

# Caratterizzazione della geometria idraulica dell'alveo montano-collinare del Torrente Sillaro e predisposizione dei siti di monitoraggio per il trasporto solido al fondo



Bologna, 19 Dicembre 2019

Francesco Brardinoni (BiGeA – Università di Bologna)

Federico Bonazzi

Roberta Giannuzzi

Sharon Pittau

Questo documento mira a descrivere: (1) la caratterizzazione della geometria idraulica e dello sforzo di taglio della corrente ad alveo pieno (*bankfull*); (2) la predisposizione di due siti per il monitoraggio del trasporto fluviale di ghiaie, lungo il corso montano-collinare del Torrente Sillaro (Figure 1 e 2).

Il punto (1) è stato svolto tramite una serie di rilievi topografici di sezioni trasversali dell'alveo condotti rispettivamente in 11 tratti del corso principale del Torrente Sillaro e lungo 3 tratti dei due affluenti Rio dell'Osso e Rio dell'Acquabona. In ogni tratto selezionato sono state rilevate 5 sezioni, distanziate tra loro da una distanza proporzionale alla larghezza locale dell'alveo, per un totale di 70 sezioni. I tratti sono stati selezionati in modo da rappresentare l'insieme delle condizioni topografiche, geologiche, idrologiche e morfologiche dell'intero corso montano-collinare, in modo da esaminare la variabilità delle condizioni idrauliche dell'alveo propedeutiche al trasporto solido di fondo (Tabella 1).

Il punto (2) è stato svolto mediante la preparazione in laboratorio di clasti marcati a trasponder passivi, da utilizzare come traccianti mediante tecnologia RFID (*Radio-Frequency Identification*), e da rilievi topografici e fotogrammetrici in alveo per la definizione delle condizioni al contorno di due tratti caratterizzati da diverso grado di confinamento laterale: uno situato più a monte, semi-confinato (tratto 1), l'altro confinato (tratto 2) (Figura 1).

Tabella 1. Caratteristiche complessive dei tratti di rilevamento in alveo.

Tratto*	Quota (m s.l.m.)	Area di drenaggio (km <sup>2</sup> )	Distanza dallo spartiacque (km)	Pendenza (%)	Raggio idraulico medio (m)	Sforzo di taglio medio (N m <sup>-2</sup> )
A	336	20,1	8,3	1,49	0,27	39,43
B	292	28,2	11,7	1,48	0,29	42,06
C	275	32,9	13,1	0,43	0,42	17,83
<b>D</b>	268	35,1	13,8	0,82	0,51	41,05
E	250	42,8	14,9	0,34	0,36	11,87
F	217	46,9	16,5	2,61	0,28	72,18
<b>G</b>	194	49,9	17,8	1,13	0,47	52,31
H	170	64,2	20,2	0,61	0,33	19,72
I	134	93,2	24,5	0,09	0,58	4,91
L	116	99,4	26,5	1,22	0,65	78,12
M	98	112,3	29,2	0,09	0,59	5,20
T1	205	2,7	2,4	4,97	0,19	93,37
T2	195	2,7	2,6	4,10	0,11	45,52
T3	158	10,8	5,4	1,57	0,44	67,80

\* I tratti D e G vengono utilizzati come siti di monitoraggio del trasporto solido di fondo.

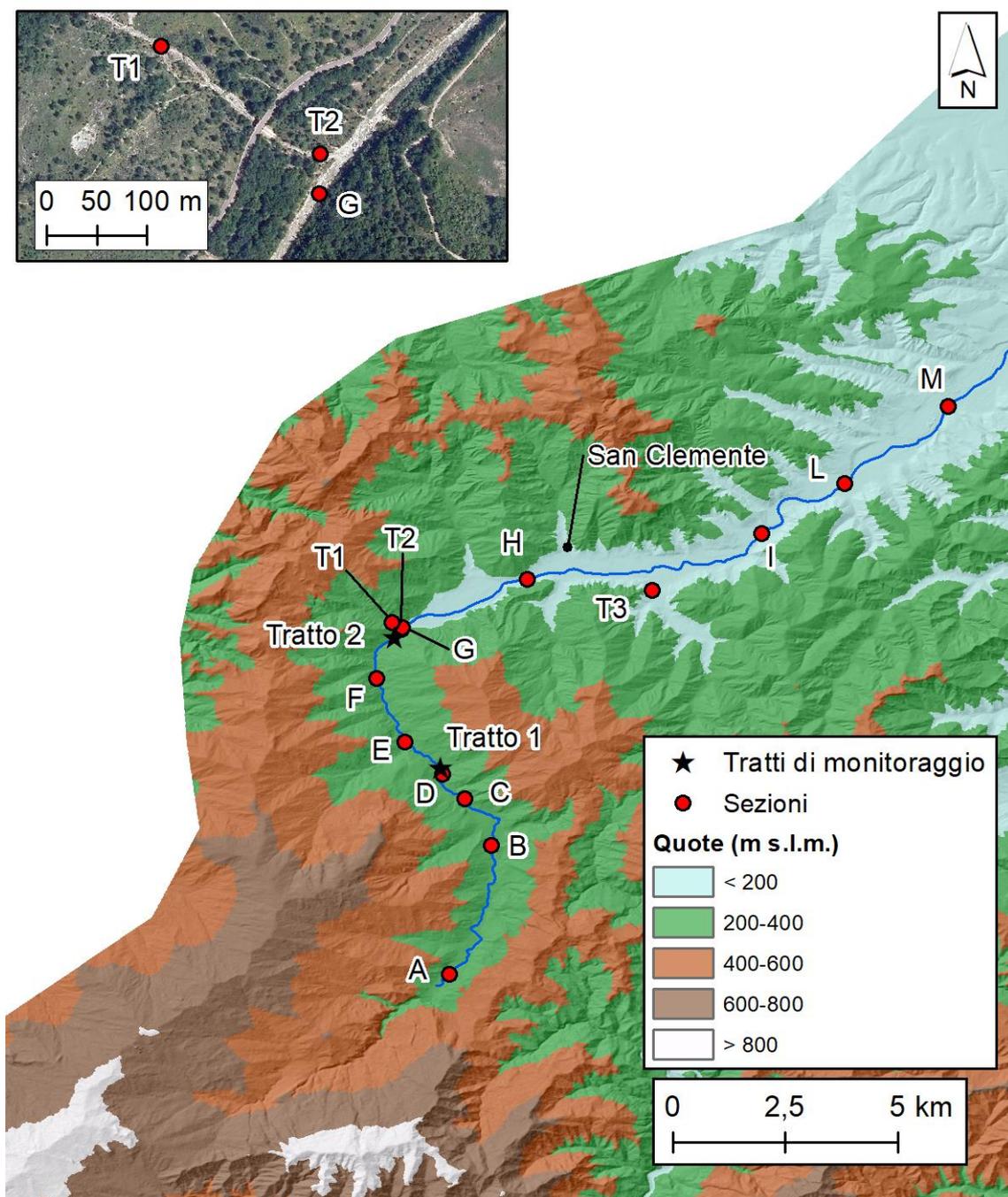


Figura 1. Localizzazione dei tratti per la caratterizzazione idraulica (sezioni) lungo il corso montano-collinare, non arginato, del Torrente Sillaro. I siti T1 e T2 sono localizzati lungo il Rio dell’Osso, il sito T3 lungo il Rio dell’Acquabona. I tratti di monitoraggio 1 e 2 corrispondono ai tratti D e G.

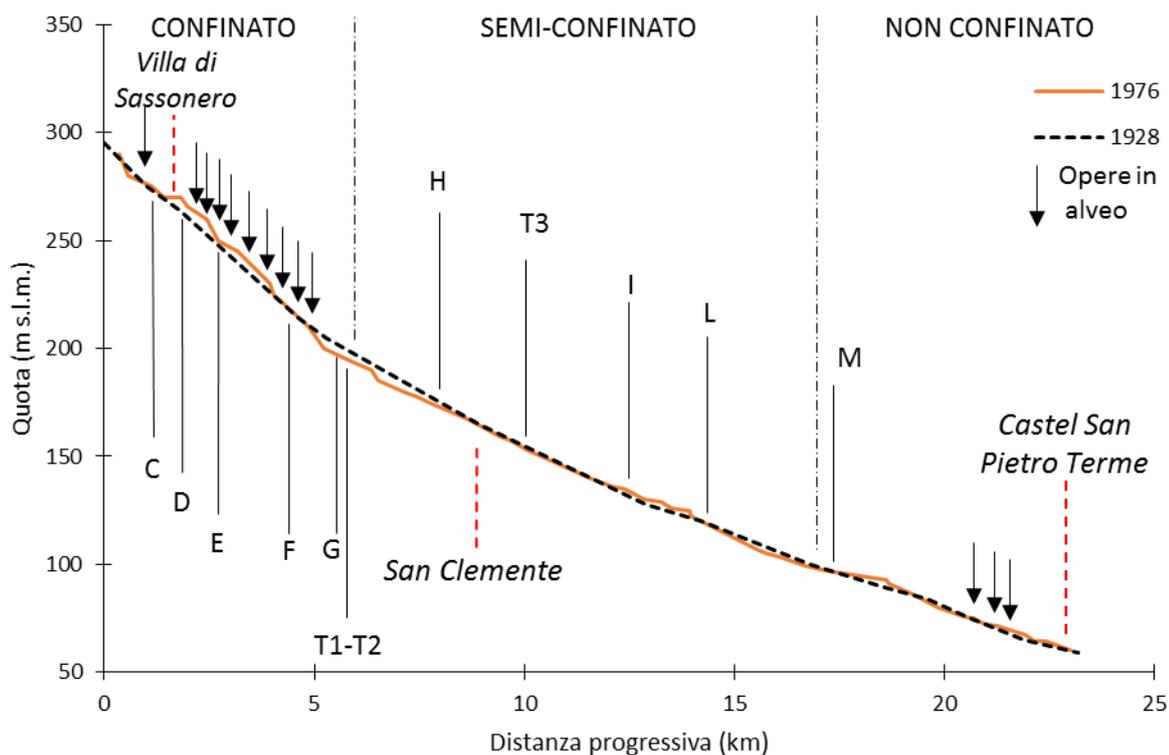


Figura 2. Profili longitudinali del Torrente Sillaro ricavati dalle isoipse visibili nelle carte topografiche IGM del 1928 (linea nera tratteggiata) e nella Carta Tecnica Regionale del 1976 (linea arancione continua). Le lettere indicano le localizzazioni dei siti rilevati. I siti A e B risultano localizzati più a monte (fuori figura).

## Tratto A

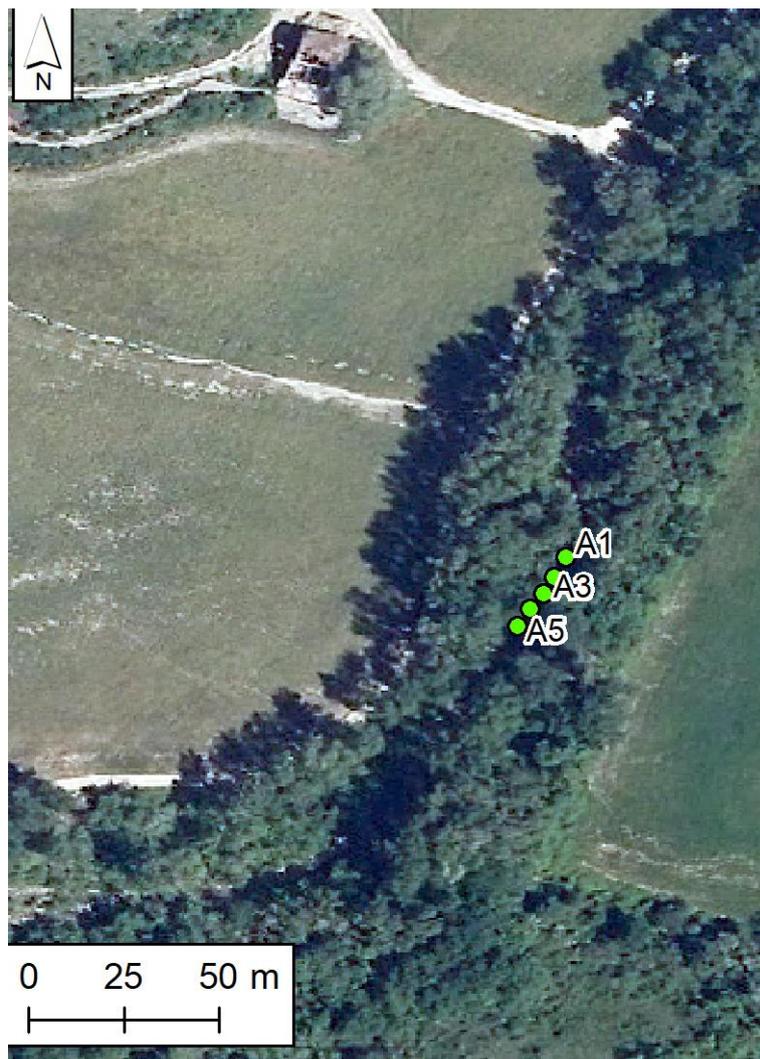


Figura 3. Vista in pianta delle sezioni del tratto A.



Figura 4. Particolare della sezione A2 (foto scattata verso monte).

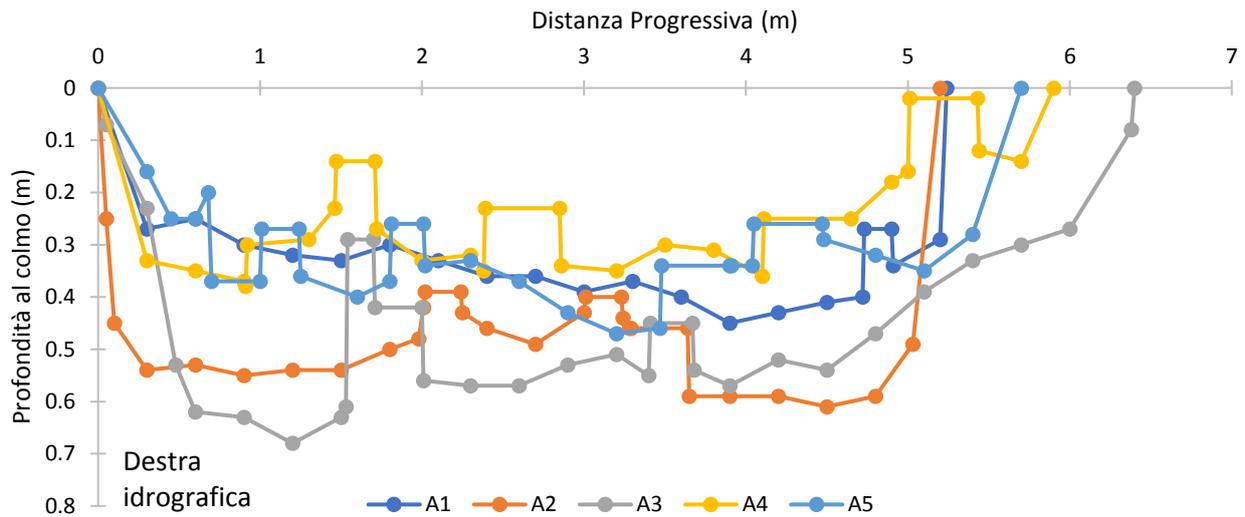


Figura 5. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto A.

Tabella 2. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto A.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
A1	5,24	0,45	0,38	0,31	1,50	5,68	0,26		37,97
A2	5,20	0,61	0,48	0,45	2,14	6,05	0,35		51,11
A3	6,40	0,68	0,55	0,43	2,17	7,22	0,30	1,49	43,81
A4	5,90	0,38	0,23	0,24	1,33	6,88	0,19		27,74
A5	5,70	0,47	0,33	0,30	1,62	6,50	0,25		36,51

Tratto B



Figura 6. Vista in pianta delle sezioni del tratto B.



Figura 7. Particolare della sezione B3 (foto scattata verso monte).

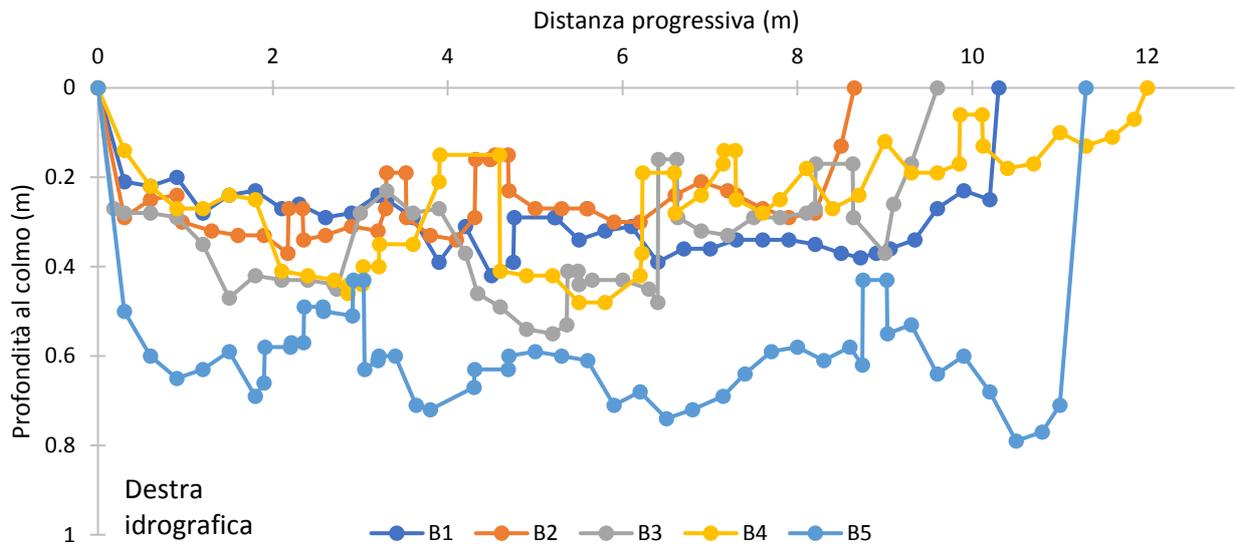


Figura 8. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto B.

Tabella 3. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto B.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
B1	10,30	0,42	0,29	0,29	2,27	10,50	0,22		31,91
B2	8,65	0,37	0,29	0,25	2,05	9,33	0,22		31,91
B3	9,60	0,55	0,41	0,33	2,78	10,62	0,26	1,48	37,71
B4	12,00	0,48	0,37	0,25	2,78	12,66	0,21		30,46
B5	11,30	0,79	0,60	0,61	6,80	12,49	0,54		78,32

## Tratto C

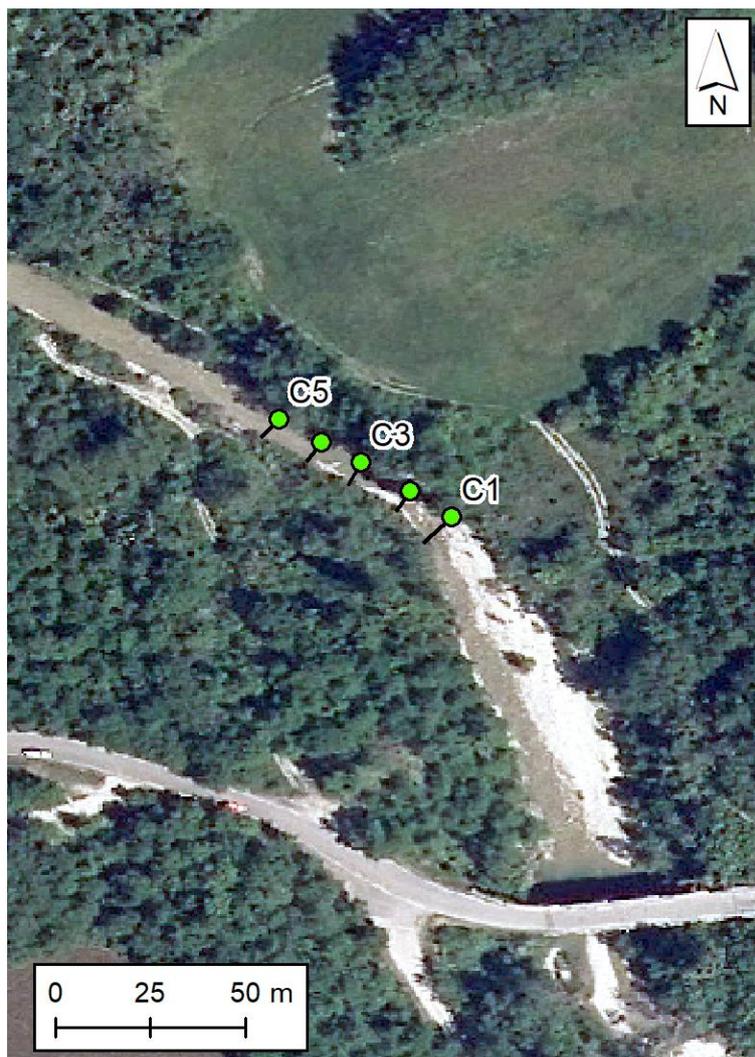


Figura 9. Vista in pianta delle sezioni del tratto C.



Figura 10. Particolare della sezione C4 (foto scattata verso monte).

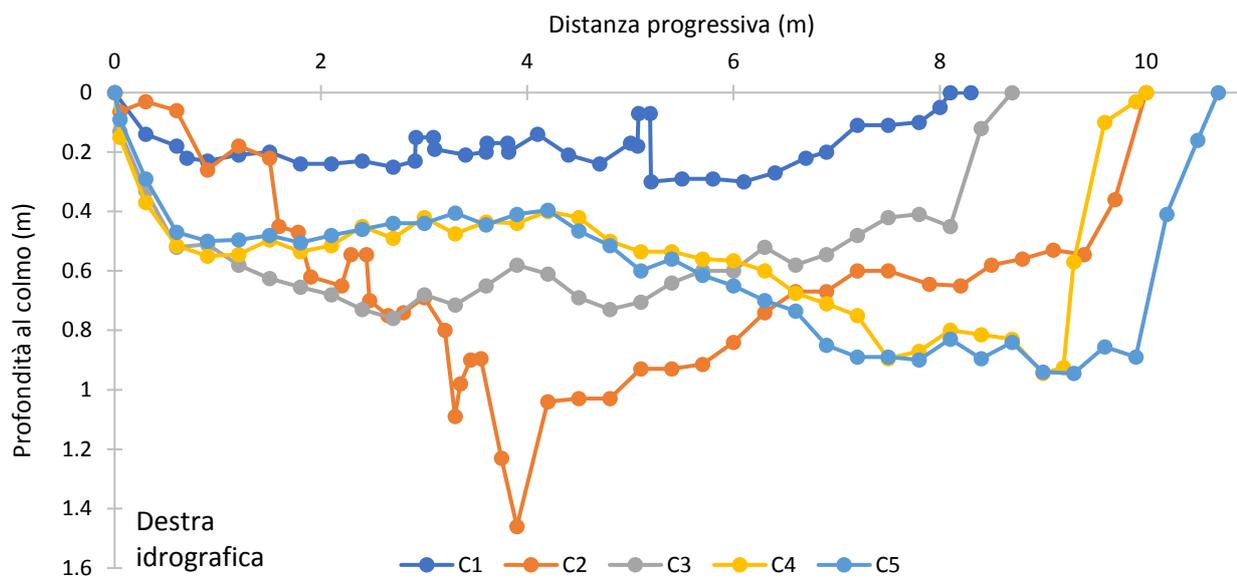


Figura 11. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto C.

Tabella 4. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto C.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
C1	8,30	0,30	0,17	0,18	0,82	7,95	0,10		4,21
C2	10,00	1,46	0,56	0,64	6,05	11,41	0,53		22,34
C3	8,70	0,76	0,58	0,52	4,50	9,04	0,50	0,43	20,98
C4	10,00	0,94	0,53	0,52	5,00	10,62	0,47		19,84
C5	10,70	0,95	0,50	0,56	5,82	11,26	0,52		21,76

Tratto D



Figura 12. Vista in pianta delle sezioni del tratto D.



Figura 13. Particolare della sezione D3 (foto scattata verso monte).

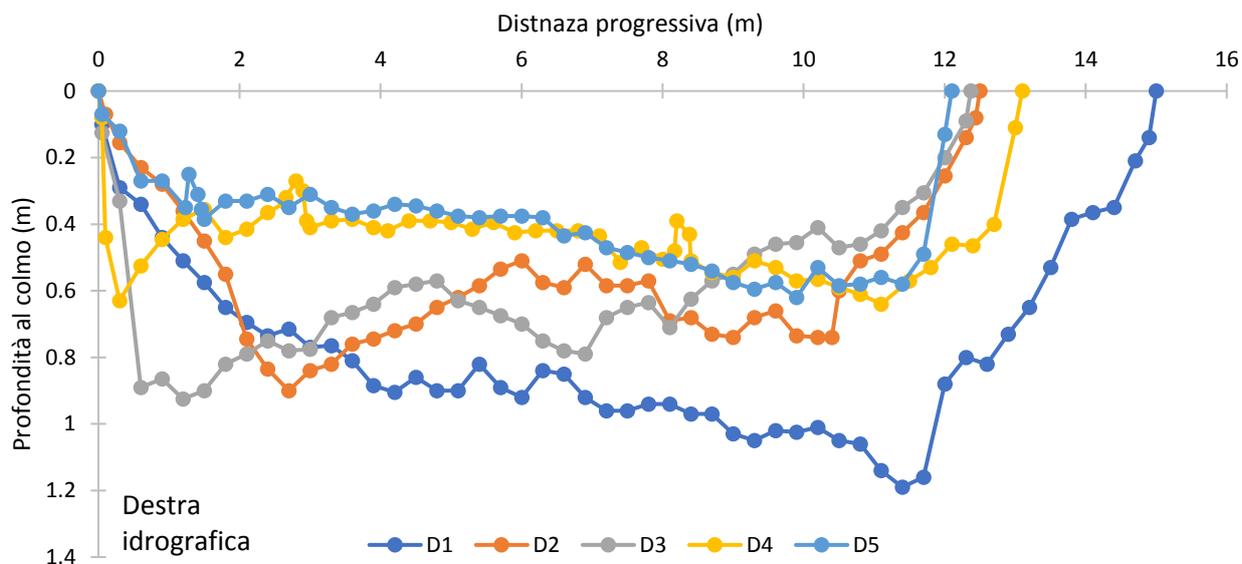


Figura 14. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto D.

Tabella 5. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto D.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
D1	15,00	1,19	0,84	0,74	11,62	15,57	0,75		60,00
D2	12,50	0,90	0,59	0,54	6,55	12,81	0,51		41,09
D3	12,37	0,93	0,63	0,57	7,21	13,02	0,55	0,82	44,47
D4	13,10	0,64	0,42	0,42	5,16	13,87	0,37		29,90
D5	12,10	0,62	0,38	0,39	4,64	12,51	0,37		29,78

Tratto E



Figura 15. Vista in pianta delle sezioni del tratto E.



Figura 16. Particolare della sezione E1 (foto scattata verso monte).

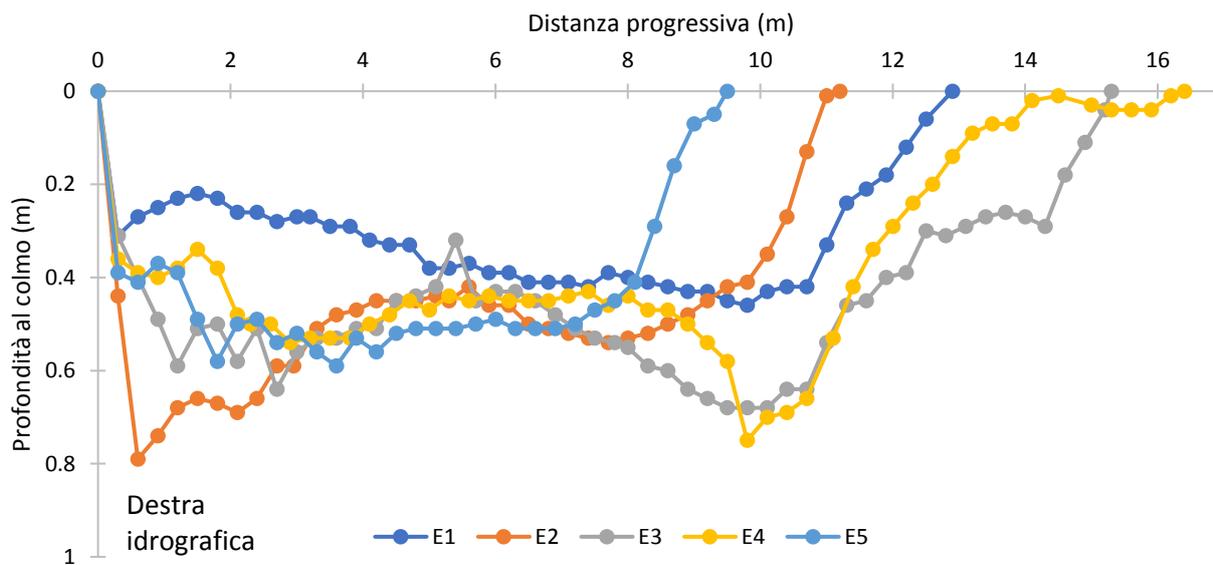


Figura 17. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto E.

Tabella 6. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto E.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
E1	12,90	0,46	0,40	0,31	3,60	12,77	0,28	9,38	
E2	11,20	0,79	0,45	0,47	4,22	11,10	0,38	12,66	
E3	15,30	0,68	0,54	0,44	5,20	15,07	0,34	0,34 11,33	
E4	16,40	0,75	0,44	0,37	5,30	14,19	0,37	12,33	
E5	9,50	0,59	0,51	0,42	4,07	9,77	0,41	13,66	

Tratto F



Figura 18. Vista in pianta delle sezioni del tratto F.



Figura 19. Particolare della sezione F3 (foto scattata verso monte).



Figura 20. Particolare della sezione F2 (foto scattata verso monte).

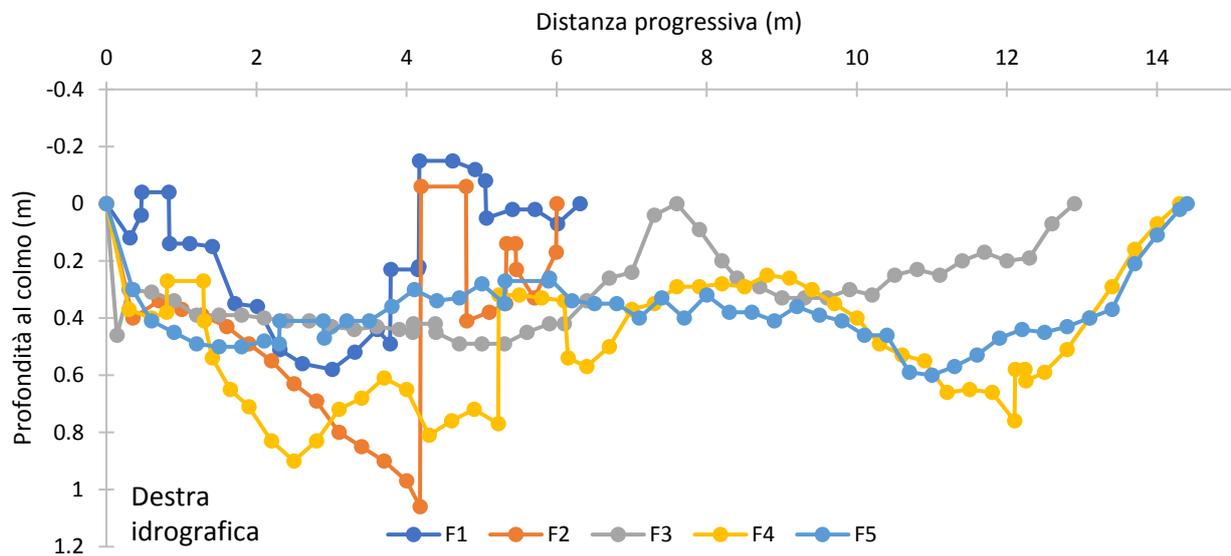


Figura 21. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto F.

Tabella 7. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto F.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
F1	6,31	0,58	0,13	0,16	1,23	5,69	0,21		53,71
F2	6,00	1,06	0,38	0,41	2,56	7,45	0,34		86,97
F3	12,90	0,49	0,42	0,31	2,68	12,21	0,22	2,61	56,04
F4	14,30	0,90	0,44	0,48	5,48	15,39	0,36		91,11
F5	14,40	0,60	0,38	0,37	4,12	14,41	0,29		73,08

## Tratto G



Figura 22. Vista in pianta delle sezioni del tratto G.



Figura 23. Particolare della sezione G1 (foto scattata verso monte).

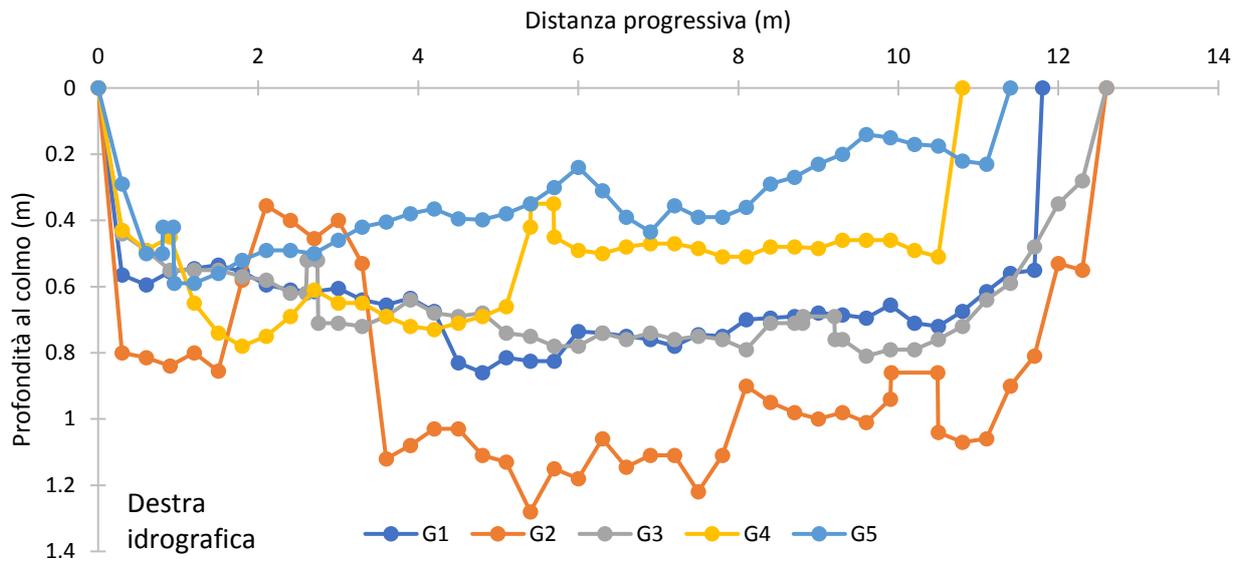


Figura 24. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto G.

Tabella 8. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto G.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
G1	11,80	0,83	0,74	0,64	6,99	12,53	0,55		60,91
G2	12,60	1,03	0,85	0,63	7,19	14,11	0,51		56,42
G3	12,60	0,81	0,74	0,64	7,03	13,17	0,53	1,13	59,08
G4	10,80	0,73	0,35	0,52	5,13	11,51	0,45		49,39
G5	11,40	0,59	0,37	0,35	3,86	11,95	0,32		35,74

## Tratto H

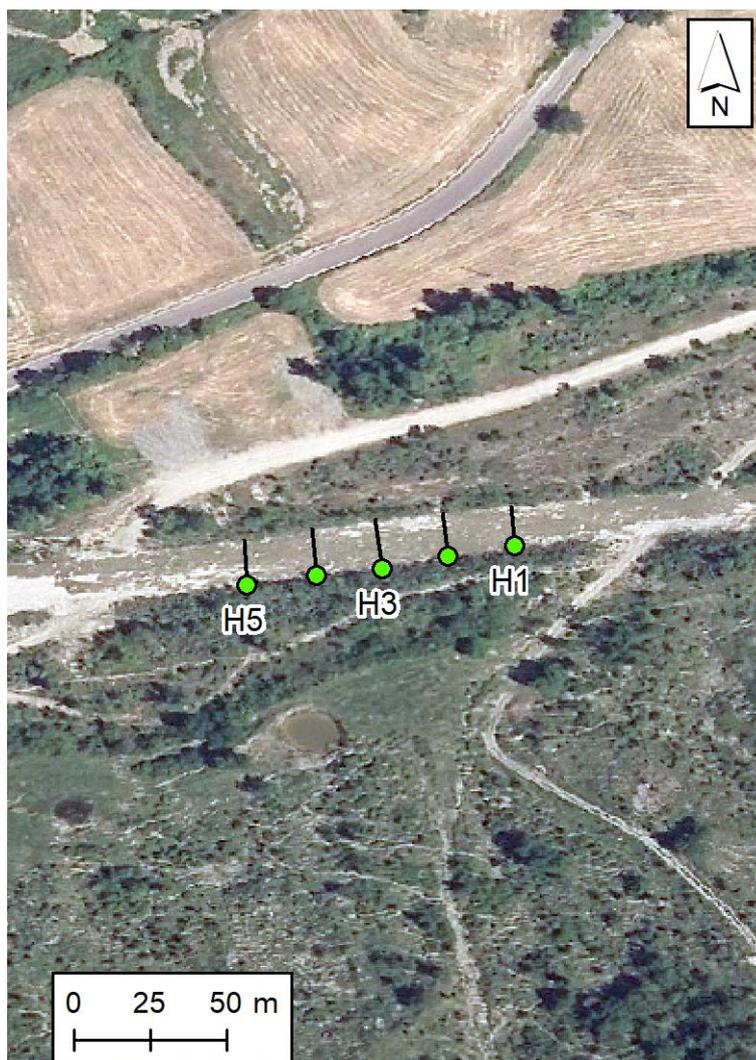


Figura 25. Vista in pianta delle sezioni del tratto H.



Figura 26. Particolare della sezione H2 (foto scattata verso monte).

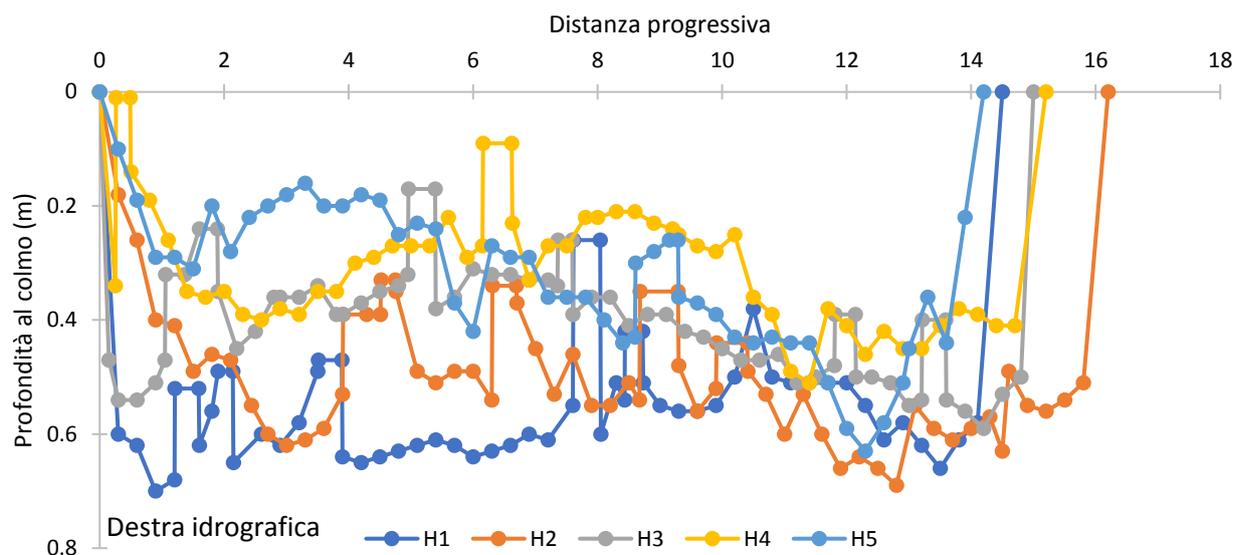


Figura 27. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto H.

Tabella 9. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto H.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
H1	14,50	0,70	0,61	0,54	6,53	16,47	0,40		23,68
H2	16,20	0,69	0,55	0,48	7,81	17,61	0,44		26,51
H3	15,00	0,59	0,34	0,39	5,90	16,97	0,35	0,61	20,77
H4	15,20	0,51	0,30	0,29	3,37	15,78	0,21		12,76
H5	14,20	0,63	0,36	0,32	3,60	14,47	0,25		14,87

Tratto I



Figura 28. Vista in pianta delle sezioni del tratto I.



Figura 29. Particolare della sezione I2 (foto scattata verso valle).

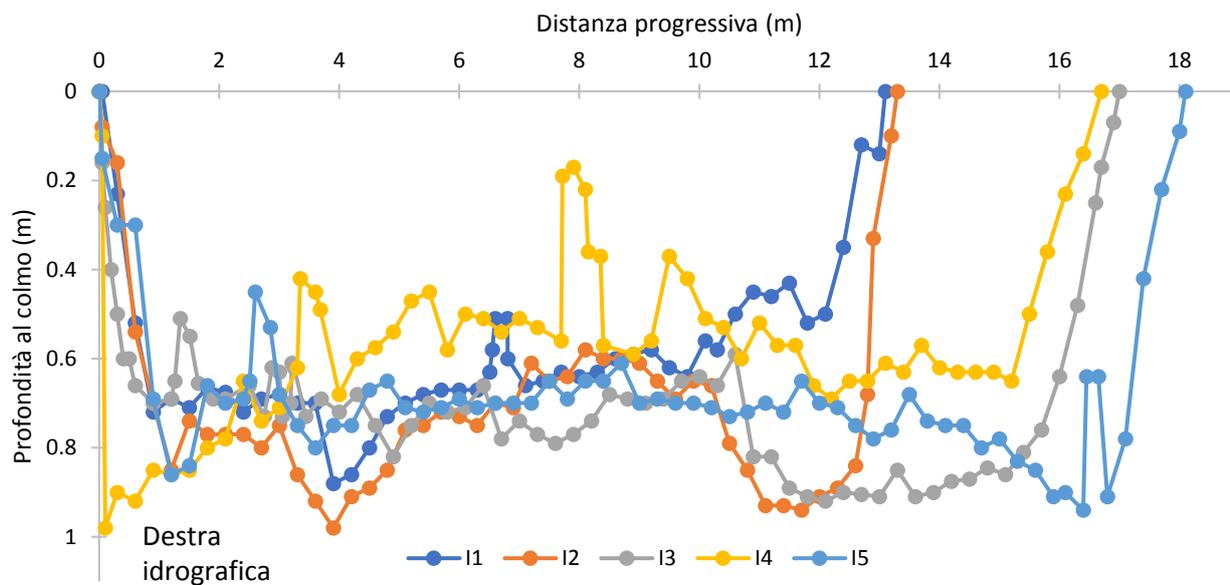


Figura 30. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto I.

Tabella 10. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto I.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
I1	13,10	0,88	0,63	0,56	7,50	13,73	0,55		4,66
I2	13,30	0,98	0,75	0,67	9,31	14,18	0,66		5,60
I3	17,00	0,92	0,70	0,66	10,86	17,89	0,61	0,09	5,18
I4	16,70	0,98	0,57	0,54	9,22	18,77	0,49		4,19
I5	18,10	0,94	0,70	0,65	11,28	19,44	0,58		4,95

Tratto L



Figura 31. Vista in pianta delle sezioni del tratto L.



Figura 32. Particolare della sezione L1 (foto scattata verso monte).

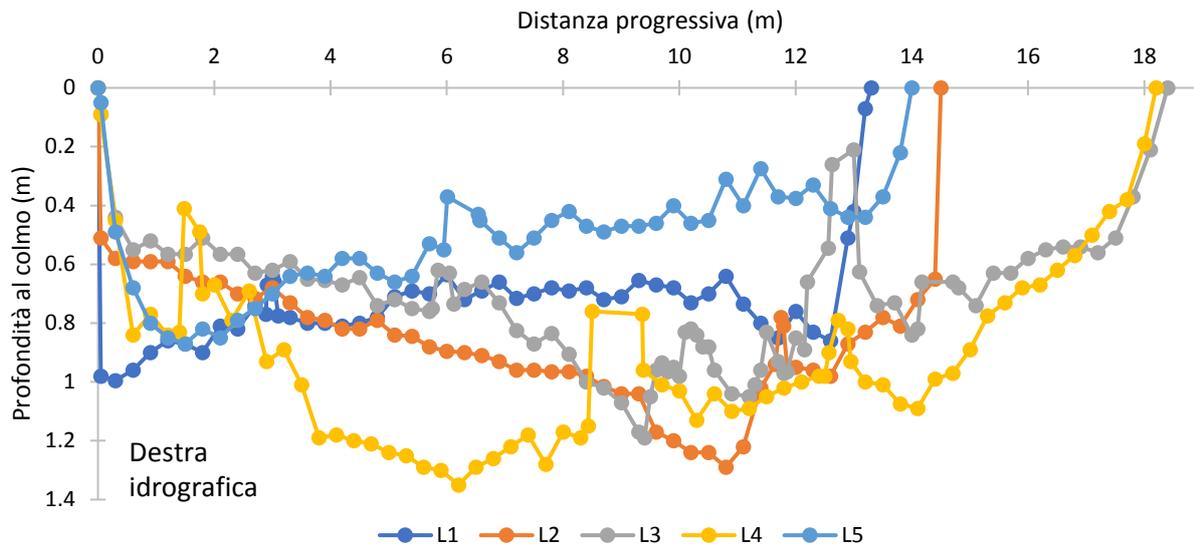


Figura 33. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto L.

Tabella 11. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto L.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
L1	13,30	0,99	0,72	0,70	9,82	14,94	0,66		78,54
L2	14,50	1,29	0,84	0,86	11,75	15,80	0,74		88,89
L3	18,40	1,19	0,73	0,71	12,49	20,36	0,61	1,22	73,34
L4	18,20	1,35	0,97	0,88	15,87	20,23	0,78		93,80
L5	14,00	0,87	0,47	0,50	6,91	14,75	0,47		56,02

## Tratto M



Figura 34. Vista in pianta delle sezioni del tratto M.



Figura 35. Particolare della sezione M3 (foto scattata verso monte).

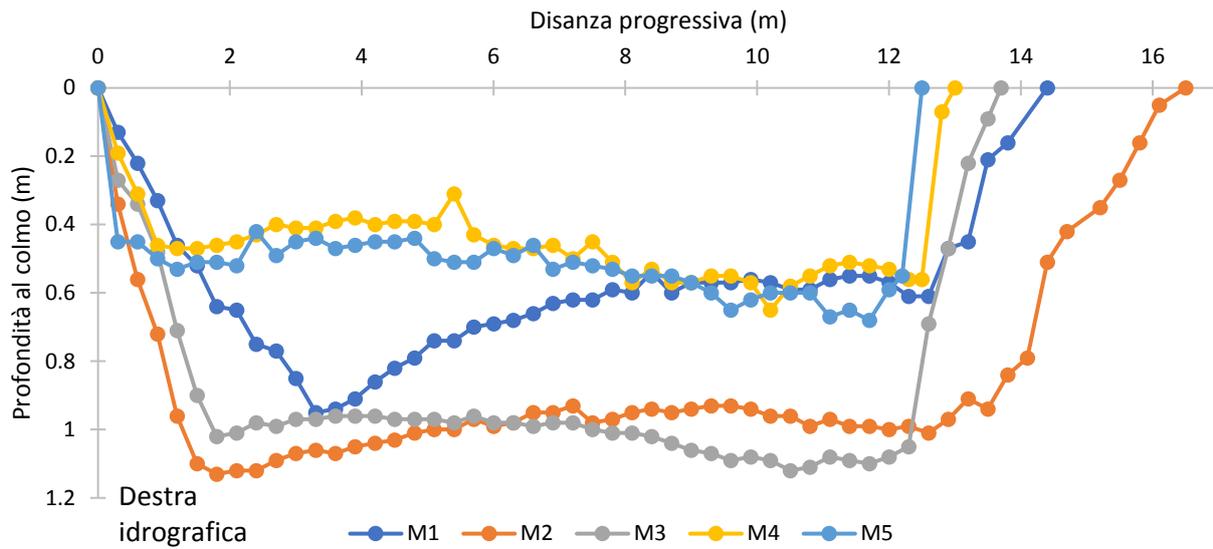


Figura 36. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto M.

Tabella 12. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto M.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
M1	14,40	0,95	0,63	0,58	7,64	14,42	0,52	4,59	
M2	16,50	1,13	0,95	0,85	13,00	16,55	0,78	6,88	
M3	13,70	1,12	0,98	0,87	11,17	14,07	0,79	0,09	
M4	13,00	0,65	0,47	0,44	5,25	13,24	0,39	3,44	
M5	12,50	0,68	0,51	0,50	6,17	13,11	0,47	4,15	

## Tratto T1

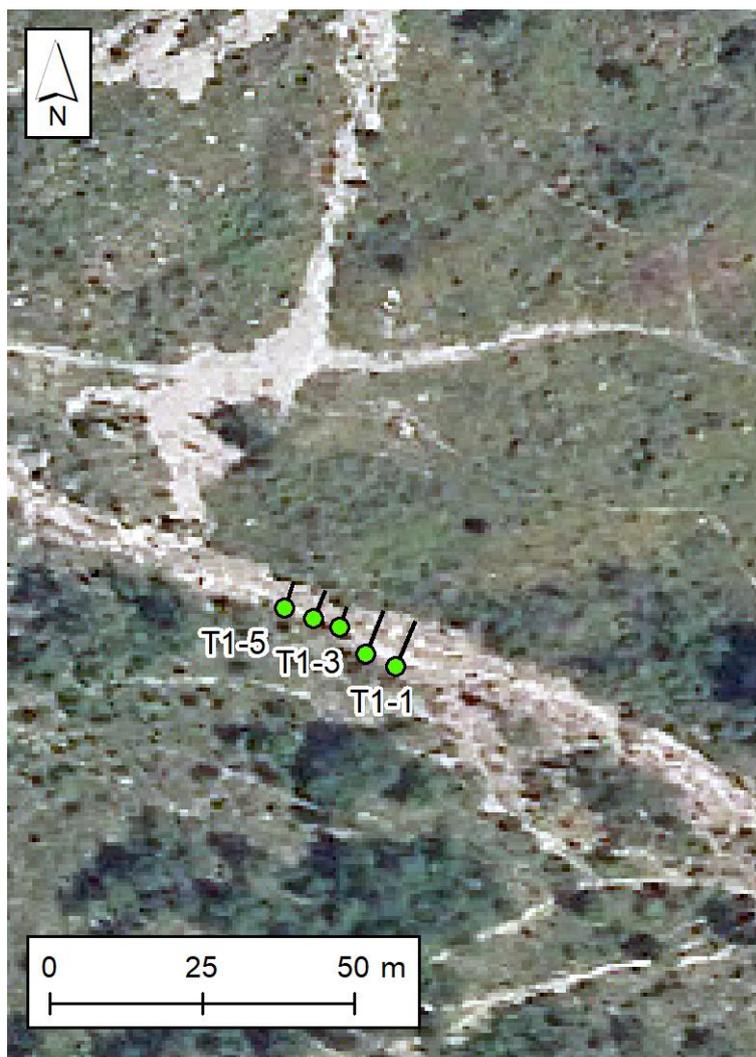


Figura 37. Vista in pianta delle sezioni del tratto T1.



Figura 38. Particolare della sezione T1-5 (foto scattata verso valle).

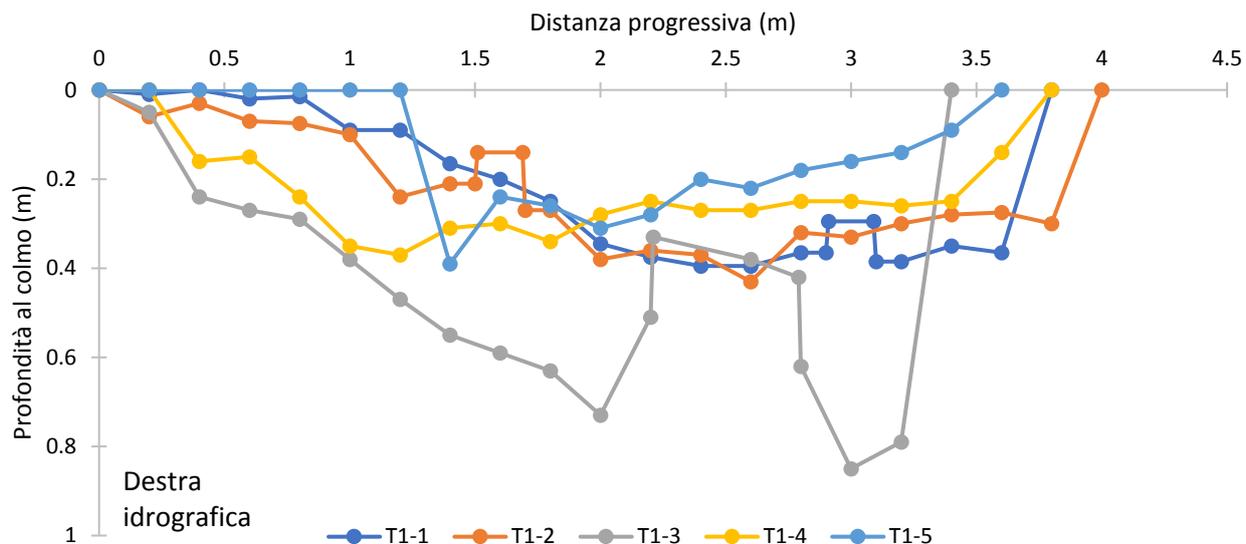


Figura 39. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto T1.

Tabella 13. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto T1.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
T1-1	3,80	0,40	0,38	0,22	0,52	2,85	0,18		88,43
T1-2	4,00	0,43	0,27	0,22	0,65	3,78	0,17		82,80
T1-3	3,40	0,85	0,63	0,43	1,34	4,52	0,30	4,97	144,66
T1-4	3,80	0,37	0,31	0,22	0,78	3,70	0,21		102,28
T1-5	3,60	0,39	0,26	0,13	0,25	2,32	0,10		48,71

## Tratto T2

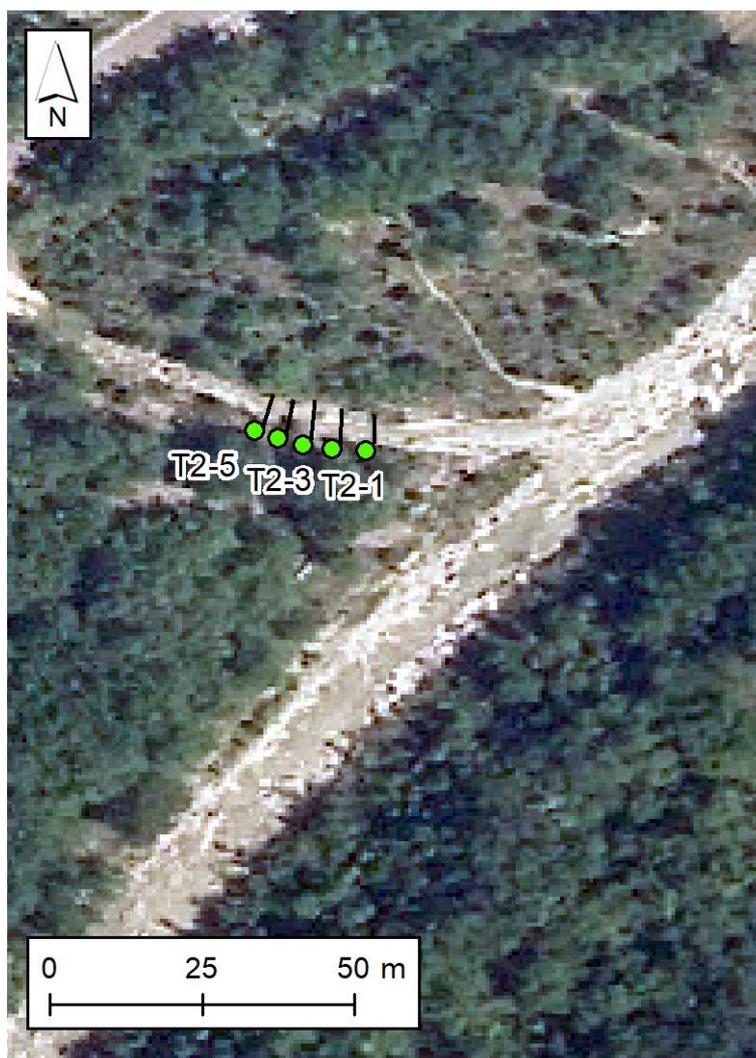


Figura 40. Vista in pianta delle sezioni del tratto T2.

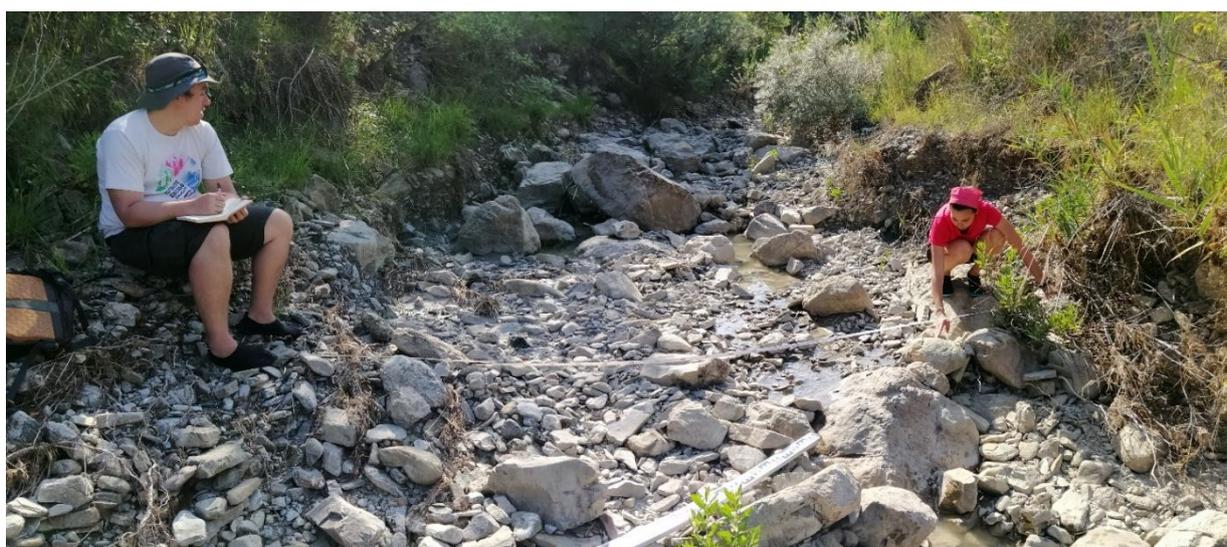


Figura 41. Particolare della sezione T2-4 (foto scattata verso monte).

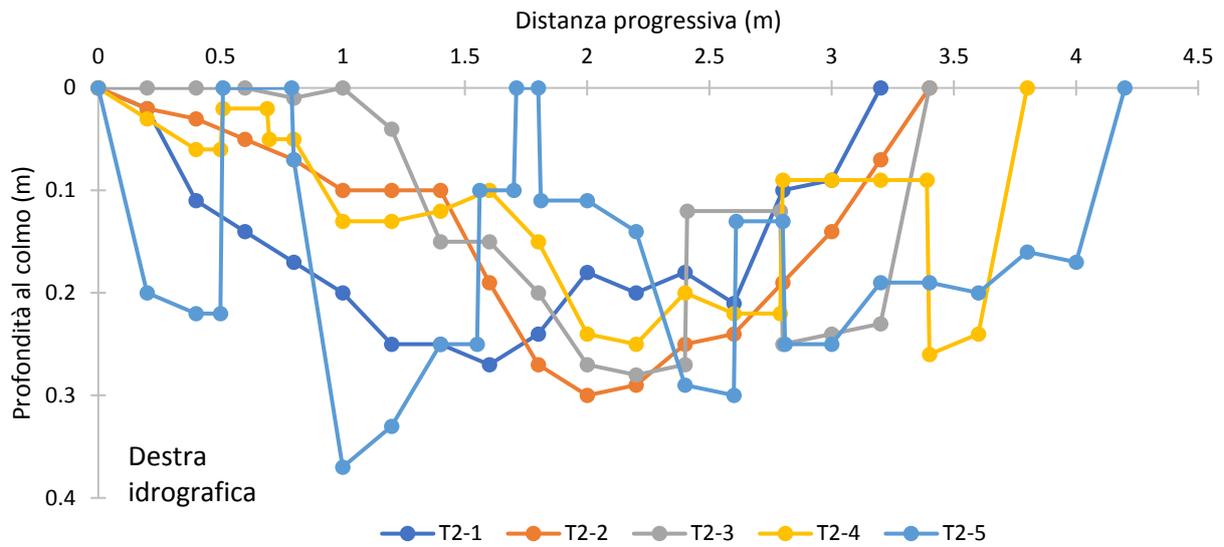


Figura 42. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto T2.

Tabella 14. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto T2.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
T2-1	3,20	0,27	0,27	0,15	0,43	3,00	0,14		56,25
T2-2	3,40	0,30	0,23	0,13	0,21	1,77	0,12		47,81
T2-3	3,40	0,28	0,18	0,12	0,37	2,69	0,14	4,10	54,77
T2-4	3,80	0,90	0,20	0,12	0,32	3,66	0,09		34,68
T2-5	4,20	0,70	0,13	0,16	0,37	4,39	0,08		34,11

## Tratto T3

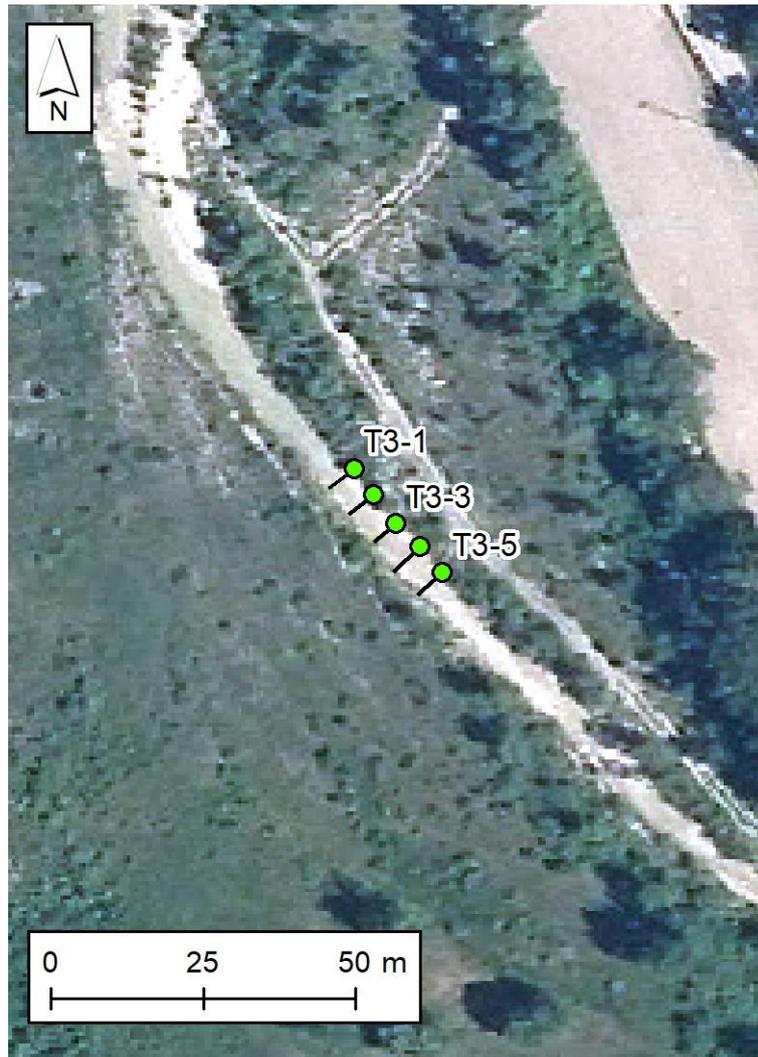


Figura 42. Vista in pianta delle sezioni del tratto T3.



Figura 43. Particolare della sezione T3-1 (foto scattata verso monte).

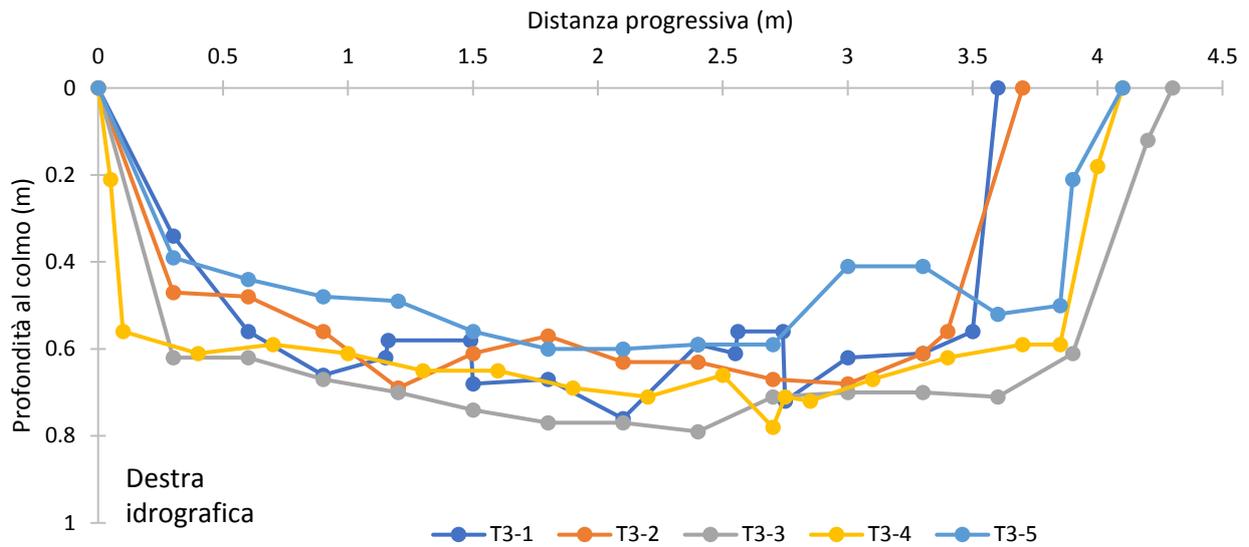


Figura 44. Dettaglio delle sezioni topografiche del tratto T3.

Tabella 15. Caratteristiche delle sezioni al colmo (livello di bankfull) nel tratto T3.

Sezione	Larghezza (m)	Profondità (m)			Area sezione (m <sup>2</sup> )	Perimetro bagnato (m)	Raggio idraulico (m)	Pendenza (%)	Sforzo di taglio (N m <sup>-2</sup> )
		Massima	Mediana	Media					
T3-1	3,60	0,76	0,76	0,54	1,91	4,62	0,41		63,61
T3-2	3,70	0,69	0,60	0,51	1,99	4,34	0,45		69,24
T3-3	4,30	0,79	0,78	0,58	2,71	5,03	0,53	1,57	81,55
T3-4	4,10	0,68	0,69	0,54	2,44	5,01	0,48		73,85
T3-5	4,10	0,60	0,60	0,42	1,51	4,45	0,33		50,77

## Tratti di Monitoraggio

Sono stati identificati due tratti dove è stato condotto durante la prima settimana di Novembre un rilievo fotogrammetrico con drone integrato a rilievo topografico di punti di controllo in alveo (GCP). L'elaborazione delle immagini e la produzione di una restituzione fotogrammetrica è attualmente in corso di svolgimento. Circa 50 metri a monte del tratto 2 (Figura 45) è stata installata una stazione idrometrica. Entro il mese di gennaio 2020 verrà installata una seconda stazione idrometrica immediatamente a monte del tratto 1.

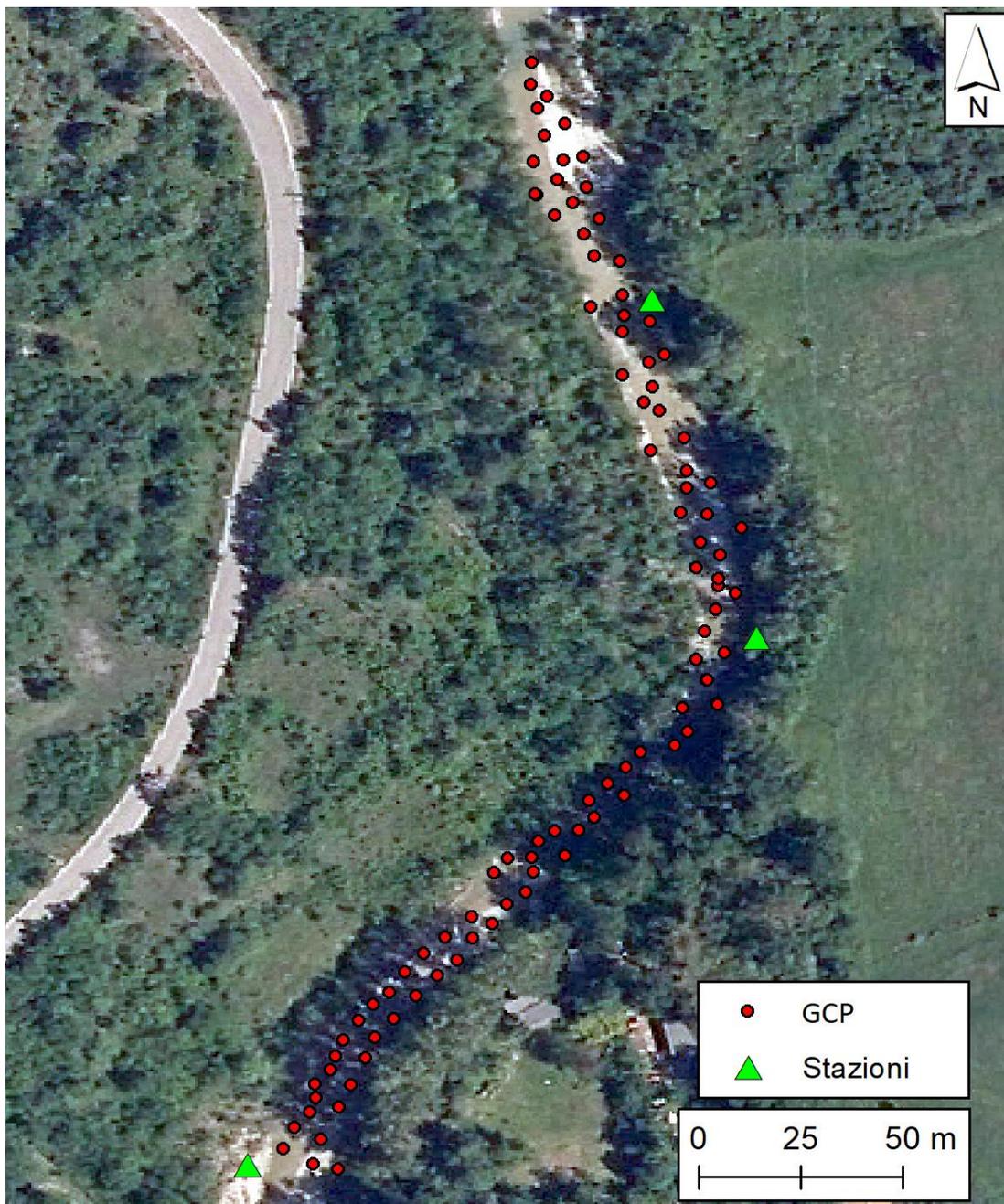


Figura 45. Vista in pianta del Tratto 1. I triangoli indicano i punti di stazione del rilievo topografico effettuato tramite stazione totale. I punti indicano i punti di controllo al suolo (Ground Control Points) acquisiti tramite stazione totale. I GCPs serviranno poi per restituire un mosaico fotogrammetrico orto-rettificato ed un modello digitale del fondo dell'alveo fotogrammetrico.

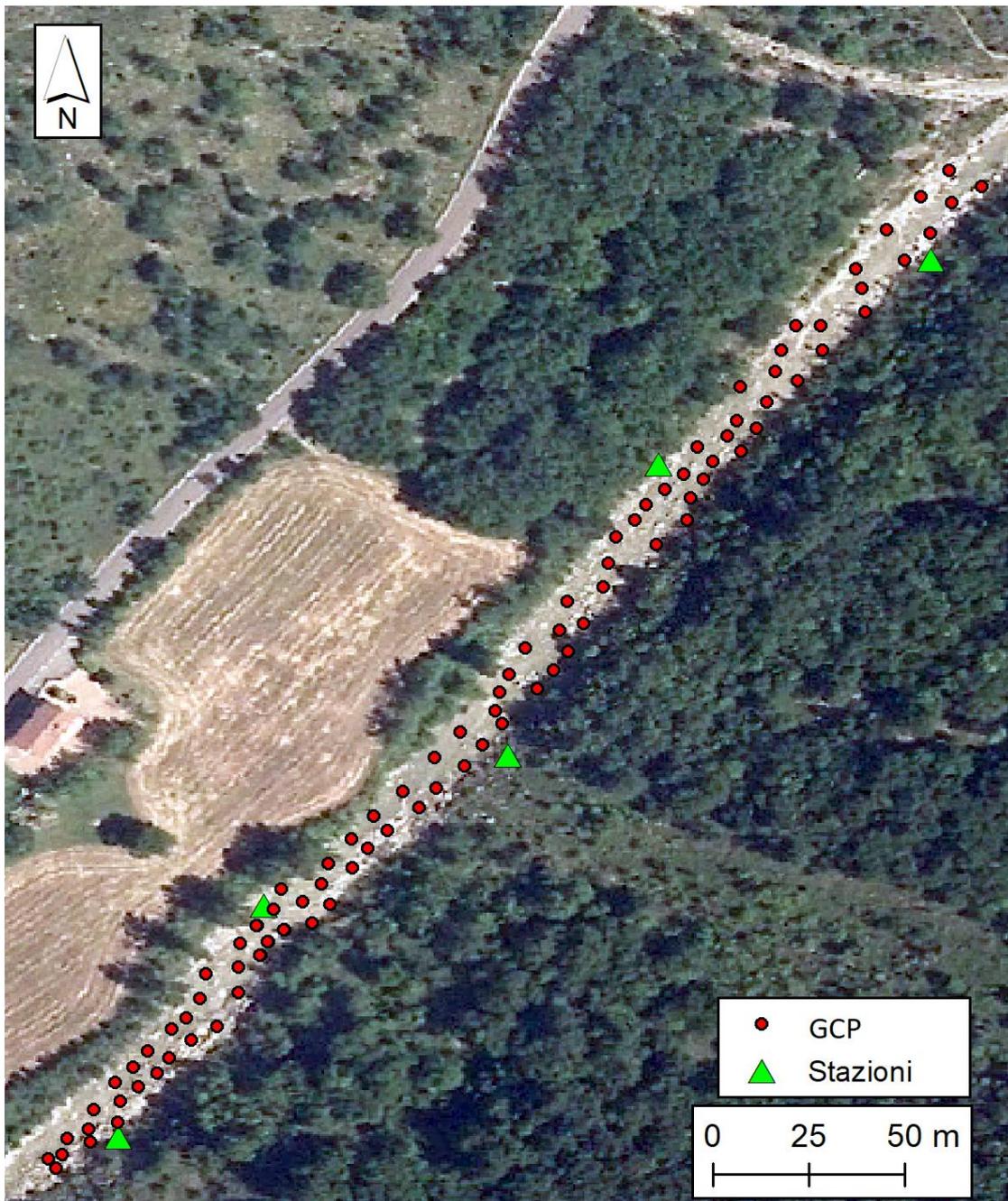


Figura 46. Vista in pianta del Tratto 2. I triangoli indicano i punti di stazionamento del rilievo topografico effettuato tramite stazione totale. I punti indicano i punti di controllo al suolo (Ground Control Points) acquisiti tramite stazione totale. I GCPs serviranno poi per restituire un mosaico fotogrammetrico orto-rettificato ed un modello digitale del fondo dell'alveo fotogrammetrico.

## Preparazione dei clasti per il monitoraggio del trasporto del fondo

Lo studio del trasporto solido di fondo viene svolto tramite il monitoraggio degli spostamenti di clasti appositamente preparati e introdotti in alveo.

Le classi dimensionali (ie, asse intermedio dei clasti) più adatte a questo scopo, così da rilasciare clasti rappresentativi del tratto in analisi, sono state identificate tramite analisi granulometriche superficiali (si veda report delle attività relative all'anno 2018). Le categorie individuate sono cinque: (i) 32 mm; (ii) 45 mm; (iii) 64 mm; (iv) 90 mm; (v) 128 mm (Tabella 16).

Tabella 16. Granulometria e peso dei traccianti preparati.

Categoria granulometrica dei traccianti [mm]	Numero di traccianti	Intervallo di variazione	
		Asse intermedio [mm]	Peso [g]
32	20	26,4 - 44,0	33,5 - 88,5
45	20	34,4 - 61,2	78,5 - 211,5
64	20	47,5 - 76,3	130,2 - 612,7
90	20	73,7 - 108,0	491,6 - 1501,2
128	20	96,2 - 154,1	1052,3 - 4172,1
Totale	100	26,4 - 154,1	33,5 - 4172,1