe però rivalutare con molta attenzione le modalità di calcolo di densità e frazione di copertura vegetale, nonché gli aspetti di mortalità e riproduzione, strettamente correlati a quest'ultimo parametro.

RINGRAZIAMENTI

Ed ecco infine giunto il momento di porgere i miei ringraziamenti.

Si chiude fra queste parole un capitolo importante della mia vita, fatto di impegno e tanti sacrifici, ma anche di tante soddisfazioni ma soprattutto di moltissime risate.

E' stata un'esperienza unica, bellissima e molto intensa, in certi periodi però così difficile da farmi credere che non ci fosse più luce. Ma quando io non sono stata capace di vederla, è stata lei a mostrarsi a me, negli occhi di chi ogni giorno ha gioito per le mie vittorie e ha sofferto con me tendendomi una mano ad ogni mia caduta. Di questo devo ringraziare voi, Mamma, Papà, Daniele, Davide e tutta la mia famiglia, per l'affetto, il supporto ma soprattutto per la dose di pazienza, non trascurabile, che avete mostrato nel sopportare i malumori dei periodi più concitati.

Al di là di questo, ciò che porterò sempre nel cuore saranno le infinite risate che hanno colorato ogni giorno di questa avventura. I ricordo di quelle pause pranzo sempre troppo corte e spesso troppo chiacchierose, di quei pomeriggi passati a studiare sotto il sole dei giardini delle I, di quelle battute terribili con cui ostinatamente tediavo i miei malcapitati vicini di banco e di quelle meravigliose serate che ho condiviso con persone stupende. Già, perché questa esperienza mi ha permesso di conoscere tante persone per me diventate molto speciali, e che ora vorrei ringraziare dal profondo del cuore. Grazie ragazzi di aver condiviso con me tutto questo tempo e tutte quelle risate. Con voi ho vissuto i momenti fra i più belli della mia vita e ho potuto contare su di voi in ogni difficoltà.

Per questo vi ringrazio infinitamente Pierpaolo, Martina, Alessia, Alessandra, Francesco, Giorgia, Stefano e tutti i partecipanti di quel meraviglioso e strampalato gruppo. Le nostre strade si sono incrociate in punti diversi di questo cammino ma ho sempre avuto la sensazione di conoscervi da sempre e posso dire con certezza che senza di voi questa esperienza non sarebbe stata la stessa.

Un ringraziamento speciale va ad una sorella che tanti anni fa ho scoperto di avere, con cui ho costruito ricordi meravigliosi fatti di giornate di sole, chiacchiere e patatine fritte, di serate al pub e tanta felicità. Grazie Giò a te e a tutta la tua famiglia per aver incrociato la mia strada e averla condivisa sino a qui, facendomi sentire una vostra sorella, figlia e nipote.

Un grazie poi va a tutte quelle persone che ho conosciuto nel corso dell'ultimo anno e che mi hanno mostrato ogni giorno il valore del rispetto, della collaborazione, dell'inclusione e della comprensione.

A tutti voi non smetterò mai di essere riconoscente, per aver trasformato questo viaggio in una delle avventure più pazze, esilaranti, sorprendenti ed emozionanti della mia vita.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Abramowitz, M., & Stegun, I. (1964). *Handbook of Mathematical Functions*. Washington D.C. U.S.A.: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Anagrafica stazioni*. (2021). Tratto il giorno Settembre 26, 2021 da ARPA Piemonte:
https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/acqua/osservazioni-in-tempo-reale/rete-meteo-idrografica/anagrafica-stazioni.html?delta=2&ID_VENUE=21650
- Banca dati idrogica*. (2022). Tratto il giorno Gennaio 2022 da ARPA Piemonte:
https://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/accesso-ai-dati/annali_meteoidrologici/annali-meteo-idro/banca-dati-idrologica.html
- Baptist, M., Babovic, V., Rodriguez Uthurburu, J., Uittenbogaard, R., Mynette, A., & Verwey, A. (2007). On inducing equations for vegetation resistance. *Journal of Hydraulic Research*, 45(4), 435-450. DOI:<https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521778>
- Bollettino idrologico di sintesi*. (2022). Tratto il giorno Gennaio 15, 2022 da ARPA Piemonte:
<http://www.arpa.piemonte.it/rischinaturali/tematismi/acqua/risorsa-idrica/H-Q-giornaliere.html>
- Botkin, D., Janak, J., & Wallis, J. (1972). Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 60, 849-872. DOI:10.2307/2258570
- Braatne, J., Rood, S., & Heilman, P. (1996). *Life history, ecology and conservation of riparian cottonwoods in north America*. Ottawa: NRC Research Press.
- Brückner, M., Braat, L., Schwartz, C., & Kleinhans, M. (2020). What Came First, Mud or Biostabilizers? Elucidating Interacting Effects in a Coupled Model of Mud, Saltmarsh, Microphytobenthos and Estuarine Morphology. *JGR Earth Surface*. DOI:<https://doi.org/10.1029/2019WR026945>
- Brückner, M., Schwartz, C., van Dijk, W., & van Oorschot, M. (2019). Salt Marsh Establishment and Eco-Engineering Effects in Dynamic Estuaries Determined by Species Growth and Mortality. *JGR Earth Surface*. DOI:<https://doi.org/10.1029/2019JF005092>
- Camporeale, C. (A.A. 2020-2021). Meccanica dei sedimenti. In *dispense corso di Idraulica Fluviale c.d.L. Magistrale in Ing. Civile Idraulica*.
- Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2006). Riparian vegetation distribution induced by river flow variability: A stochastic approach. *Water Resources Research*, 42. DOI:<https://doi.org/10.1029/2006WR004933>
- Camporeale, C., Perucca, E., & Ridolfi, L. (2013). Modeling the interactions between river morphodynamics and riparian vegetation. *Reviews of Geophysics*, 51(3), 379-414. DOI:<https://doi.org/10.1002/rog.20014>
- Canadell, J., Jackson, R., Ehleringer, J., Mooney, H., Sala, O., & Schulze, E. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 51(3), 583-595. DOI:10.1007/BF00329030

- Caponi, F., & Siviglia, A. (2018). Numerical modelling of plant root controls on gravel bed river morphodynamics. *Geophysical Research Letters*, 45, 9013-9023. DOI:<https://doi.org/10.1029/2018GL078696>
- Caponi, F., Koch, A., Bertoldi, W., Vetsch, D., & Siviglia, A. (2019). When does Vegetation Establish on Gravel Bars? Observations and Modelling in the Alpine Rhine River. *frontiers in Environmental Science*. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00124>
- Caponi, F., Vetsch, D. F., & Siviglia, A. (2020). A model study of the combined effect of above and below ground plant traits on the ecomorphodynamics of gravel bars. *scientific reports*, 10:17062.
- CarToView. (2021). Tratto il giorno Dicembre 2021 da Città Metropolitana di Torino: <http://www.cittametropolitana.torino.it/cartoview/>
- Delft3D Flexible Mesh Suite-Release notes. (2019, Gennaio 25). Tratto il giorno Ottobre 10, 2021 da <https://www.deltares.nl/app/uploads/2019/02/Release-notes-Delft3D-FM-Suite-2019.pdf>
- D-Flow Flexible Mesh User Manual. (2021, Marzo 18). Tratto il giorno Dicembre 2021
- D-Morphology User Manual. (2022, Febbraio 11). Tratto il giorno Febbraio 2022 da https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/D-Morphology_User_Manual.pdf
- Fotherby, L., Huang, J., & Greimann, B. (s.d.). Vegetation modeling impacts, evolution and competition processes to determine riparian vegetation dynamics. *Ecohydrology (early view)*.
- Geerling, G., Ragas, A., Leuven, R., van Den Berg, J., Breedveld, M., Liefhebber, D., & Smits, A. (2006). Succession and rejuvenation in floodplains along the river Allier (France). *Hydrobiologia*, 565(1), 71-86. DOI: 10.1007/s10750-005-1906-6
- Google Earth. (2021). Tratto il giorno Dicembre 30, 2021 da <https://earth.google.com/web/>
- Guilloy-Froget, H., Muller, E., Barsoum, N., & Hughes, F. (2002). Dispersal, germination and survival of *Populus Nigra* (Salicaceae) in changing hydrologic conditions. *Wetlands*(22), 478-488. DOI: [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2002\)022\[0478:DGASOP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2002)022[0478:DGASOP]2.0.CO;2)
- INFC. (2003, Giugno 3). Tratto il giorno Settembre 10, 2021 da https://www.inventarioforestale.org/sites/default/files/datiinventario/Cla_veg.pdf
- Kleyer, M., Bekker, R., Knevel, I., Bakker, J., Thompson, K., Sonnenschein, M., . . . Peco, B. (2008). The LEDA Traitbase: a database of life-history traits of the Northwest European flora. *Journal of Ecology*, 96(6), 1266-1274. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2008.01430.x>
- Latella, M. (2018). *Webthesis*.
- Mahooney, J., & Rood, S. (December 1998). Streamflow requirements for cottonwood seedling recruitment-An integrative model. *WETLANDS Vol. 18 No. 4*. DOI:10.1007/BF03161678
- Miles, P., & Smith, W. (2009). Specific Gravity and Other Properties of Wood and Bark for 156 Tree Species Found in North America. *US Department of Agriculture, Forest Service. Northern Research Station*, 38. DOI: <https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38>

- Peters, B. (2002). *Successie van natuurlijke uiterwaardlandschappen*. Dal: Bureau Drift and Katholieke Universiteit Nijmegen.
- Politecnico di Torino DIATI. (2020). *Attività di supporto tecnico scientifico alla progettazione preliminare di opere di gestione dei sedimenti del torrente Orco*.
- Redoglia, C. (2021). *Webthesis*.
- Ridolfi, L., D'Odorico, P., & Laio, F. (2011). *Noise Induced Phenomena in the Environmental Sciences*. New York USA: Cambridge University Press.
- Sistema Informativo Forestale Regionale (SIFOR)*. (2021). Tratto il giorno Gennaio 23, 2022 da Regione Piemonte: <https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/sistema-informativo-forestale-regionale-sifor>
- Tron, S., Laio, F., & Ridolfi, L. (2014). Effect of water table fluctuations on phreatophytic root distribution. *Journal of Theoretical Biology*(360), 102-108. DOI: 10.1016/j.jtbi.2014.06.035
- van Oorschot, M., Kleinhans, M., Geerling, G., & Middelkoop, H. (2016). Distinct patterns of interaction between vegetation and morphodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 791-808.
- van Oorshot, M., Kleinhans, M., Geerling, G., Egger, G., Leuvner, R., & Middelkoop, H. (2017). Modeling invasive alien plant species in river systems: Interaction with native ecosystem engineers and effects on hydro-morphodynamic processes. *Water Resources Research*(53), 6945-6969. DOI:10.1002/esp.3864
- Van Splunder, I., Coops, H., Voeselek, L., & Blom, W. (1995). Establishment of alluvial forest species in floodplains: the role of dispersal timing, germination characteristics and water level fluctuations. *Acta Botanica Neerlandica*, 44(3), 269-278. DOI:<https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1995.tb00785.x>
- Van Velzen , E., Jesse, P., Cornelissen, P., & Coops, H. (2003). *Stromingweerstand vegetatie in uiterwaarden. Deel 2 achtergronddocument versie 1*. RIZA Arnhem.
- Vesipa, R., Camporeale, C., & Ridolfi, L. (2007). Effect of river flow fluctuations on riparian vegetation dynamics: Processes and models. *Advances in Water Resources* 110 , 29-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.09.028>
- Wolf, R., Stortelden, A., & De Waal, R. (2001). *Stichting Uitgeverij van de Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging*. Utrecht.