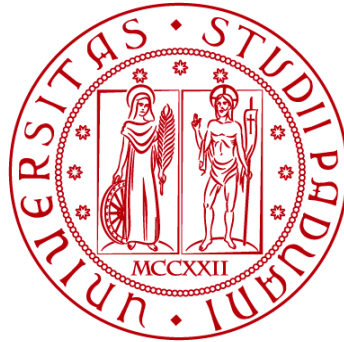


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Scienze Naturali



ELABORATO DI LAUREA

**L'EVENTO ALLUVIONALE DEL SETTEMBRE 2022
NEL FIUME MISA: PROCESSI DI TRASPORTO E
DEPOSIZIONE ANOMALA DI GHIAIE SU
SUPERFICI TERRAZZATE**

**Tutor: Prof. Nicola Surian
Dipartimento di Geoscienze**

**Co-tutor: Dott. Andrea Brenna
Dipartimento di Geoscienze**

Laureando: Filippo Zarabara

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

Indice

1 Introduzione.....	1
2 Area di studio.....	3
2.1 Inquadramento geografico.....	5
2.2 L'evento del 15-16 settembre 2022.....	6
3 Materiali e metodi.....	8
3.1 Materiali.....	8
3.2 Metodi.....	8
3.2.1 Profili topografici.....	11
3.2.2 Schede dei depositi e granulometrie.....	12
3.2.3 Calcoli idraulici.....	13
4 Risultati.....	17
4.1 Profilo longitudinale, altezze idrometriche e localizzazione dei depositi.....	17
4.2 Caratterizzazione dei corpi deposizionali.....	19
3.2.1 Esempi di schede di corpi deposizionali	20
4.3 Variazione longitudinale delle granulometrie.....	25
4.4 Calcoli idraulici per valutare la tipologia di trasporto.....	26
5 Discussione e conclusioni.....	31

5.1 Meccanismi di trasporto e genesi dei depositi ghiaiosi sui terrazzi.....	31
5.2 Ruolo del contesto geologico-geomorfologico e implicazioni.....	35
6 Bibliografia.....	37
7 Appendice.....	41

1 Introduzione

Gli eventi di piena sono fra i più importanti fenomeni naturali in grado di controllare l'evoluzione morfologica e, più in generale, la morfodinamica di un corso d'acqua (Baker, 1994). In particolare gli eventi di piena intensi, fino ad estremi, causano un ampio spettro di risposte morfologiche che si verificano su intervalli temporali brevi (da ore a pochi giorni), quali allargamenti e variazioni altimetriche (incisione e deposizione) del fondo, avulsioni e modificazioni della configurazione morfologica dell'alveo (Belletti et al., 2014; Surian et al., 2016). Come evidenziato da Church (2006), esiste un legame diretto fra i processi di mobilitazione e trasporto del sedimento e le morfologie degli alvei alluvionali. Per tale ragione, oltre alle forzanti idrauliche e ai fattori geologici e morfologici, risulta fondamentale caratterizzare tali processi di trasporto per meglio comprendere la risposta geomorfologica nei corsi d'acqua a seguito di eventi di piena (Rinaldi et al., 2016). Alcuni recenti studi hanno approfondito le tipologie di processi di trasporto che possono attivarsi in corsi d'acqua alluvionali durante eventi di piena intensi (Brenna et al., 2020, 2021; Church & Jakob, 2020), evidenziando ad esempio l'importanza delle piene di detrito (*debris flood*) nel determinare allargamenti degli alvei molto significativi (Brenna et al., 2023).

Tra il 15 e il 16 settembre 2022 una perturbazione di origine atlantica ha interessato il Centro Italia, causando la formazione di un temporale autorigenerante nelle Marche che ha determinato una pioggia di intensità eccezionale in aree localizzate della catena appenninica. Tali precipitazioni hanno interessato la parte medio-alta del bacino del Fiume Misa (Provincia di Ancona), causando una piena disastrosa. La presente tesi di laurea si inserisce fra le attività condotte dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, in collaborazione con il dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, volte allo studio della risposta geomorfologica del Fiume Misa a seguito di tale evento alluvionale (ad esempio, la quantificazione degli allargamenti) e alla caratterizzazione dei processi di trasporto che si sono attivati durante la piena. Nello specifico, durante i rilievi di

campo post-evento, nelle zone limitrofe all'alveo del Misa, sono stati rinvenuti dei depositi grossolani organizzati in ventagli e lobi collocati su terrazzi fluviali aventi quote di alcuni metri (3.5 – 4 m) maggiori rispetto all'alveo attivo del corso d'acqua. Ciò che rende anomali tali depositi sono principalmente la posizione nella quale sono stati ritrovati e la loro granulometria. Si trovano infatti sui terrazzi fluviali, ovvero superfici tipicamente interessate dalla deposizione di materiale fine (limi e sabbie) trasportati in sospensione durante le piene, e sono composti da clasti prevalentemente ghiaiosi che normalmente sarebbero movimentati come trasporto di fondo (*bedload*) all'interno dell'alveo fluviale (Church, 2006; Mao & Surian, 2010).

La presenza di questo tipo di depositi è poco documentata in letteratura scientifica, per cui questo lavoro di tesi è focalizzato sullo studio e sull'analisi di tali corpi deposizionali. Nello specifico, lo scopo è quello di caratterizzare i contesti geologici-geomorfologici in cui si possano generare tali depositi e di determinare i processi, in particolare il meccanismo di trasporto, che portano alla loro genesi durante eventi alluvionali. Una migliore comprensione di tali processi geomorfologici risulta infatti fondamentale nell'ottica precedentemente menzionata di legare il trasporto del sedimento con le risposte morfologiche dei corsi d'acqua indotte da eventi di piena. A tale scopo, il lavoro è stato svolto in questo modo: dopo la raccolta dei dati in campagna, portata a termine nel marzo 2023, si sono costruiti dei profili topografici per caratterizzare la geometria e le pendenze del Fiume Misa, e per ogni deposito rilevato in campo è stata costruita una scheda in cui sono state riportate le relative caratteristiche principali, incluse le granulometrie di dettaglio. Infine, sono stati eseguiti dei calcoli idraulici per verificare quali processi e meccanismi di trasporto potrebbero aver generato i depositi grossolani collocati sulle superfici terrazzate.

2 Area di studio

Il Fiume Misa nasce nel comune di Genga (Appennino Centrale, regione Marche), nella località San Donnino sul Colle Ameno (ad una quota di circa 793 m s.l.m.), e sfocia nel Mare Adriatico nel comune di Senigallia (AN), dopo averne attraversato il centro abitato. Il bacino ha una superficie di 378 km², ed il fiume si sviluppa per circa 48 km con una pendenza media dello 0.46% (Figura 1) (Bagnarelli et al., 2016). Il punto iniziale che è stato considerato in questo studio per le misure relative alla lunghezza dell'asse fluviale è stato individuato ad Arcevia (AN), nella località Le Conce (43°30'05.8"N 12°56'57.9"E), ad una quota di circa 333 m s.l.m. L'area di studio ha origine a 1.3 km dal punto considerato per l'estrazione dei profili topografici (43°30'36.8"N 12°57'29.3"E), ad una quota di 254 m s.l.m., e corrisponde al primo sito dove è stato rinvenuto un deposito anomalo di ghiaie, e termina a 25.3 km dal punto iniziale ed a 44 m s.l.m. di quota (43°36'59.2"N 13°07'27.4"E), dove è stato rinvenuto l'ultimo deposito (Figura 2). A partire da questo punto, poco prima dell'abitato di Pianello di Ostra, sono stati costruiti degli argini di contenimento e i terrazzi sono stati completamente disconnessi dall'alveo fluviale. Cinque km più a valle lungo l'asse del fiume vi è la confluenza del Nevola nel Misa, unico suo affluente di dimensioni importanti (Figura 1).



Figura 1. Il corso del Fiume Misa e l'area di studio

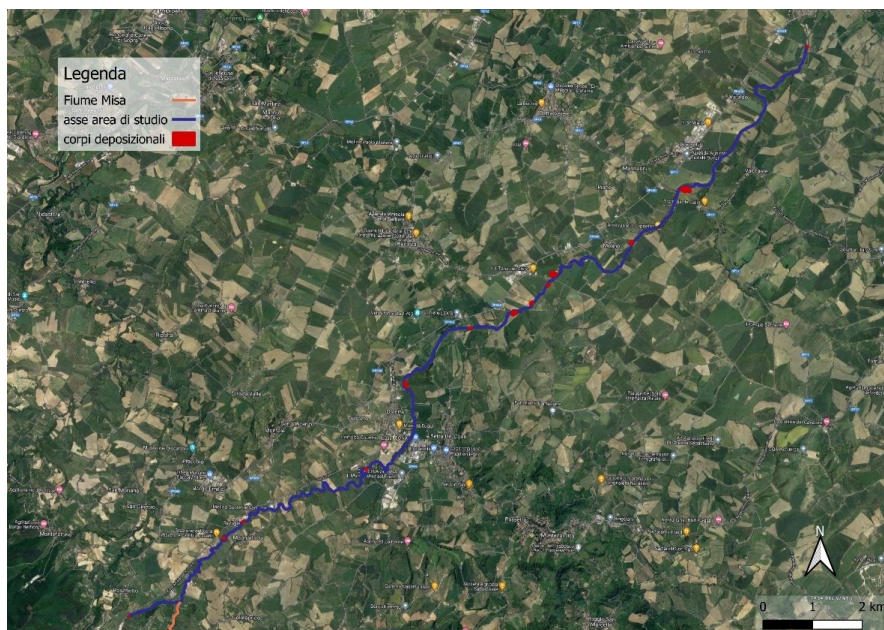


Figura 2. Il settore del Fiume Misa oggetto di studio e la localizzazione dei corpi deposizionali grossolani

2.1 Inquadramento geografico e geologico

Il territorio marchigiano è caratterizzato da una ristretta pianura costiera, di larghezza variabile, sovrastata da una fascia collinare, con rilievi attorno ai 300-400 metri, solcata da valli trasversali dove scorrono fiumi a carattere per lo più torrentizio, a cui segue la dorsale appenninica, con rilievi più importanti dai 600-800 ai 1500-1800 metri s.l.m. (Amici & Romina, 2002). Il Misa è un fiume ad alveo ghiaioso, il cui corso può essere diviso in due segmenti principali: un'area montuosa-collinare, più occidentale, corrispondente al breve tratto vicino ad Arcevia e caratterizzata da formazioni calcaree e marnoso-calcaree, e l'area collinare-pianeggiante che occupa la maggior parte dell'area di studio (Bagnarelli et al., 2016). In quest'ultima affiora localmente la formazione Plio-pleistocenica delle Argille Azzurre, caratterizzata da argille, argille marnose, argille-sabbioso-siltose con intercalazioni di arenarie; queste sono state individuate come il substrato su cui poggiano i depositi continentali quaternari, che vanno a costituire i terrazzi fluviali entro i quali è collocato l'alveo del fiume (Bagnarelli et al., 2016). Mentre nella porzione mediana del fiume i terrazzi sono costituiti per lo più da ghiaie calcaree, caratterizzate da intercalazioni di lenti di depositi più fini (si veda

come esempio la sezione stratigrafica dello stop 18 in Appendice) e da un aumento di litofacies sabbiose ed argillose sulla sommità dei depositi, nella parte più valliva e verso l'area di foce nei depositi alluvionali terrazzati aumenta, generalmente, sia la componente sabbiosa, che quella limosa e argillosa (Bagnarelli et al., 2016). I depositi fluviali attuali presenti all'interno dell'alveo tendono ad una progressiva diminuzione granulometrica (*fining*) verso valle, restando comunque prevalentemente ghiaiosi fino alla foce (Bagnarelli et al., 2016).

Da un punto di vista climatico-pluviometrico, il territorio della Regione Marche può essere suddiviso in tre fasce longitudinali principali: una costiera, una medio-bassocollinare ed una altocollinare-montana (Amici & Romina, 2002). Il bacino del Misa rientra nelle prime due fasce, per cui le precipitazioni medie annue dal 1950 al 1989 all'interno di questo possono essere così ripartite in base all'altitudine:

- Tra 0 e 200 m: 852 mm
- Tra 200 e 400 m: 917 mm
- Tra 400 e 600 m: 945 mm.

In particolare, le precipitazioni medie annue misurate dai pluviometri dei 3 principali comuni presenti all'interno dell'area di studio sono le seguenti (Amici & Romina, 2002):

- Arcevia (dal 1950 al 2000): 946 mm
- Barbara (dal 1950 al 1989): 901 mm
- Ostra (dal 1950 al 1989): 852 mm.

2.2 L'evento del 15-16 settembre 2022 nel bacino del Misa

Il 15 settembre 2022 le regioni centrali italiane sono state interessate da un'estesa ondata di maltempo causata dalla convergenza tra masse di aria fredda di origine atlantica e di aria calda e umida dall'Africa settentrionale, che nel primo pomeriggio hanno dato origine a sistemi convettivi sia nel versante tirrenico che umbro-marchigiano dell'Appennino (Boccanera et al., 2022). Nelle ore successive,

dalle 17:00 locali alle 20:00, il sistema temporalesco si è trasformato in autorigenerante e si è esteso alle aree collinari e costiere della provincia di Ancona, incrementando l'intensità delle precipitazioni il cui accumulo localmente ha superato i 400 mm (Boccanera et al., 2022).

All'interno del bacino del Misa, i pluviometri di Arcevia, Colle e Barbara hanno registrato le precipitazioni cumulative dell'evento, riportate nella Tabella 1, in cui figurano anche i tempi di ritorno delle stesse, che mettono in evidenza l'eccezionalità di un evento di tale portata, che tra le altre cose è avvenuto a valle di un periodo siccitoso durato alcuni mesi (Boccanera et al., 2022). L'improvvisa piena del Fiume Misa ha avuto luogo dal tardo pomeriggio fino al mattino successivo, con il picco durante la serata e la notte tra il 15 e il 16 settembre. I livelli idrometrici registrati dalle sezioni del bacino del Misa indicano valori massimi che si attestano sui 6.5 metri, anche se i dati sono lacunosi a causa del danneggiamento o della totale distruzione di alcune stazioni idrometriche, come quella di Serra de' Conti e Pianello di Ostra, da parte dell'onda di piena (Figura 3) (Boccanera et al., 2022). Per tale ragione non è al momento possibile associare un tempo di ritorno alla piena, che comunque può essere definita come un evento alluvionale con magnitudo molto elevata. A causa delle piene improvvise e delle esondazioni distruttive hanno perso la vita 12 persone, travolte dalle acque del Misa e del suo affluente Nevola; inoltre sono state distrutte diverse strade, ponti, infrastrutture e danneggiate attività produttive e commerciali (Consiglio Nazionale delle Ricerche & Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica, s.d.).

STAZIONE	BACINO	Cumulate evento 15-16 settembre 2022				TR (ANNI)			
		max 3H	max6H	max12H	max24H	3H	6H	12H	24H
Cantiano	Biscubio	256.6	384	419	419	>1000	>1000	>1000	>1000
Monte Acuto	Cesano	248.4	343	384.2	384.4	>1000	>1000	>1000	>1000
Arcevia	Misa	94.8	117.8	128.8	129.2	>1000	>1000	910	200
Barbara	Misa	111.4	121.2	127	127.2	>1000	>1000	>1000	140
Colle	Misa	162.4	186.4	204	204	>1000	>1000	>1000	>1000
Sassoferrato	Sentino	62.8	99.8	99.8	100.4	130	600	120	30
Colleponi	Sentino	68	122	122.2	122.6	230	>1000	750	150
Monte San Vicino	Musone-Esino	108.2	120	192.8	193.6	>1000	750	>1000	>1000
Cingoli	Musone	160.4	184.6	247.2	247.6	>1000	>1000	>1000	>1000

Tabella 1. Precipitazioni cumulative dell'evento 15-16 settembre 2022, da F. Boccanera et al. (set. 2022)

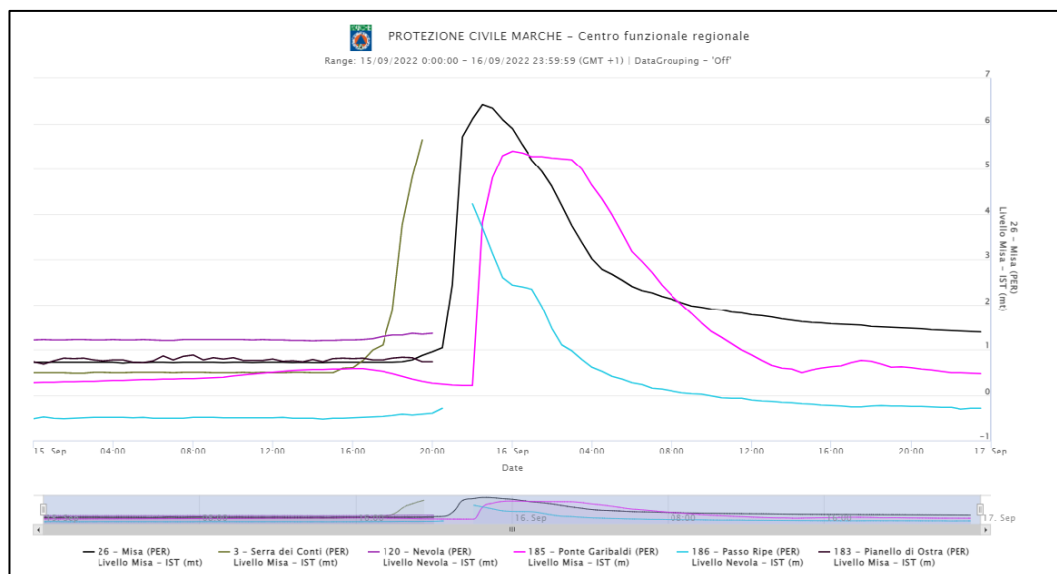


Figura 3. Livelli idrometrici registrati alle sezioni di Serra de' Conti, Pianello di Ostra, Corinaldo (Nevola), Passo Ripe, Bettolle (Misa) e Ponte Garibaldi, nel bacino del Misa. Nel grafico gli orari sono riferiti all'ora solare; immagine di Boccanera et al., 2022

3 Materiali e metodi

3.1 Materiali

Nella fase di raccolta dei dati di campagna, per le misure relative alle geometrie dei siti e agli spessori dei depositi sono stati utilizzati metri a nastro, metri ripiegabili a stecche e un'asta metrica da 5 metri, ed è stata utilizzata una livella ottica per la misura dei dislivelli fra le superfici fluviali (es. talweg, terrazzi). Nelle analisi granulometriche è stato utilizzato un granulometro costituito da un *template* in alluminio con fori di dimensioni corrispondenti alle principali classi granulometriche di interesse.

Come software geografico è stato adoperato QGIS (versione 3.30.0 "s-Hertogenbosch"), nel quale sono stati utilizzati come layer:

- Ortofoto aerea Protezione Civile Regione Marche, acquisita in data 18/09/2022 (immediatamente a seguito dell'evento)
- Google Satellite Hybrid

- CTR Regione Marche in scala 1:5000
- DEM Regione Marche con risoluzione spaziale 20 m/pixel

Per la costruzione di grafici e i calcoli idraulici è stato utilizzato Microsoft Excel, mentre le sezioni stratigrafiche, realizzate a mano, sono state successivamente digitalizzate tramite il software grafico “Inkscape” di The Inkscape Team.

3.2 Metodi

La prima fase dello studio si è svolta in campo, a marzo 2023, 6 mesi dopo l’evento alluvionale. Una prima valutazione è stata eseguita con l’utilizzo congiunto della CTR della Regione Marche e delle immagini telerilevate dell’area di studio fornite dalla Protezione Civile della Regione Marche, che sono state utilizzate per una prima individuazione e localizzazione dei depositi. Successivamente è stato percorso tutto il tratto in esame del Fiume Misa, e sono stati fatti degli stop nei punti più significativi, per un totale di 28, numerati in una scala temporale dal primo eseguito (stop 1) all’ultimo (stop 28); per ogni stop sono state raccolte delle osservazioni sulle dimensioni e geometrie dell’alveo, sulle caratteristiche delle sponde e sui processi geomorfologici avvenuti.

Sono stati individuati 12 siti (s. 6, 7, 9, 10, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 26) in cui è stata riscontrata la presenza di depositi anomali di ghiaie sui terrazzi ancora intatti e accessibili. In corrispondenza di tali siti sono state condotte analisi di campo di maggior dettaglio: in prima battuta sono state eseguite delle sezioni stratigrafiche schematiche che comprendessero l’alveo, le sponde e i depositi, con le relative litologie. A tali sezioni sono poi state aggiunte le misure ottenute con l’utilizzo congiunto dell’asta metrica e della livella ottica: mentre una persona sostiene l’asta, un misuratore riporta il valore di altezza ottenuto sottraendo il dislivello tra i propri occhi e la superficie di cui si vuole misurare l’altezza. Così si ottiene la misura del dislivello altimetrico tra la superficie su cui poggia l’asta (ad esempio il talweg) e quella su cui si trova il misuratore (ad esempio il terrazzo). Ponendosi in più livelli orizzontali si sono potute ottenere le misure relative alle geometrie delle sezioni. In particolare, sono state definite tre altezze (Figura 4):

- H_{w1} (altezza del *bankfull* sul talweg, ovvero l'altezza delle sponde che nel caso del Fiume Misa corrisponde alla sommità dei terrazzi su cui si trovano i depositi)
- H_{w2} (altezza massima raggiunta dall'acqua rispetto al talweg)
- H_{w3} (altezza massima raggiunta dall'acqua rispetto al deposito).

L'altezza massima raggiunta dall'acqua per ogni stop è stata ricavata dalla *trashline*, ovvero la quota alla quale vi è un accumulo, solitamente su alberi, di materiale galleggiante (frammenti vegetali, plastica, ecc.) trasportato durante la piena (Figura 5). Sono state anche prese le misure relative allo spessore dei depositi, a livello dello spessore massimo osservato rispetto alla superficie terrazzata. Successivamente, venivano condotte le analisi granulometriche sui depositi e, dove possibile, sulle vicine barre collocate nell'alveo attivo, adoperando il metodo di campionamento *grid-by-number counting* (Bunte & Abt, 2001; Wolman, 1954). Per ciascun corpo deposizionale analizzato, è stato steso un metro a nastro (20 metri), e sono stati raccolti i dati granulometrici da clasti ad una distanza costante di 20 cm l'uno dall'altro (Figura 6). All'occorrenza, il metro è stato steso più volte per coprire un'area del deposito maggiore, e in tal modo si sono ottenute le classi dimensionali per almeno 100 clasti per ciascun deposito. Per dare una continuità spaziale sui dati granulometrici sono state eseguite delle analisi su barre anche in stop con depositi anomali assenti o eccessivamente rimaneggiati (s. 11, 13, 19, 24). Gli stop che sono stati considerati nel lavoro sono quindi in totale 16.

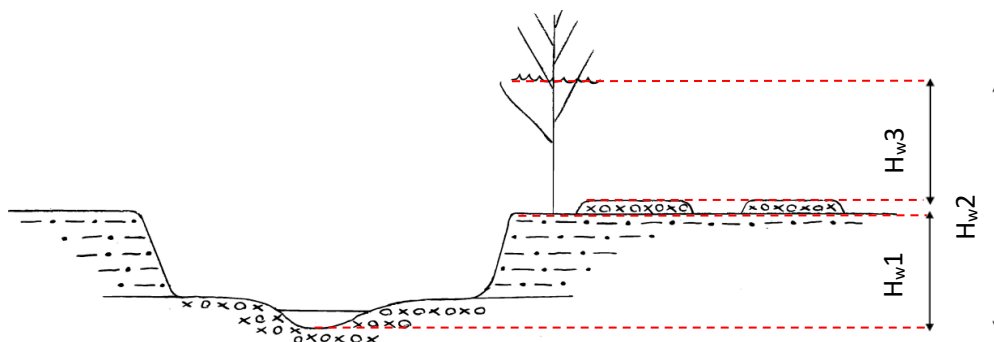


Figura 4. Illustrazione dei rapporti tra le altezze H_{w1} , H_{w2} , H_{w3} su una sezione stratigrafica (stop 23); simbologia in Figura 12



Figura 5. Esempio di trashline misurata con asta metrica (stop 9), segnata in rosso



Figura 6. Esempio della tecnica "grid-by-number counting" utilizzata per le analisi granulometriche in una barra (stop 9)

Successivamente, tramite il software geografico QGIS, gli stop sono stati georeferenziati utilizzando le ortofoto della Protezione Civile del volo del 18/09/2022. Sono poi stati creati i seguenti layer vettoriali in formato *shapefile*:

- Un layer "Depositi", dal quale sono state digitalizzate le aree occupate dai corpi deposizionali sui terrazzi;
- Un layer "Asse fluviale", dal quale si è ricavata la lunghezza totale del Fiume Misa a partire dal punto iniziale scelto (Figura 1, in giallo);
- Un layer "Asse fluviale dell'area di studio", dal punto iniziale allo stop 26, che ha permesso di ricavare le distanze progressive (Figura 2, in blu).

In corrispondenza di ciascuno dei siti caratterizzati dalla presenza dei depositi sono state calcolate le pendenze medie dell'alveo fluviale. Tali pendenze sono state calcolate utilizzando il DEM della Regione Marche per ricavare le quote e lo strumento Righello di QGIS per le lunghezze, nel seguente modo:

$$pendenza (\%) = \frac{quota\ punto\ 1\ (m) - quota\ punto\ 2(m)}{400\ m} * 100$$

In cui:

- la quota del punto 1 è stata presa 200 m a monte del sito lungo l'asse fluviale;
- la quota del punto 2 è stata presa 200 m a monte del sito lungo l'asse fluviale.

La lunghezza di 400 m (ovvero la distanza planimetrica fra i due punti considerati) è stata scelta tenendo conto che i processi che si stanno considerando hanno un'estensione spaziale di decine di metri, in alcuni casi di centinaia, e hanno avuto luogo sia sull'alveo che sui terrazzi.

3.2.1 Profili topografici

Sono stati costruiti due profili topografici, uno per tutta la lunghezza del fiume e uno per l'area di studio, tramite l'utilizzo del plugin di QGIS "*Profile Tool*", che ha utilizzato i layer "Asse fluviale" e "Asse fluviale dell'area di studio" per estrarre le rispettive distanze e il DEM della Regione Marche per le quote. I dati ottenuti sono stati utilizzati in un foglio Excel per la costruzione dei profili. Su quello relativo all'area di studio sono poi stati aggiunti i punti corrispondenti agli stop, alle H_{w2} e alle H_{w1}.

3.2.2 Caratterizzazione dei depositi

Con i dati raccolti in campagna e quelli ottenuti da QGIS sono state costruite delle schede sugli stop relativi ai depositi anomali collocati sui terrazzi, disponibili per intero in Appendice. Tali schede contengono:

- misura della distanza dal punto iniziale del settore di studio;
- larghezza dell'alveo post-evento;
- il terrazzo (destro o sinistro) su cui è localizzato il deposito;
- le altezze H_{w1} e H_{w3};
- pendenza locale dell'alveo;
- tipo di sponde e i processi erosivi coinvolti;

- una sezione relativa al deposito stesso, in cui vi è l'area occupata, lo spessore massimo osservato in campo, H_w2 e i parametri granulometrici caratteristici.

Tali parametri sono il D_{16} , D_{50} e D_{84} , ovvero i valori granulometrici percentili ottenuti dalla distribuzione cumulativa delle dimensioni dei clasti, che rappresentano rispettivamente il sedicesimo, il cinquantesimo e l'ottantaquattresimo percentile. Questi sono stati ottenuti tramite un foglio di calcolo Excel in cui, per ogni classe dimensionale di ciascun deposito, figurano:

- indice φ ($\varphi = -\log_2 D$)
- numerosità di ogni classe granulometrica rilevata in campo
- percentuale di ogni classe granulometrica
- percentile di ogni classe granulometrica

I parametri sono stati ottenuti con la seguente equazione:

$$D_x = 2^{\varphi} - \left(\varphi_{sup} + \left(\frac{\varphi_{sup} - \varphi_{inf}}{F_{sup} - F_{inf}} \right) * (F_x - F_{inf}) \right)$$

In cui:

- x = valore percentile (16, 50, 84)
- φ_{sup} = indice φ per la classe granulometrica superiore a x
- φ_{inf} = indice φ per la classe granulometrica inferiore a x
- F_{sup} = frequenza (%) della classe gran. sup. rispetto a x
- F_{inf} = frequenza (%) della classe gran. inf. rispetto a x
- F_x = frequenza (%) di x (16, 50, 84 %)

I diametri sono poi stati messi in relazione con la distanza progressiva dal punto iniziale in dei grafici, per ottenere una visione globale della variazione longitudinale delle granulometrie.

3.2.3 Calcoli idraulici

I sedimenti fluviali possono essere mobilizzati ad opera di un flusso idrico attraverso due meccanismi principali, ovvero trasporto al fondo (*bedload*) o

trasporto in sospensione (*suspended load*). Il primo interessa principalmente sabbie grossolane (> 0.1 mm) e ghiaie, e prevede un movimento in prossimità del fondo per trascinamento, rotolamento o saltellamento per brevi distanze. Nel trasporto in sospensione, che riguarda solitamente sabbie fini, limo e argilla, le particelle sono trasportate per lunghi tratti all'interno della colonna d'acqua.

Per determinare quale meccanismo di trasporto si sia attivato durante l'evento in corrispondenza delle aree caratterizzate da depositi anomali sui terrazzi, è stato utilizzato il procedimento suggerito da García (2008), ed in particolare è stato adoperato il diagramma di sedimentazione Shields-Parker (Figura 7) (Garcia, 2008). Tale diagramma, introdotto da Parker a partire dagli anni '80 del secolo scorso, è stato in seguito modificato da Garcia (2000) inserendo dati di campo a completamento di quelli ottenuti in esperimenti in canaletta (Figura 8). Il diagramma permette di definire il meccanismo attraverso il quale un clasto di dimensioni note può essere trasportato ad opera di un flusso idrico in ambito fluviale, distinguendo condizioni di immobilità (*no motion*), trasporto al fondo (*no suspension*) e trasporto in sospensione (*suspension*). Tale distinzione avviene considerando due parametri che si riferiscono alle caratteristiche del flusso (Shields stress) e della particella considerata (numero di Reynolds). Lo *Shields stress* (τ^*) per condizioni di flusso uniforme è definito dal valore adimensionale:

$$\tau^* = \frac{\tau_b}{\rho g R D} = \frac{H S}{R D} \quad (\text{Da García, 2008})$$

Dove

- τ_b = sforzo di taglio al fondo (Pa)
- g = accelerazione gravitazionale (9,8 m/s²)
- R = gravità specifica sommersa del sedimento, ottenuta tramite l'equazione: $R = (\rho_f - \rho_s) / \rho_f$, dove
 - ρ_f = densità del fluido (kg/m³)
 - ρ_s = densità del sedimento (kg/m³)
- D = diametro medio del sedimento = D50 (m)

- H = profondità del flusso (m)
- S = pendenza del corso d'acqua (m/m)

Il numero di Reynolds R_{ep} , un sostituto adimensionale della dimensione dei grani, è definito da:

$$R_{ep} = \frac{\sqrt{gRDD}}{\nu} \quad (\text{Da García, 2008})$$

Dove

ν = viscosità cinematica del fluido (m^2/s).

Sulla base dei dati di campo disponibili, i valori dei due parametri per ogni stop sono stati plottati nel grafico, il quale reca sull'asse orizzontale i valori di R_{ep} e sull'asse verticale quelli di τ^* , e permette di valutare se un dato clasto possa essere mobilizzato, e in caso affermativo se il trasporto rientri nel *bed-load* o se sia in sospensione. Per ciascun clasto considerato sono state utilizzate le tre diverse profondità del flusso già citate nella Sezione 3.2, in modo da riconoscere il tipo di trasporto in condizioni di:

- *Bankfull flow* (H_w1), quindi nella fase dell'evento in cui il flusso è ancora all'interno dell'alveo ma ha raggiunto la sommità delle sponde.
- al momento di piena massima rispetto talweg, in cui il fiume esonda sui terrazzi (H_w2)
- al momento di piena massima considerando l'altezza del flusso rispetto alla superficie dei terrazzi (H_w3).

In questo modo è stato possibile simulare l'evoluzione della piena e dei relativi meccanismi di trasporto nel tempo e nello spazio, a partire dalla condizione di *bankfull* per poi passare alla fase di esondazione dell'acqua sui terrazzi.

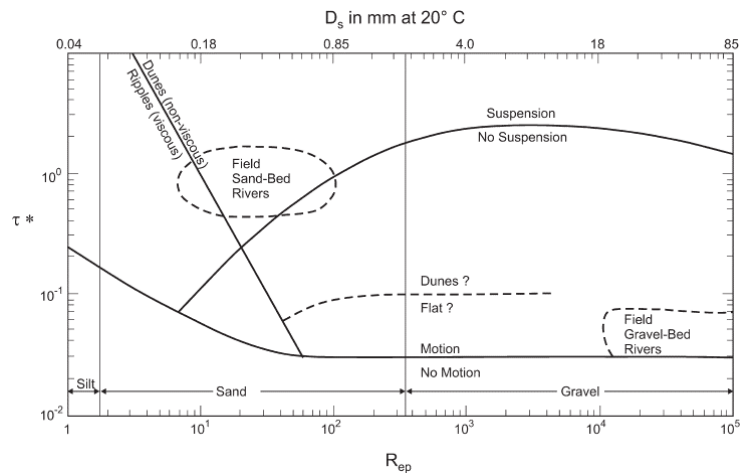


Figura 7. Diagramma di sedimentazione Shields-Parker (Garcia 1999); (Fig. 2-28 da Garcia, 2008);

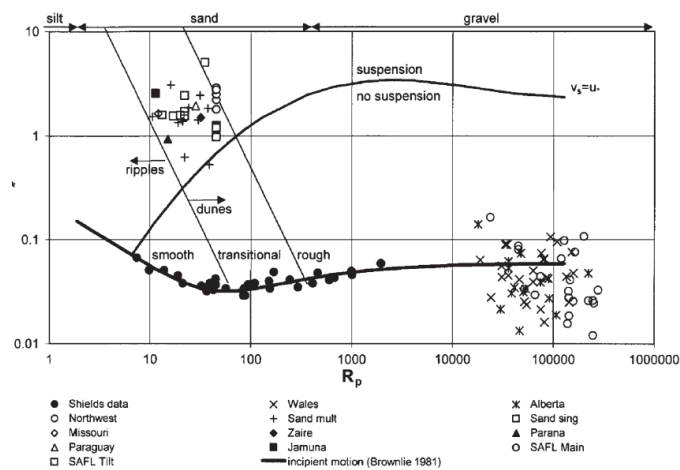


Fig. 2-29. Shields-Parker River Sedimentation Diagram (after Garcia 2000).

Figura 8. Diagramma di sedimentazione Shields-Parker (after Garcia 2000); (Fig. 2-29 da Garcia, 2008);

Fra i parametri da considerare per i quali si avevano a disposizione misure dirette vi è la densità del fluido (ρ_f), necessaria per determinare il valore di R. In questo caso sono stati considerati tre diversi valori di densità, presi dalla Tabella 1 di Rickenmann (1991), ai quali sono associate le relative viscosità dinamiche misurate sperimentalmente. Sono state scelte le *Ci* (*Clay Concentration Levels*, la concentrazione di sedimento fine) H₂O, C1 e C5, per simulare rispettivamente:

- condizioni di acqua pura (998 kg/m³, dai 0,998 g/cm³ riportati nel paper),
- flusso con trasporto in sospensione abbastanza intenso (1078 kg/m³, da 1,078 g/cm³ nel paper)

- flusso iperconcentrato (1365 kg/m^3 , da $1,365 \text{ g/cm}^3$ nel paper).

Successivamente, per ognuna di queste densità è stata calcolata la viscosità cinematica a partire dalla viscosità dinamica (viscosità cinematica (m^2/s) = viscosità dinamica ($\text{kg/m}^*\text{s}$) / densità fluido (kg/m^3)), ottenendo i seguenti valori:

- $\text{H}_2\text{O} = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (viscosità dinamica = 1 cP);
- $\text{C1} = 4.6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (viscosità dinamica = 5 cP);
- $\text{C5} = 183.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (viscosità dinamica = 250 cP).

Per quanto concerne la densità del sedimento (ρ_s) è stato adottato il valore di 2500 kg/m^3 , ritenuto rappresentativo delle litologie presenti in alveo.

4 Risultati

4.1 Profilo longitudinale, altezze idrometriche e localizzazione dei depositi

In Figura 9 è riportato il profilo topografico dell'intero asse fluviale del Fiume Misa, considerato a partire dal punto iniziale scelto. L'area di studio occupa la maggior parte della prima metà del tracciato e una parte della seconda. Inizialmente, nell'area arceviese più montuosa-collinare la pendenza è piuttosto elevata (da 1.12% a 3.4%), in seguito tende a decrescere progressivamente fino ai 15 km, per poi rimanere piuttosto stabile (con una pendenza media circa dello 0.5%) fino ad una decina di km dalla foce, quando la topografia diventa pianeggiante. La Figura 10, dove sono stati plottati i siti in cui sono state eseguite analisi granulometriche di barre e/o depositi, mostra la distribuzione spaziale degli stop. Il tratto compreso tra gli stop 16 e 18 è il più scarso, sia per la pressoché assenza di depositi anomali sia per le difficoltà tecniche riscontrate nell'accedervi in campo. Per quanto riguarda gli stop con depositi (s. 6, 7, 9, 10, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 25, 26), questi tendono ad essere più numerosi e concentrati a partire dai 12 km dallo s. iniziale 6 (quindi circa 13.5 km dal punto iniziale), dove le pendenze tendono ad essere basse e assumere valori piuttosto costanti. Sul profilo in Figura 11 sono stati invece aggiunti i punti relativi alle altezze massime raggiunte dall'acqua (H_w2) e alle altezze dei depositi sul talweg (H_w1), in funzione della distanza dallo stop iniziale; nel grafico, rispetto ai precedenti, la scala verticale è più esagerata per mettere in maggior evidenza le altezze rispetto all'alveo. Tali altezze diventano maggiori anche in questo caso con l'aumentare della distanza, in particolare a partire dai 12 km. La sequenza delle H_w2 potrebbe essere interpretata come l'altezza della superficie dell'onda di piena durante l'evento, messa a confronto con l'altezza della superficie in condizioni di portata normale, che corrisponde al profilo topografico stesso; i punti corrispondenti alle H_w1 potrebbero essere visti invece come le altezze minime, all'interno della colonna d'acqua, entro le quali sicuramente avveniva trasporto solido di ghiaie durante l'evento.

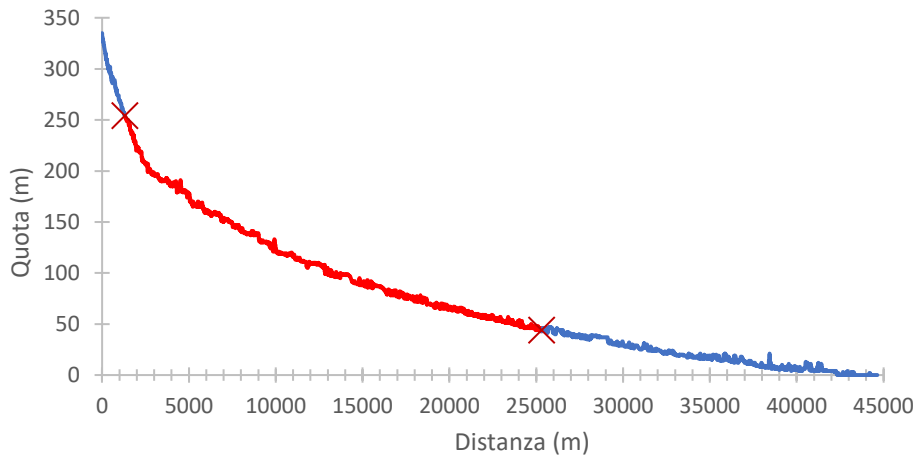


Figura 9 (in alto). Profilo topografico del fiume Misa (da Arcevia); in rosso l'area di studio

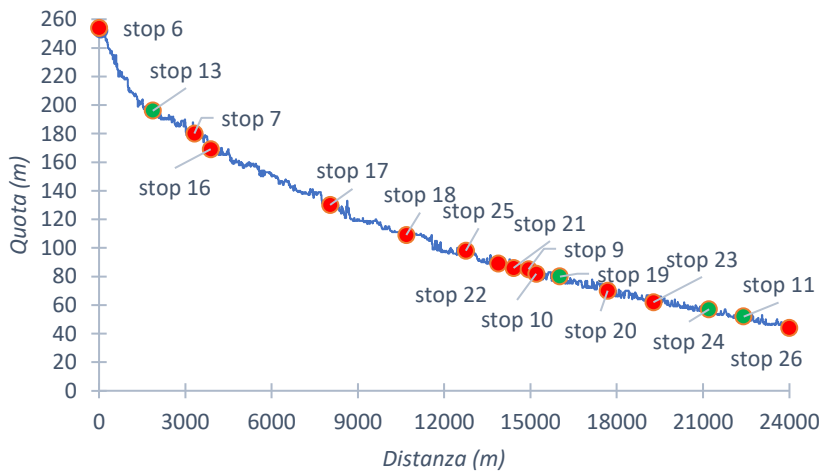


Figura 10. Profilo dell'area di studio con la posizione degli stop (in verde gli stop senza depositi);

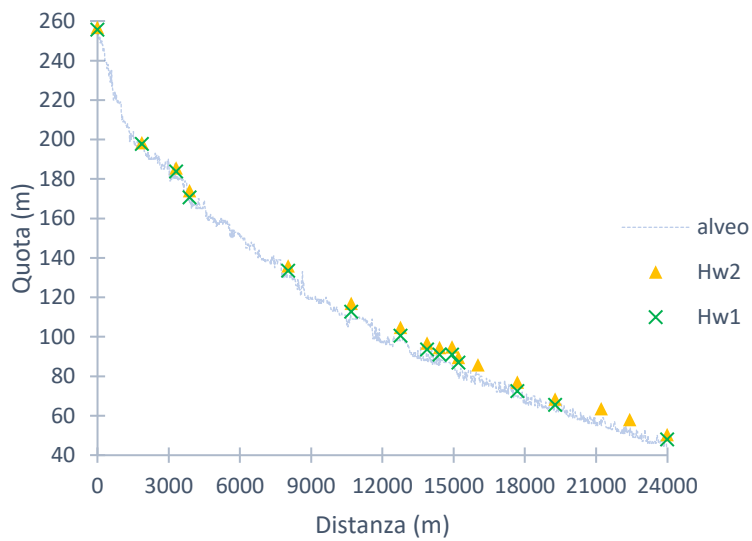


Figura 11. Profilo dell'area di studio con Hw1 e Hw2

4.2 Caratterizzazione dei corpi deposizionali

I risultati dei rilievi dei corpi deposizionali sono riportati nella Tabella 2 (disponibili per intero in Appendice). Per quanto riguarda le altezze idrometriche in gioco, al netto dei primi stop (s. 6, 7, 16, 17), queste tendono ad essere maggiori nella parte “centrale” dell’area di studio, in cui sono concentrati la maggior parte dei depositi; i valori di H_w2 variano da un massimo di quasi 10 m ai 6.5 m degli ultimi stop, mentre le H_w1 hanno valori comparabili dai 3 ai 4-5 m.

Le dimensioni areali sono estremamente variabili, anche se c’è da considerare che, tra i più estesi, negli stop 22 e 23 il valore è il risultato della somma delle aree dei due depositi contigui osservati e sui quali sono state fatte analisi. Queste misure inoltre spesso rappresentano una sottostima: nella maggior parte degli stop erano presenti altri depositi con minore estensione, associabili a quelli effettivamente analizzati, e in molti casi le zone agricole erano state rimaneggiate e le ghiaie completamente rimosse. Gli spessori massimi osservati sono simili, con una media di 30 cm, mentre la maggior parte delle pendenze locali sono inferiori all’1%, ad esclusione di qualche stop con pendenza più elevata.

Le sponde sono quasi tutte verticali o subverticali; ve ne sono poche non coesive, in cui vi è solamente la componente ghiaiosa dei terrazzi, mentre vi è un maggior numero di composite, per l’aumento dei sedimenti più fini nella parte sommitale dei terrazzi verso valle. Una grande parte è però coesiva, a causa della presenza nelle sponde di affioramenti piuttosto spessi dei sedimenti pelitici delle Argille Azzurre. È importante sottolineare che tali sponde sono caratteristiche della zona più densamente caratterizzata dalla presenza dei depositi (stop 22, 21, 9), nella quale sono state registrate anche le altezze massime del flusso maggiori (Tabella 2).









STOP	DISTANZA	HW1	HW2	HW3	AREA	SPESSO REM. O.	PENDEN ZA	SPONDA DESTRA	SPONDA SINISTRA
STOP 6	1323 m	1,6 m	2,8 m	1,2 m	18 m ²	15 cm	3,40%	bassa pendenza	bassa pendenza
STOP 7	4633 m	3,75 m	5,5 m	1,75 m	438 m ²	25 cm	1,12%	subverticale	bassa pendenza
STOP 16	5200 m	1,7 m	5 m	3,3 m	135 m ²	25 cm	2,79%	subverticale	subverticale, coesiva
STOP 17	9353 m	3,5 m	6 m	2,5 m	202 m ²	50 cm	0,36%	subverticale, composita	subverticale, composita
STOP 18	12008 m	3,8 m	8 m	4,2 m	1650 m ²	30 cm	0,20%	bassa pendenza, coesiva	subverticale, non coesiva,
STOP 25	14081 m	2,5 m	6,8 m	4,3 m	303 m ²	30 cm	0,23%	verticale, composita	bassa pendenza
STOP 22	15205 m	4,5 m	7,8 m	3,3 m	3009 m ²	35 cm	0,60%	verticale, coesiva	subverticale, coesiva
STOP 21	15729 m	5 m	8,6 m	3,6 m	870 m ²	30 cm	0,07%	verticale, coesiva	subverticale, coesiva
STOP 9	16253 m	6 m	9,8 m	3,5 m	305 m ²	25 cm	1,17%	verticale, coesiva	subverticale, coesiva
STOP 10	16524 m	2 m	7,5 m	5,5 m	4895 m ²	20 cm	0,71%	subverticale, non coesiva	bassa pendenza
STOP 20	19006 m	2,5 m	7 m	4,5 m	1499 m ²	100 cm	0,64%	subverticale, composita	subverticale, composita
STOP 23	20594 m	3,5 m	6,5 m	3 m	6720 m ²	30 cm	0,77%	subverticale, coesiva	subverticale, coesiva
STOP 26	25321 m	4 m	6,4 m	2,4 m	49 m ²	35 cm	0,50%	coesiva	coesiva

Tabella 2. Scheda riassuntiva dei siti dei corpi deposizionali

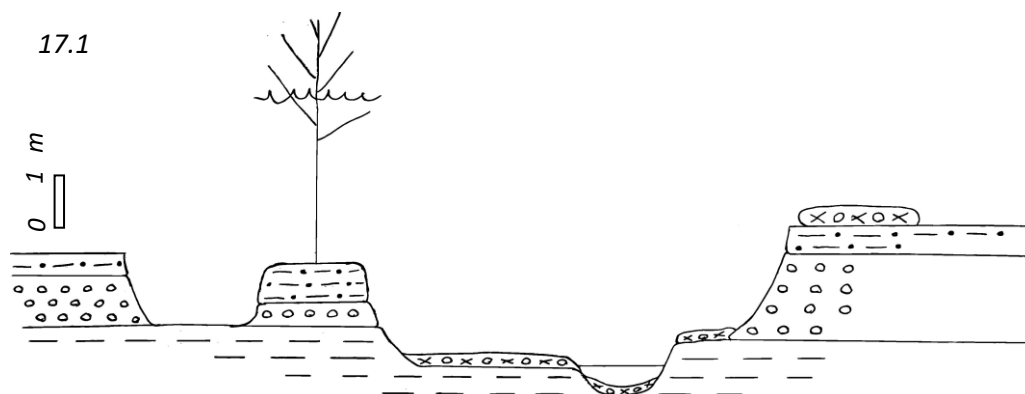
4.2.1 Esempi di schede di corpi deposizionali

La Tabella 2 è stata estrapolata a partire dalle schede che sono state costruite per ogni deposito, riportate per intero in Appendice. Di seguito sono illustrate quella dello stop 17, il più rappresentativo per ciò che riguarda la litologia delle sponde composite ed i processi, e quella dello stop 23, il sito con i depositi più estesi. Di seguito, in Figura 13, è riportata la simbologia utilizzata per le sezioni stratigrafiche; in queste la scala grafica si riferisce solo alla dimensione verticale.

Figura 12. Simboli utilizzati nelle sezioni stratigrafiche

	Argille azzurre, substrato		Conglomerato fango sostenuto
	Siltite, sponda fine		Conglomerato, sponda grossolana
	Sabbie sciolte		Ghiaie sciolte
	Arenite, sabbie consolidate		Trashline

Stop 17



Distanza dal punto iniziale	9353 m
Larghezza alveo post-evento	11 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	6 m
H _{w3}	2 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0.357%
Sponde e processi	Sia sponda destra che sinistra sono subverticali e composite; vi è una grande area di incisione sul terrazzo sinistro, fino ad uno spessore di 1.3 m, ed erosione sulla sponda destra.

17. Corpo deposizionale

AREA	202 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	50 cm	
H _{w1}	3.5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4.7 mm
	D50	9.3 mm
	D84	22.2 mm

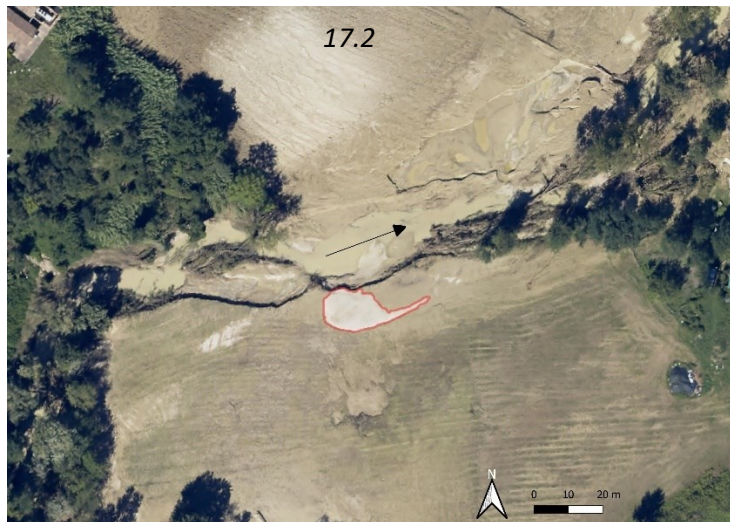
17.1 Sezione stratigrafica

17.2 Ortofoto aerea Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

17.3, 17.4 incisione sul terrazzo sinistro

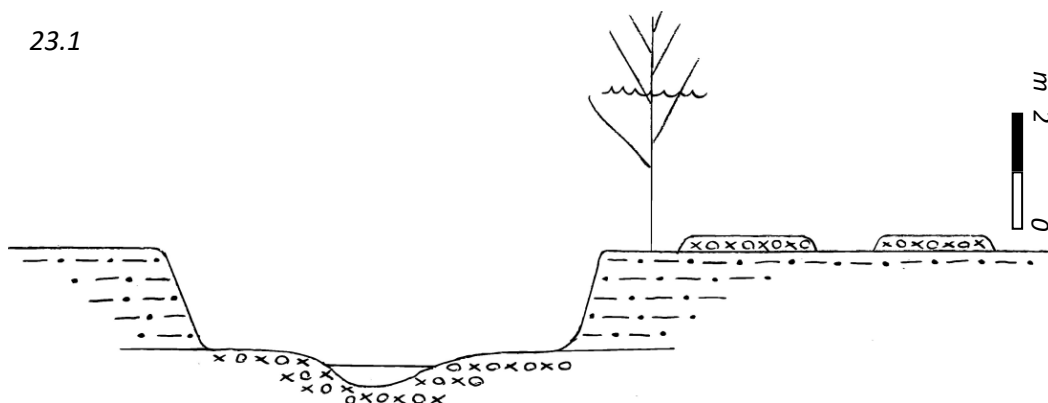
17.5 Deposito

17.6 Sponde destra e sinistra, con erosione visibile sulla destra



Stop 23

23.1



Distanza dal punto iniziale	20594 m
Larghezza alveo post-evento	16 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	6.5 m
H _{w3}	2.7 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0.77%
Sponde e processi	Entrambe le sponde subverticali e coesive.

23. Corpo deposizionale

AREA	6720 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	30 cm	
H _{w1}	3.5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	3.8 mm
	D50	7.5 mm
	D84	18.1 mm

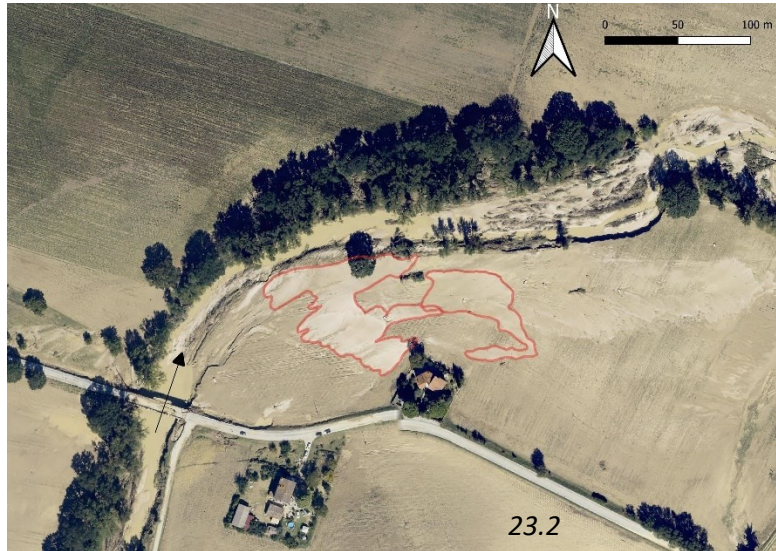
23.1 Sezione stratigrafica

23.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

23.3, 23.4 I depositi

23.5 La sponda destra composta poco più a valle, con i depositi visibili sul terrazzo

23.6 La barra su cui è stata fatta l'analisi granulometrica



4.3 Variazione longitudinale delle granulometrie

In Figura 13 è riportato il grafico sull'andamento del parametro D50 in funzione della distanza. Le dimensioni granulometriche dei depositi sui terrazzi, al netto di un aumento iniziale a livello dei primi stop (s. 6, 7, 17), rimangono costanti per tutta l'area di studio con un valore di circa 8 mm (ghiaia media), mentre quelle delle barre sono costanti nella fase iniziale, con valori paragonabili a quelli dei depositi, ed aumentano a partire dallo stop 21 per poi mantenere valori più alti, tra i 12 e i 14 mm (ghiaia media). Un comportamento analogo è osservabile per il D84 (Figura 14), con valori che si discostano maggiormente da quelli dei depositi. Si può dire che complessivamente le granulometrie dei depositi sui terrazzi sono minori di quelle delle corrispondenti barre in alveo, e in generale si discostano meno dal valore medio, per cui tendono ad essere più uniformi nelle dimensioni del sedimento, e di conseguenza meglio classati. I dati granulometrici di ogni stop sono riportati nella Tabella 3, dove è inserito anche lo stop 16, che non è stato utilizzato per i grafici a causa dell'incertezza nel definirlo deposito o barra per la sua posizione rispetto all'alveo fluviale. Nella sezione "secondo deposito" invece sono riportate le analisi granulometriche dei depositi minori dei siti in cui ne sono stati rinvenuti due separati.

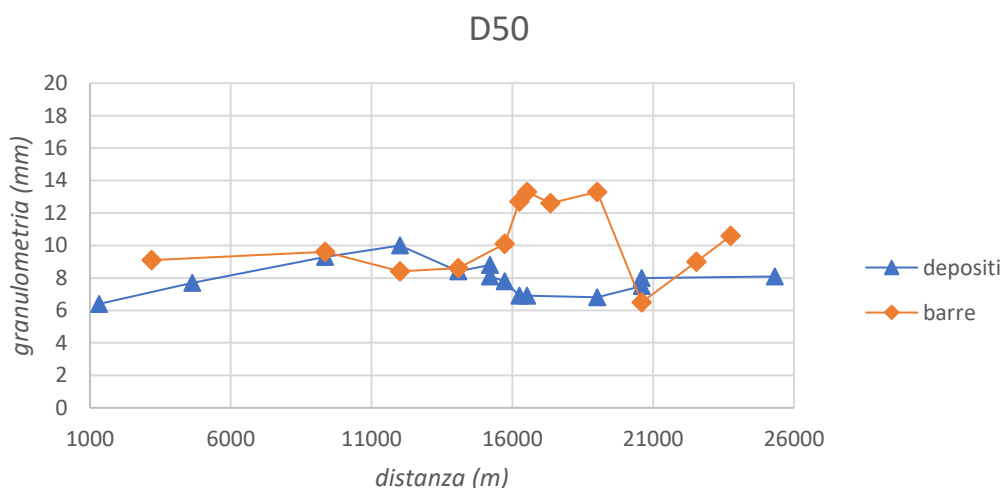


Figura 13. Andamento del D50 in funzione della distanza dal punto iniziale

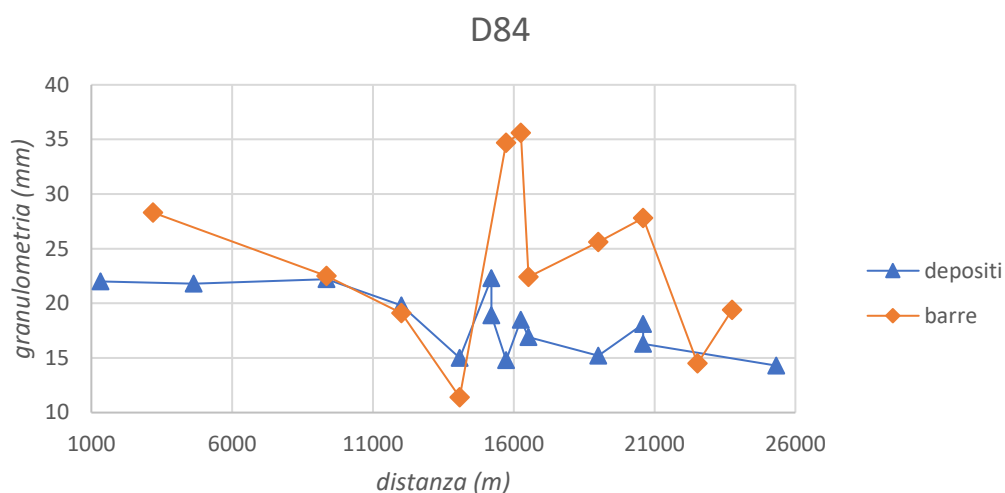


Figura 14. Andamento del D84 in funzione della distanza dal punto iniziale

STOP	DEPOSITO			BARRA			SECONDO DEPOSITO		
	D16	D50	D84	D16	D50	D84	D16	D50	D84
STOP 6	2,5 mm	6,4 mm	22 mm						
STOP 13				4 mm	9,1 mm	28,3 mm			
STOP 7	3,6 mm	7,7 mm	21,8 mm						
STOP 16	4,7 mm	19,5 mm	50,7 mm						
STOP 17	4,7 mm	9,3 mm	22,2 mm	4 mm	9,6 mm	22,5 mm			
STOP 18	5 mm	10 mm	19,8 mm	2,4 mm	8,4 mm	19,1 mm			
STOP 25	3,3 mm	8,4 mm	15 mm	4,3 mm	8,6 mm	11,4 mm			
STOP 22	4,7 mm	8,8 mm	22,3 mm				4,6 mm	8,1 mm	18,9 mm
STOP 21	4,5 mm	7,8 mm	14,8 mm	2,5 mm	10,1 mm	34,7 mm			
STOP 9	2,7 mm	6,9 mm	18,5 mm	0,2 mm	12,7 mm	35,6 mm			
STOP 10	2,9 mm	6,9 mm	16,9 mm	6,2 mm	13,3 mm	22,4 mm			
STOP 19				2,4 mm	12,6 mm	25,6 mm			
STOP 20	4,1 mm	6,8 mm	15,2 mm	4,9 mm	13,3 mm	27,8 mm			
STOP 23	3,8 mm	7,5 mm	18,1 mm	2,8 mm	6,5 mm	14,5 mm	4 mm	8 mm	16,3 mm
STOP 24				4,6 mm	9,0 mm	19,4 mm			
STOP 11				4,2 mm	10,6 mm	37,4 mm			
STOP 26	4,7 mm	8,1 mm	14,3 mm						

Tabella 3. Scheda riassuntiva delle analisi granulometriche

4.4 Calcoli idraulici per valutare i meccanismi di trasporto

I seguenti risultati si riferiscono alla valutazione dei meccanismi di trasporto che possono aver caratterizzato i clasti rinvenuti sotto forma di depositi grossolani anomali collocati sui terrazzi.

Nel primo set di diagrammi (Figure 15 A,B,C) è stata utilizzata come densità del fluido quella dell'acqua pura -998 kg/m^3 per cui è stato considerato il trasporto di ghiaie in una condizione di assenza di altro trasporto solido in sospensione. In condizioni di *bankfull flow* (H_w1), quindi in una fase della piena immediatamente precedente all'esondazione, i valori di τ^* sono tali che per 3 stop vi è trasporto in sospensione, per altri 6 al fondo, mentre i restanti 3 si trovano a cavallo tra i due tipi di trasporto. Considerando H_w2 , la situazione cambia e si ha che in gran parte dei siti (9) vi è sospensione, al di fuori di 3 stop in cui comunque si presume un *bed load* molto energetico; al di sopra dei terrazzi (H_w3) invece per 8 stop non vi è sospensione, anche se alcuni punti (3) si trovano a ridosso del limite tra i due tipi di trasporto. Considerando invece una densità del fluido pari a 1078 kg/m^3 (Figure 16 A,B,C), quindi un flusso con trasporto in sospensione piuttosto intenso, i τ^* risultano shiftati verso l'alto, per cui utilizzando l' H_w1 quasi tutti i siti risultano in sospensione o al limite tra sospensione e *bed load*, al di fuori di 3 stop che comunque manterrebbero un trasporto di fondo a energia elevata. In condizioni di picco di piena (H_w2) questi ultimi sono ulteriormente più vicini al limite, mentre per tutti gli altri stop risulta un trasporto in sospensione; sui terrazzi invece (H_w3) si ha un grafico simile a quello in figura (15,C), con un cambiamento dei valori τ^* e di Re_p tali da causare lo spostamento rispettivamente verso l'alto e verso la parte sinistra del grafico; in questo caso 4 stop risultano nel *bed load*, 3 a cavallo tra i due trasporti, e 5 in sospensione. Per il terzo gruppo di diagrammi Shields-Parker (figure 17 A,B,C) è stata utilizzata la densità di un flusso iperconcentrato (1365 kg/m^3) (Rickenmann, 1991), per avere una prospettiva su ciò che può essersi attivato anche in caso di un flusso estremamente denso. In questa condizione tutti gli stop si trovano nella parte sinistra del grafico, che andrebbe normalmente riferita a fiumi con alvei sabbiosi, e non ghiaiosi come quello del Misa; ciò è dovuto all'aumento, contestuale alla densità, della viscosità cinematica ad un valore di $183.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, che è particolarmente elevato, specie se lo si confronta con quello dell'acqua pura, di $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Questo fa sì che le particelle in movimento diventino "virtualmente più piccole", e di conseguenza più leggere. Con questo tipo di flusso è evidente che avverrebbe trasporto in sospensione ad ogni altezza,

quindi sia in *bankfull flow* che in fase di piena massima sul talweg che al di sopra dei terrazzi.

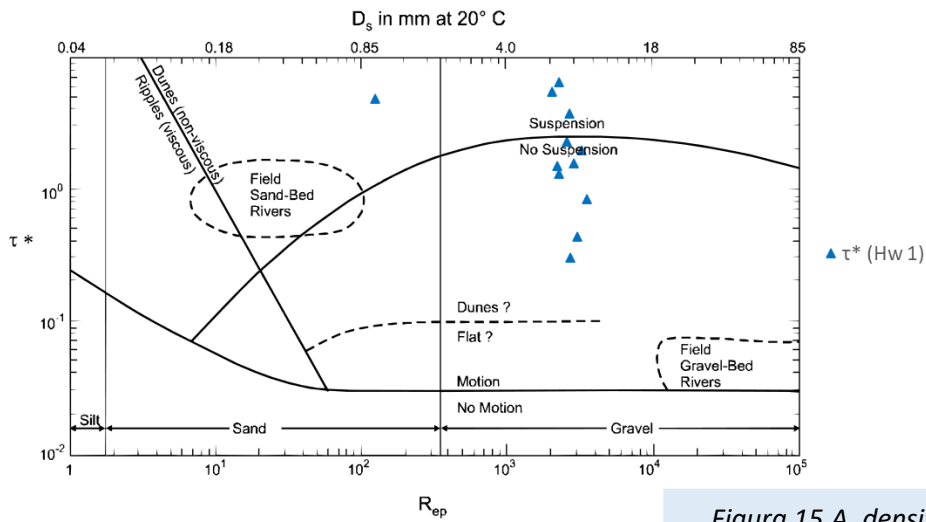


Figura 15,A. densità fluido=998 kg/m³

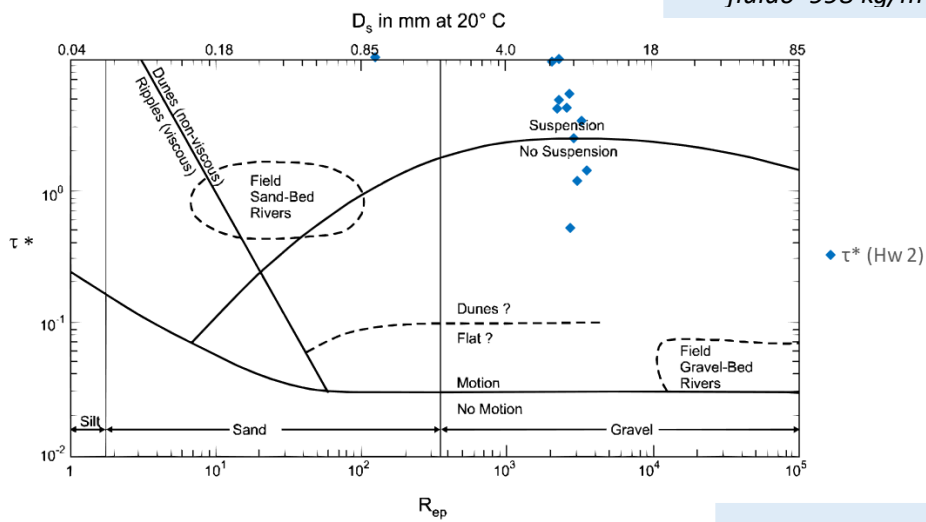


Figura 15,B

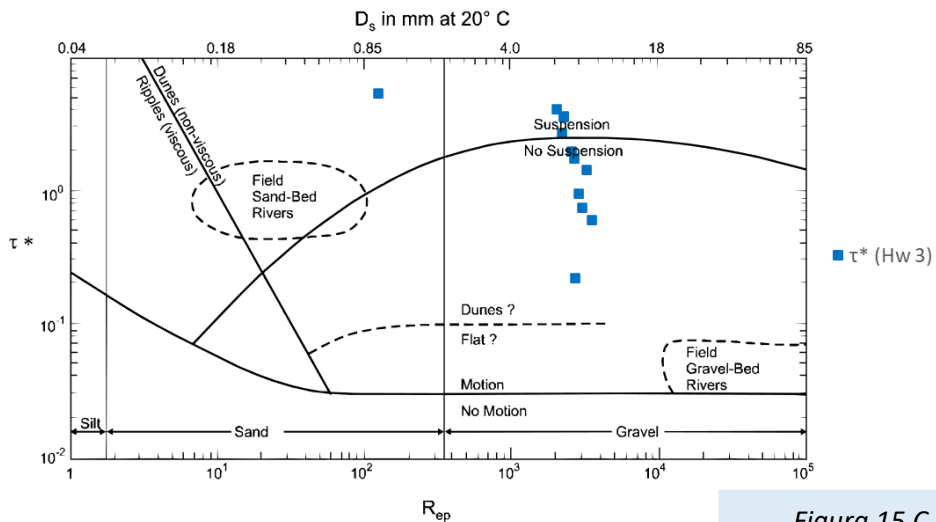


Figura 15,C

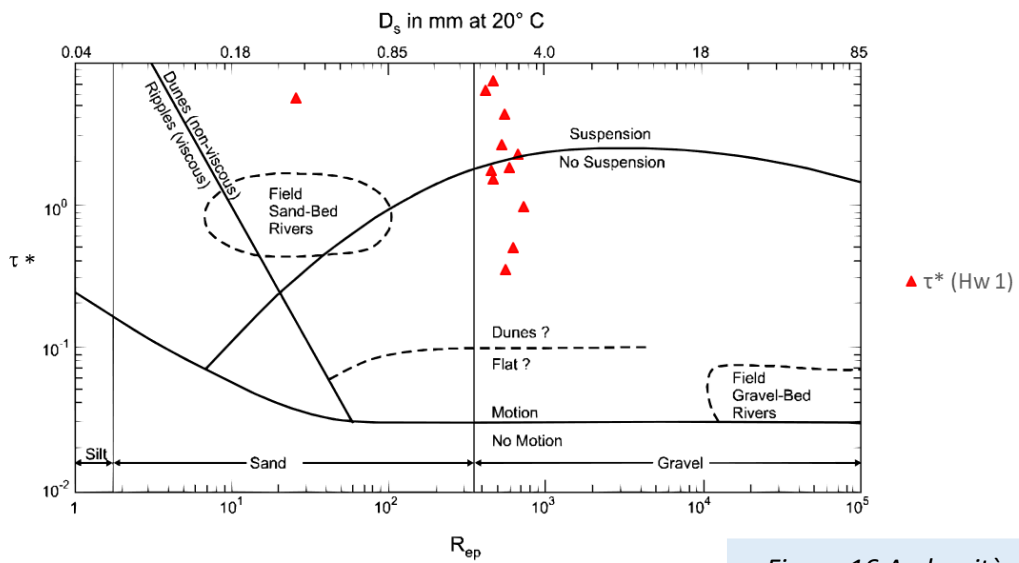


Figura 16,A. densità fluido=1078 kg/m³

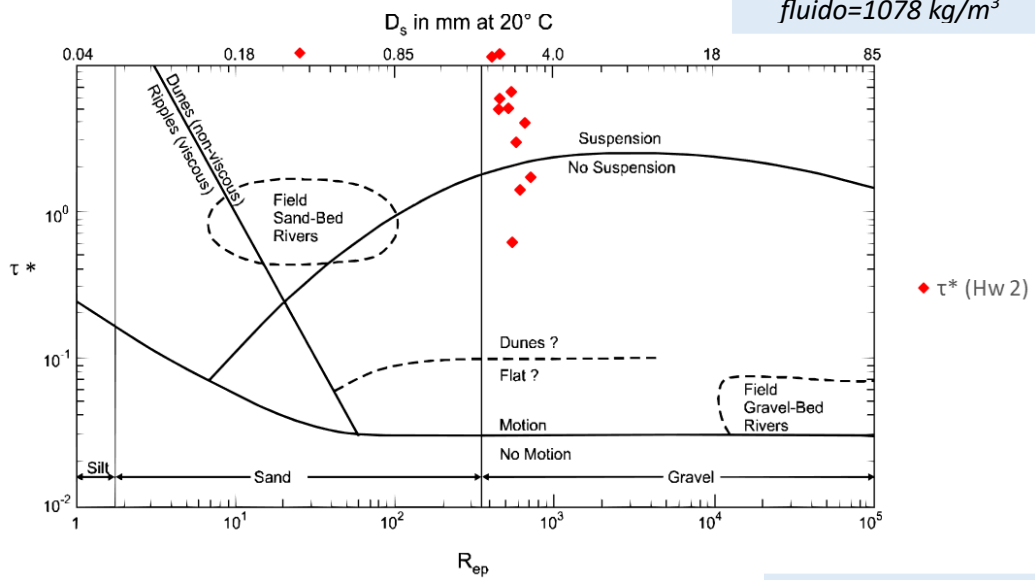


Figura 16,B

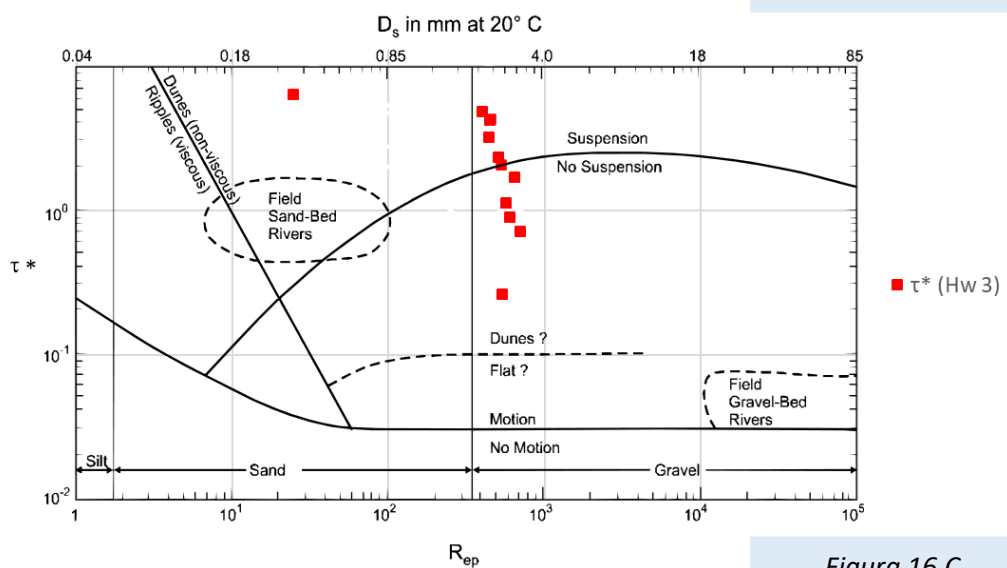


Figura 16,C

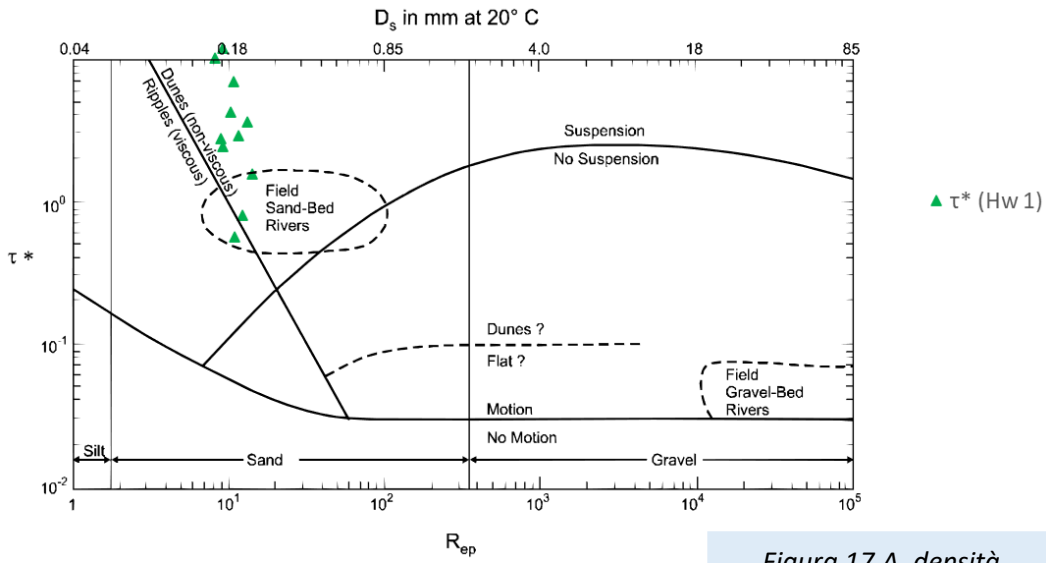


Figura 17,A. densità fluido=1365 kg/m³

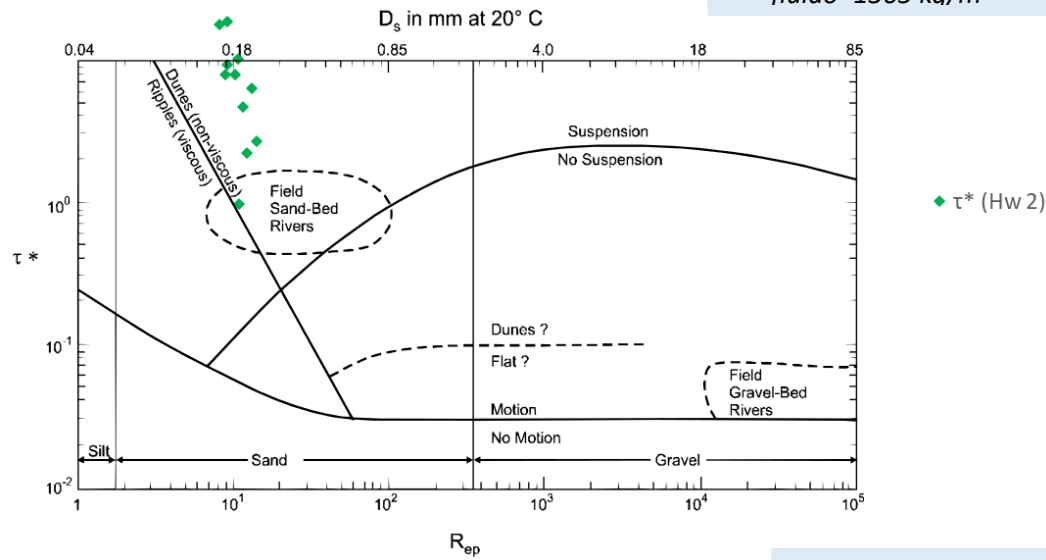


Figura 17,B

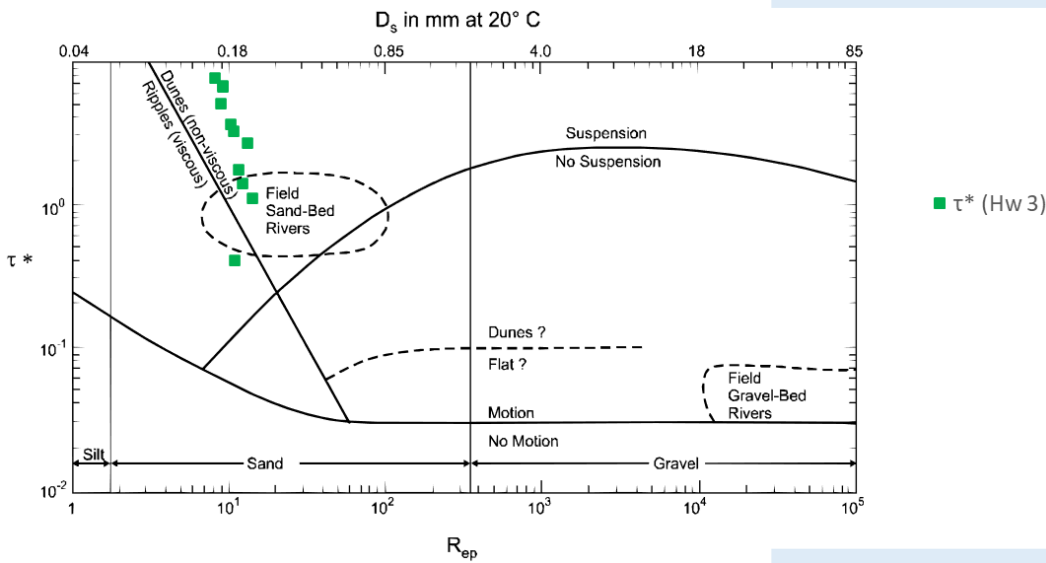


Figura 17,C

5 Discussione e conclusioni

5.1 Meccanismi di trasporto e genesi dei depositi ghiaiosi sui terrazzi

I risultati illustrati nella Sezione 4.4 mostrano le situazioni di trasporto in uno spettro di densità del fluido crescenti. Il primo *end-member*, in cui viene considerato un fluido di sola acqua pura (densità del fluido = 998 kg/m^3), dà evidenze di attivazione di trasporto in sospensione in molti stop, mentre nel caso di un flusso con alta concentrazione di sedimento (densità del fluido = 1078 kg/m^3), che rappresenta una configurazione intermedia, si osserva sospensione di ghiaie nella maggior parte dei siti. Comunque, per entrambi i valori di densità, avviene una diminuzione dello sforzo di taglio al di sopra dei terrazzi (H_w3). Nell'*end-member* a densità maggiore, in cui viene assunto un flusso iperconcentrato (1365 kg/m^3), le ghiaie sarebbero in sospensione ad ogni altezza considerata e in ogni momento della piena.

La scelta arbitraria di tre diversi valori di densità per i diagrammi Shields-Parker è dovuta all'assenza sia dei dati relativi alla piena del settembre 2022 che di dati storici sulla portata solida del Fiume Misa. Una densità pari a quella dell'acqua ($0,998 \text{ g/cm}^3$) rappresenta un valore minimo, che non corrisponde alla realtà, del quale qualsiasi flusso in condizioni reali presenta una densità maggiore. Alla luce di questo, basterebbe già osservare il comportamento delle particelle a questa densità per poter affermare che, almeno per una parte dei depositi anomali, è avvenuto trasporto di ghiaie in sospensione. Inoltre, visto ciò che accade quando si aumenta la densità (e la viscosità cinematica) a parità di granulometria media nel diagramma Shields-Parker, ovvero lo spostamento dei punti nella parte alto-sinistra del grafico, si può affermare che quanto viene messo in evidenza nelle Figure 15 A, B, C rappresenta la situazione di trasporto solido minima, e che nella realtà il movimento delle particelle è sicuramente stato influenzato in questo senso dalla presenza di altro sedimento fine in sospensione.

Una densità pari a 1078 kg/m^2 , al contrario, è più vicina a una condizione reale. Dati provenienti da diversi fiumi a livello europeo aventi caratteristiche morfometriche e geologiche simili a quelle del Fiume Misa forniscono valori di concentrazione di sedimento in sospensione misurati in condizioni di piena del tutto comparabili con quelli assunti in questo lavoro. Un esempio è il Fiume Isàbena, un piccolo bacino montano-collinare nei Pirenei centro-meridionali (nord-est della Spagna), soggetto a frequenti piene con un tasso di trasporto solido relativamente alto; Lòpez-Taranzon et al. (2009) hanno misurato i valori massimi di concentrazione del sedimento in sospensione durante le piene, nel periodo dal 2005 al 2008. Tra questi, i più alti sono pari a 99.63 gl^{-1} , 111 gl^{-1} , e 89.18 gl^{-1} , che comportano tutti un aumento della densità del fluido fino a circa 1060 kg/m^3 , mentre per una piena nel 2006 è stata misurata una concentrazione di addirittura 357 gl^{-1} , che porterebbe il fluido ad una densità di circa 1215 kg/m^3 (López-Tarazón et al., 2009), valore più vicino a quello di un flusso iperconcentrato.

Considerando il solo territorio italiano, alcuni dati sul trasporto solido dei fiumi provengono da Syvitski e Kettner (2007), secondo i quali i più alti carichi di sedimento nel Mare Adriatico provengono dai fiumi appenninici, definiti come piccoli e aspri (*rugged*), in grado di generare concentrazioni di sedimento abbastanza alte da dare origine a correnti di torbida in condizioni di flusso regolare, una volta giunti in ambiente marino. In questo caso sono state misurate concentrazioni di sedimento in sospensione maggiori di 57 kg/m^3 , per cui si parla di una densità di flusso di almeno 1035 kg/m^3 in condizioni di portata normale (Syvitski & Kettner, 2007).

Per quanto riguarda la densità da flusso concentrato (1365 kg/m^2), un riscontro è dato da Wang e Ta (2016), che hanno misurato la concentrazione del sedimento in sospensione in un corso d'acqua in ambiente desertico nel bacino del Fiume Giallo durante una piena; il picco massimo riportato è di $1100\text{-}1400 \text{ gl}^{-1}$, ovvero una densità di flusso dai 1500 kg/m^3 a oltre 1600 kg/m^3 , ben più alto del valore di Rickenmann (1991) considerato (Wang & Ta, 2016). Sulla possibilità che durante l'evento del 15 settembre si sia sviluppato un flusso iperconcentrato, in uno studio

di Quick et al. (2023) sulle piane alluvionali del fiume Gange ai piedi della catena Himalayana (India settentrionale-Nepal), in cui si hanno alvei ghiaiosi con transizione a sabbiosi 10-40 km oltre il fronte montuoso, si parla di trasporti eccezionali di ghiaie in eventi di flusso di questo tipo. Qui viene definita una concentrazione di sedimento in sospensione di 8% come limite inferiore per un flusso iperconcentrato (densità di flusso di circa 1120 kg/m^3), e viene riportato un trasporto di ghiaie eccezionale lungo le pianure del Gange che si spinge longitudinalmente ben più a valle della transizione ghiaie-sabbia, dovuto a piene causate da eventi monsonici estremi con tempi di ritorno tra i 200 e i 1000 anni (Quick et al., 2023).

Un aumento delle densità del fluido comporta, come evidenziato dalle Figure 16 e 17, un aumento del numero di siti in cui si verifica trasporto in sospensione. Per le caratteristiche del bacino del Fiume Misa, quali la presenza in affioramento di litotipi pelitici e pelitico-arenacei facilmente erodibili (Bagnarelli et al., 2016), e l'uso del suolo fortemente agricolo propenso a fornire materiale fine mediante processi di dilavamento, è molto probabile che il Misa avesse concentrazioni di sedimento in sospensione elevate, e di conseguenza una densità di flusso elevata. Alla luce di questo, e di quanto discusso nei paragrafi precedenti, è probabile che la densità del fluido durante l'evento fosse a cavallo tra 1078 kg/m^3 e 1365 kg/m^3 . Ciò trova un riscontro anche nella importante frazione siltosa-argillosa riscontrata sia nelle barre che nei depositi sulle superfici terrazzate. Anche le immagini satellitari della foce durante la piena lo dimostrano, in quanto si osserva un enorme *sediment plume* in mare visibile in Figura 18 (*Planet*, risoluzione 3 m/pixel, acquisizione 16/09/2022).



Figura 18,A. Il sediment plume

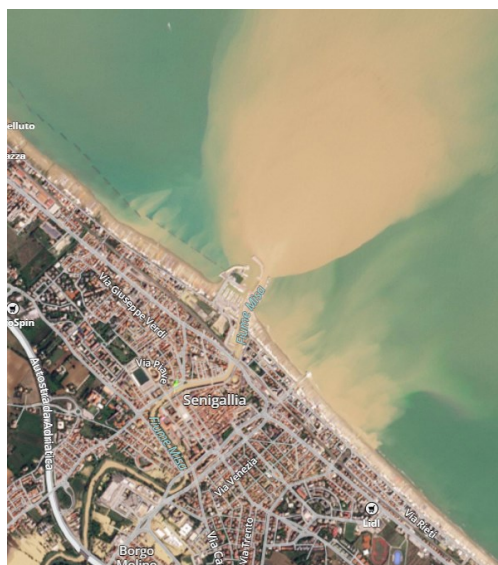


Figura 18,B. Figura A ravvicinata

Alla luce di quanto discusso, è verosimile che durante l'evento del 15-16 settembre 2022 sia avvenuto, almeno in certi tratti del Fiume Misa, trasporto di ghiaie in sospensione. Dai risultati si può evincere che, con il crescere dell'onda di piena durante l'evento, sia aumentata l'energia del flusso a tal punto da portare in sospensione il materiale ghiaioso che generalmente si muove come trasporto al fondo (Figure 16 A,B,C). Tale materiale, una volta superata la soglia del *bankfull flow* e raggiunta l'altezza massima dopo l'esondazione, non potendo essere mantenuto in sospensione al di sopra dei terrazzi (H_w3), probabilmente ha cominciato a muoversi su queste superfici come *bed load*, a causa di minori valori dello *Shields stress* (τ^*) causati a loro volta dalla diminuzione della profondità di flusso (Figure 18 A,B,C). Tale decremento ne avrebbe causato in seguito la deposizione, dando origine ai depositi a ventaglio e a lobi osservati in campo (Figura 19). Queste morfologie ricordano quelle delle barre fluviali, conformemente a quanto riportato nel grafico di Parker (Garcia, 2008) all'interno del campo "*Gravel-bed rivers*", in cui le morfologie di fondo sono quelle tipiche di fiumi con alveo ghiaioso. Un decremento del valore di *Shields stress* (τ^*) a profondità di flusso minori sarebbe compatibile anche con la minore granulometria osservata sui depositi al di sopra dei terrazzi rispetto a quella delle corrispondenti barre in alveo, messa in evidenza nelle Figure 13 e 14. È ragionevole

ipotizzare che il movimento come bed load del materiale ghiaioso su tali superfici terrazzate abbia avuto una durata molto breve (pochi minuti), solo in concomitanza con il picco di piena e prima che le acque di esondazione si espandessero arealmente sulla pianura circostante.

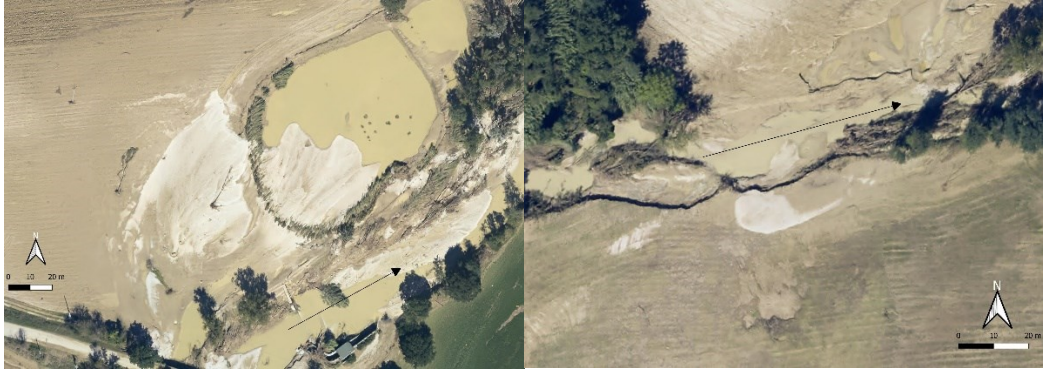


Figura 19. Deposito a ventaglio (sinistra) e a lobo (destra)

Fra le limitazioni che affliggono queste interpretazioni, si segnala l'incertezza associata ai calcoli idraulici eseguiti. Tale incertezza non è stata valutata quantitativamente, ma è ragionevole ipotizzare che possa essere piuttosto elevata soprattutto per quanto concerne le elaborazioni dedicate ai flussi di esondazione (Figure 18 A,B,C). In condizioni di *overbank flow*, con acqua che scorre non canalizzata al di sopra delle superfici terrazzate, le direzioni di flusso, le pendenze locali potenzialmente diverse da quelle dell'alveo e l'impatto della rugosità del suolo possono aver influito sui risultati ottenuti. Sviluppi futuri delle analisi, ad esempio mediante utilizzo di modellazione numerica, dovranno prevedere una valutazione approfondita di tali elementi.

5.2 Ruolo del contesto geologico-geomorfologico e implicazioni

Come è visibile in Tabella 2, la maggior parte delle sponde nei siti di ritrovamento dei depositi ghiaiosi collocati sulle superfici terrazzate sono coesive o composite. In presenza di sponde non coesive, ad esempio costituite da ghiaie sciolte, la risposta dei fiumi a delle piene intense è la presa in carico, all'interno del flusso, dei sedimenti che costituiscono le sponde, con un conseguente arretramento delle

stesse e allargamento dell'alveo (Pitlick et al., 2013) (Figura 20 A). Nel caso del Fiume Misa, le sponde pelitiche coesive che caratterizzano grande parte degli stop non hanno permesso al corso d'acqua di allargarsi per erosione laterale, dissipando energia e accomodando l'elevato deflusso idrico; l'erosione è stata contenuta, per cui non è stato permesso un allargamento della sezione trasversale tale da portare un equilibrio fra sforzo di taglio, larghezza della sezione e flusso idrico. Una situazione di questo tipo può aver causato un aumento dell'energia all'interno del flusso, favorendo l'esondazione del fiume sui terrazzi e la mobilitazione anomala in sospensione delle ghiaie (Figura 20 B).

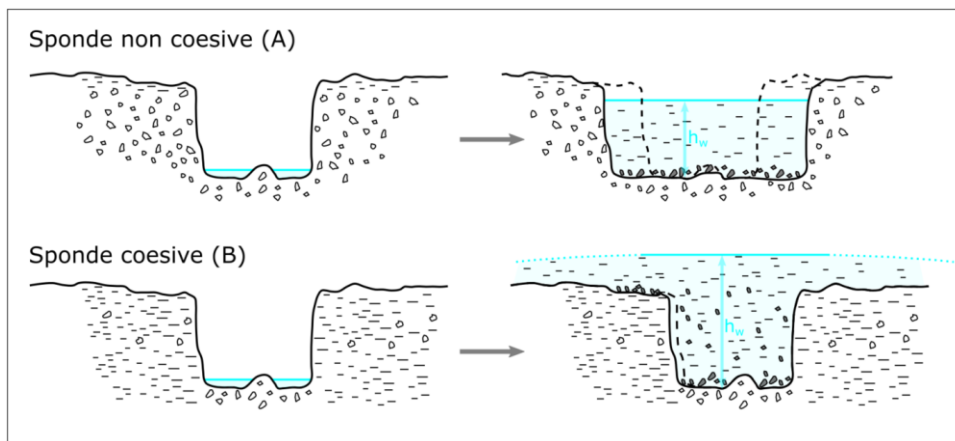


Figura 20. Risposta di un corso d'acqua con sponde non coesive (A: allargamenti significativi dell'alveo) o con sponde coesive (B: minimi allargamenti dell'alveo e esondazione) al medesimo evento di piena. I clasti rappresentati in nero rappresentano particelle in movimento. Nel caso (B), rappresentativo della situazione del Fiume Misa, i clasti grossolani si muovono anche in sospensione e raggiungono il terrazzo.

In fiumi con caratteristiche come quelle del Misa, è quindi possibile il verificarsi di questo processo geomorfologico anomalo che porta alla riattivazione dei terrazzi fluviali senza erosione laterale, o con una erosione laterale molto contenuta se paragonata al flusso idrico. Se da un lato tale processo può rappresentare un problema di natura economica per le attività agricole in prossimità dei fiumi, dal momento che, come osservato durante l'attività di campagna, i campi coltivati vengono invasi da una deposizione di ghiaie che può compromettere la produttività e la qualità del terreno agricolo, dall'altro è importante tenerne conto in ottica di pericolosità geomorfologica. Infatti, la precedentemente menzionata

scarsa erosione delle sponde causa un incremento dell'energia e della velocità di flusso, che si traduce in esondazioni più estese dal punto di vista spaziale e particolarmente impetuose. Fiumi come il Misa, in eventi di piena come quello del 15-16 settembre 2022, sono in grado di generare alte concentrazioni di sedimento che viene trasportato in sospensione a grande velocità. Come già dimostrato nella Sezione 4.4, in un flusso con le caratteristiche precedentemente menzionate non è trasportato solo il materiale fine, ma vengono mobilitate in sospensione anche le ghiaie, che rappresentano un importante fattore di pericolosità alla luce della velocità che possono raggiungere e della distanza alla quale si possono depositare all'esterno dell'alveo. Una valutazione complessiva di tali processi e dinamiche fluviali risulta quindi fondamentale nell'ottica di una migliore gestione del territorio che tenga conto della pericolosità geomorfologica per minimizzare il rischio.

6 Bibliografia

Amici, M., & Romina, S. (2002). *Campo medio della precipitazione annuale e stagionale sulle Marche per il periodo 1950-2000*. Osservatorio Geofisico Sperimentale Macerata.

Bagnarelli, A., Cristina, B. M., Giuliano, B., Andrea, G., Patrizio, L., Leti, S., Giuliana, P., Sordoni Gloria Anna, & Francesco, V. (2016). *Assetto di progetto Media e bassa valle del Fiume Misa* [dataset]. Autorità di Bacino Regionale Regione Marche.

Baker, V. R. (1994). Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology*, 10(1–4), 139–156. Scopus. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)90013-2)

Belletti, B., Dufour, S., & Piégay, H. (2014). Regional assessment of the multi-decadal changes in braided riverscapes following large floods (Example of 12 reaches in South East of France). *Advances in Geosciences*, 37, 57–71. <https://doi.org/10.5194/adgeo-37-57-2014>

Boccanera, F., Giordano, V., Iocca, F., Lazzeri, M., Sofia, S., Sini, F., Speranza, G., & Tedeschini, M. (2022). *Maltempo 15, 16 e 17 settembre 2022* (p. 59) [Rapporto di Evento preliminare]. Direzione Protezione Civile e Sicurezza del Territorio Regione Marche.

Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Ghinassi, M., Zaramella, M., & Surian, N. (2021). Sediment–water flows in mountain catchments: Insights into transport mechanisms as responses to high-magnitude hydrological events. In

Journal of Hydrology (Vol. 602).

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126716>

Brenna, A., Marchi, L., Borga, M., Zaramella, M., & Surian, N. (2023). What drives major channel widening in mountain rivers during floods? The role of debris floods during a high-magnitude event. *Geomorphology*, 430.

Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108650>

Brenna, A., Surian, N., Ghinassi, M., & Marchi, L. (2020). Sediment–water flows in mountain streams: Recognition and classification based on field evidence. In *Geomorphology* (Vol. 371).

<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107413>

Bunte, K., & Abt, S. R. (2001). SAMPLING FRAME FOR IMPROVING PEBBLE COUNT ACCURACY IN COARSE GRAVEL-BED STREAMS 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(4), 1001–1014.

Church, M. (2006). BED MATERIAL TRANSPORT AND THE MORPHOLOGY OF ALLUVIAL RIVER CHANNELS. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 325–354.

<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122721>

Church, M., & Jakob, M. (2020). What Is a Debris Flood? *Water Resources Research*, 56(8), e2020WR027144.

<https://doi.org/10.1029/2020WR027144>

Consiglio Nazionale delle Ricerche & Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica. (s.d.). *Alluvione nelle Marche 15 settembre 2022*.









- polaris.irpi. Recuperato 20 ottobre 2023, da
<https://polaris.irpi.cnr.it/event/alluvione-nelle-marche/>
- Garcia, M. (A. c. Di). (2008). *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice* (110^a ed.). American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784408148>
- López-Tarazón, J. A., Batalla, R. J., Vericat, D., & Francke, T. (2009). Suspended sediment transport in a highly erodible catchment: The River Isábena (Southern Pyrenees). *Geomorphology*, *109*(3–4), 210–221.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.003>
- Mao, L., & Surian, N. (2010). Observations on sediment mobility in a large gravel-bed river. *Geomorphology*, *114*(3), 326–337. Scopus.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.015>
- Pitlick, J., Marr, J., & Pizzuto, J. (2013). Width adjustment in experimental gravel-bed channels in response to overbank flows. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, *118*(2), 553–570. Scopus.
<https://doi.org/10.1002/jgrf.20059>
- Planet. (2023). [Mappa]. <https://www.planet.com/>
- Quick, L., Creed, Maggie. J., Sinclair, Hugh. D., Attal, M., Borthwick, Alistair. G. L., & Sinha, R. (2023). Hyperconcentrated floods cause extreme gravel transport through the sandy rivers of the Gangetic Plains. *Communications Earth & Environment*, *4*(1), 297.
<https://doi.org/10.1038/s43247-023-00953-9>

- Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(11), 1419–1439. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1991\)117:11\(1419\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1991)117:11(1419))
- Rinaldi, M., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Comiti, F., Lucía, A., Marchi, L., Nardi, L., Righini, M., & Surian, N. (2016). An integrated approach for investigating geomorphic response to extreme events: Methodological framework and application to the October 2011 flood in the Magra River catchment, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(6), 835–846. Scopus. <https://doi.org/10.1002/esp.3902>
- Surian, N., Righini, M., Lucía, A., Nardi, L., Amponsah, W., Benvenuti, M., Borga, M., Cavalli, M., Comiti, F., Marchi, L., Rinaldi, M., & Viero, A. (2016). Channel response to extreme floods: Insights on controlling factors from six mountain rivers in northern Apennines, Italy. *Geomorphology*, 272, 78–91. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.002>
- Syvitski, J. P. M., & Kettner, A. J. (2007). On the flux of water and sediment into the Northern Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, 27(3–4), 296–308. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2005.08.029>
- Wang, Z., & Ta, W. (2016). Hyper-concentrated flow response to aeolian and fluvial interactions from a desert watershed upstream of the Yellow River. *CATENA*, 147, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.033>
- Wolman, M. G. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951–956.

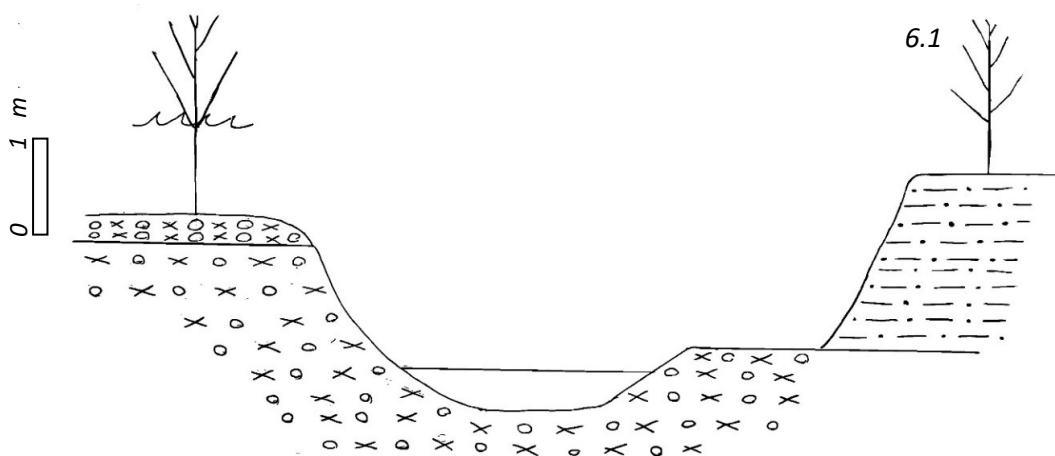
6 Appendice

Di seguito sono riportate le schede dei corpi deposizionali, nell'ordine di distanza dal punto iniziale.

Simboli

	Argille azzurre, substrato
	Siltite, sponda fine
	Sabbie sciolte
	Arenite, sabbie consolidate
	Conglomerato fango sostenuto
	Conglomerato, sponda grossolana
	Ghiaie sciolte
	Trashline

Stop 6



Distanza dal punto iniziale	1323 m
Larghezza alveo post-evento	5 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro
H _{w2}	2,8 m

H _{w3}	1,05 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	3,4%
Sponde e processi	Entrambe le sponde a bassa pendenza, sponda destra coesiva

6. Corpo deposizionale

AREA	18 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	15 cm	
H _{w1}	1,6 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	2,5 mm
	D50	6,4 mm
	D84	22 mm

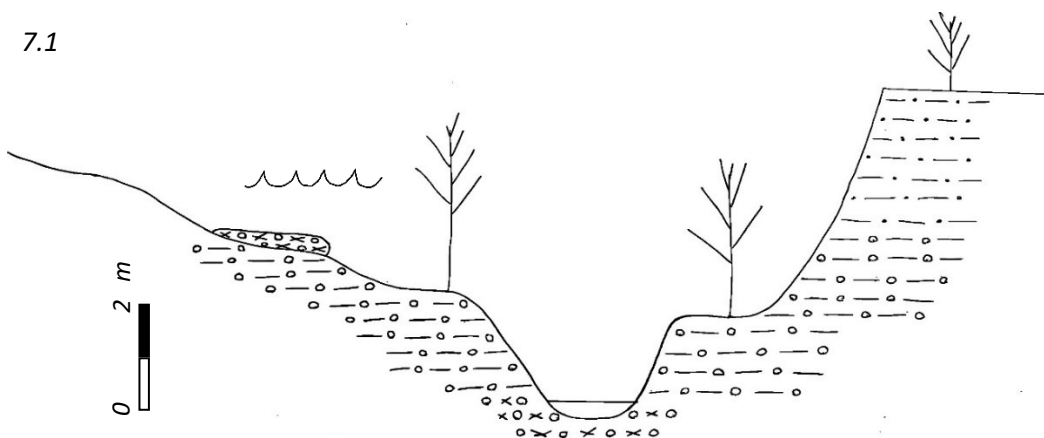
6.1 Sezione stratigrafica

6.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso



Stop 7

7.1



Distanza dal punto iniziale	4633 m
Larghezza alveo post-evento	8 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro
H _{w2}	5,5 m
H _{w3}	1,5 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	1,125%
Sponde e processi	La sponda sinistra è a bassa pendenza, la sponda destra subverticale con erosione al piede; entrambe sono coesive.

7. Corpo deposizionale

AREA	438 m	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	25 cm	
H _{w1}	3,75 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	3,6 mm
	D50	7,7 mm
	D84	21,8 mm

7.1 Sezione stratigrafica

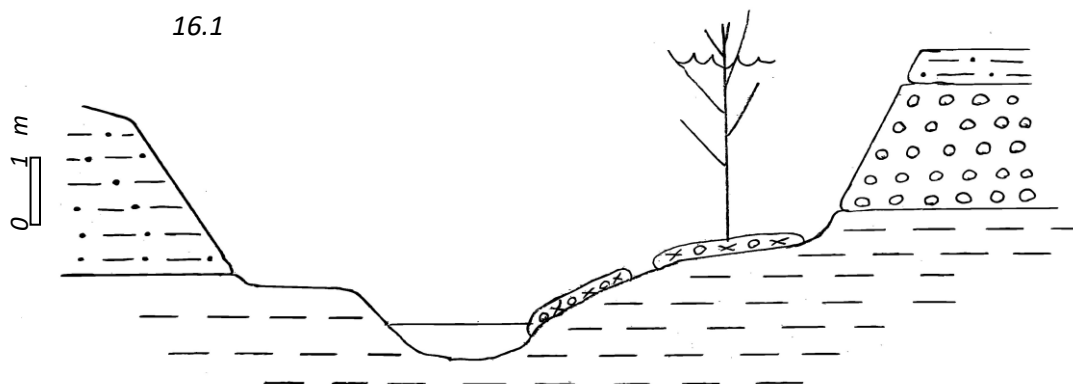
7.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

7.3 Deposito

7.4 Sponda destra in primo piano e sinistra



Stop 16



Distanza dal punto iniziale	5200 m
Larghezza alveo post-evento	9 m
Posizione deposito	Primo terrazzo destro
H _{w2}	5 m
H _{w3}	3,05 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	2,787%
Sponde e processi	La sponda destra è subverticale, la sponda sinistra subverticale e coesiva; su quest'ultima vi è evidenza di erosione.

16. Corpo deposizionale

AREA	135 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	25 cm	
H _{w1}	1,7 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,7 mm
	D50	19,5 mm
	D84	50,7 mm

16.1 Sezione stratigrafica

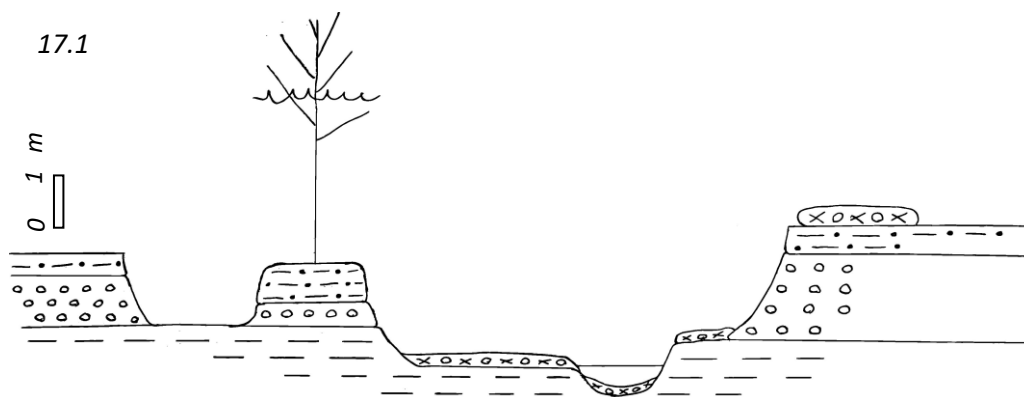
16.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

16.3 Il deposito sul terrazzo destro (a sinistra)

16.4 Particolare del deposito



Stop 17



Distanza dal punto iniziale	9353 m
Larghezza alveo post-evento	11 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	6 m
H _{w3}	2 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,357%
Sponde e processi	Sia sponda destra che sinistra sono subverticali e composite; vi è una grande area di incisione sul terrazzo sinistro, fino ad uno spessore di 1,3 m, ed erosione sulla sponda destra.

17. Corpo deposizionale

AREA	202 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	50 cm	
H _{w1}	3,5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,7 mm
	D50	9,3 mm
	D84	22,2 mm

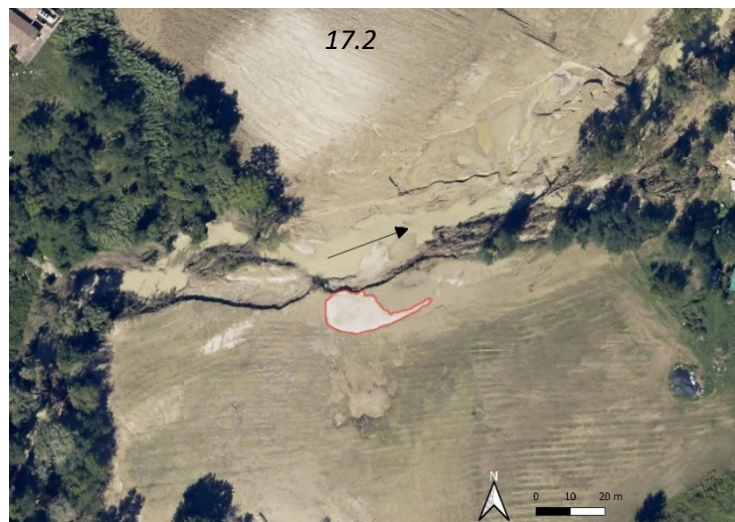
17.1 Sezione stratigrafica

17.2 Ortofoto protezione civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

17.3, 17.4 incisione sul terrazzo sinistro

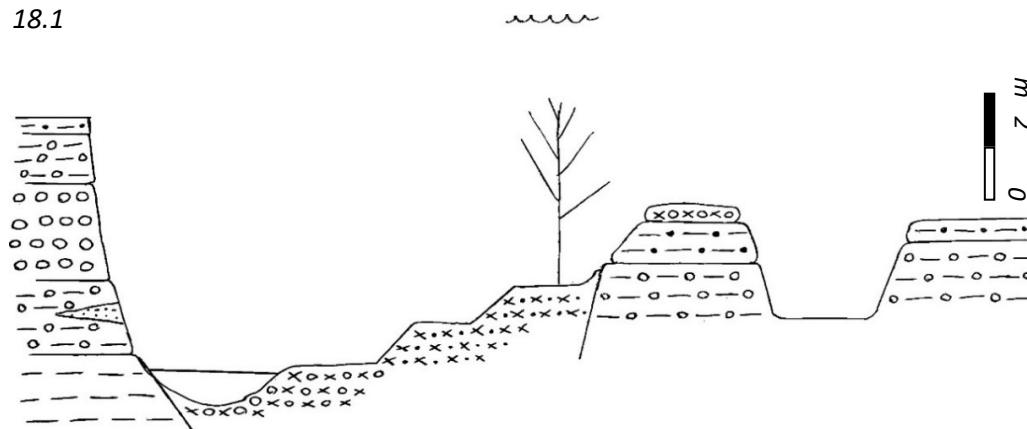
17.5 Deposito

17.6 Sponde destra e sinistra, con erosione visibile sulla destra



Stop 18

18.1



Distanza dal punto iniziale	12008 m
Larghezza alveo post-evento	10 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	8 m
H _{w3}	3,9 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,202%
Sponde e processi	La sponda destra è a bassa pendenza, coesiva, la sponda sinistra subverticale e coesiva; vi sono segni di erosione sulla sponda sinistra e incisione sul terrazzo destro fino a 2 m di altezza.

18. Corpo deposizionale

AREA	1650 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	30 cm	
H _{w1}	3,8 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	5 mm
	D50	10 mm
	D84	19,8 mm

18.1 Sezione stratigrafica

18.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

18.3, 18.4 Immagini del corpo deposizionale

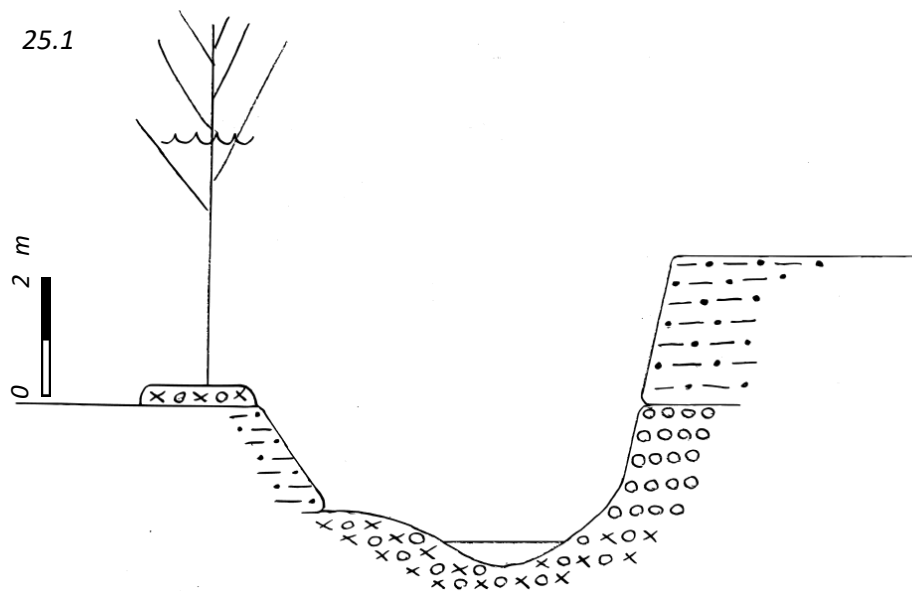
18.5 L'alveo con sponda sinistra e barra

18.6 L'incisione sul terrazzo destro





Stop 25



Distanza dal punto iniziale	14081 m
Larghezza alveo post-evento	12 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro
H _{w2}	6,8 m
H _{w3}	4 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,235%
Sponde e processi	La sponda destra è verticale e composta, la sponda sinistra a bassa pendenza e coesiva; vi è probabile erosione spondale.

25. Corpo deposizionale

AREA	303 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	30 cm	
H _{w1}	2,5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	3,3 mm
	D50	8,4 mm
	D84	15 mm

25.1 Sezione stratigrafica

25.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

25.3 Il deposito e il suo spessore (25.4)

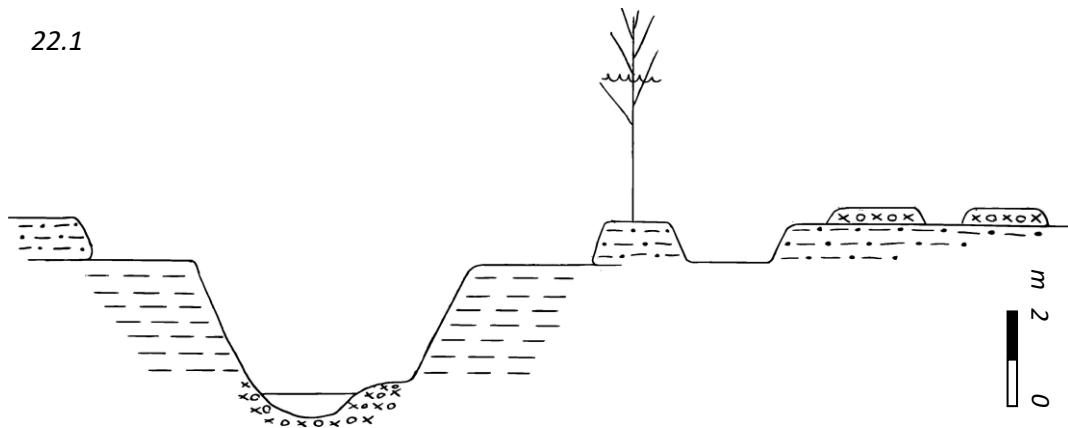
25.5 Sponda destra e barra

25.6 Sponda destra





Stop 22



Distanza dal punto iniziale	15205 m
Larghezza alveo post-evento	12 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	7,8 m
H _{w3}	3 m

Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,602%
Sponde e processi	La sponda destra è verticale e coesiva, la sinistra subverticale e coesiva, con segni di erosione su sponda e terrazzo destri.

22. Corpo deposizionale

AREA	3009 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	35 cm	
H _{w1}	4,5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,6 mm
	D50	8,8 mm
	D84	22,3 m

22.1 Sezione stratigrafica

22.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

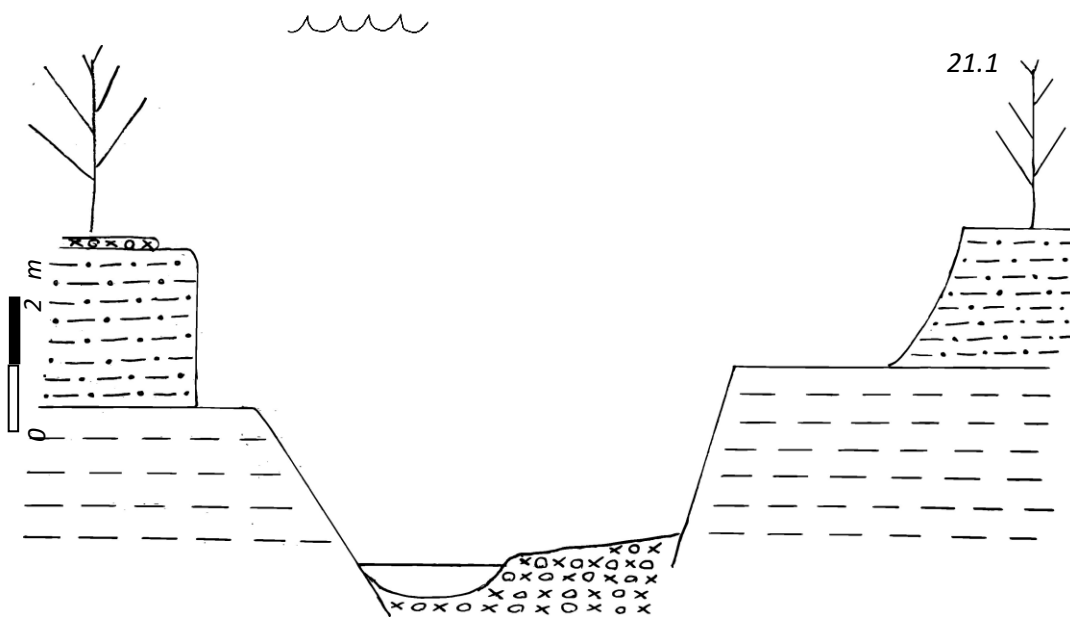
22.3 Depositi

22.4 L'incisione sul terrazzo destro





Stop 21



Distanza dal punto iniziale	15729 m
Larghezza alveo post-evento	15 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro
H _{w2}	8,6 m
H _{w3}	3,3 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,075%
Sponde e processi	Sponda destra è verticale e coesiva, la sponda sinistra subverticale e coesiva; vi è erosione differenziale sulla sponda destra.

21. Corpo deposizionale

AREA	870 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	30 cm	
H _{w1}	5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,5 mm
	D50	7,8 mm
	D84	14,8 mm

21.1 Sezione stratigrafica

21.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

21.3 Alveo e terrazzi

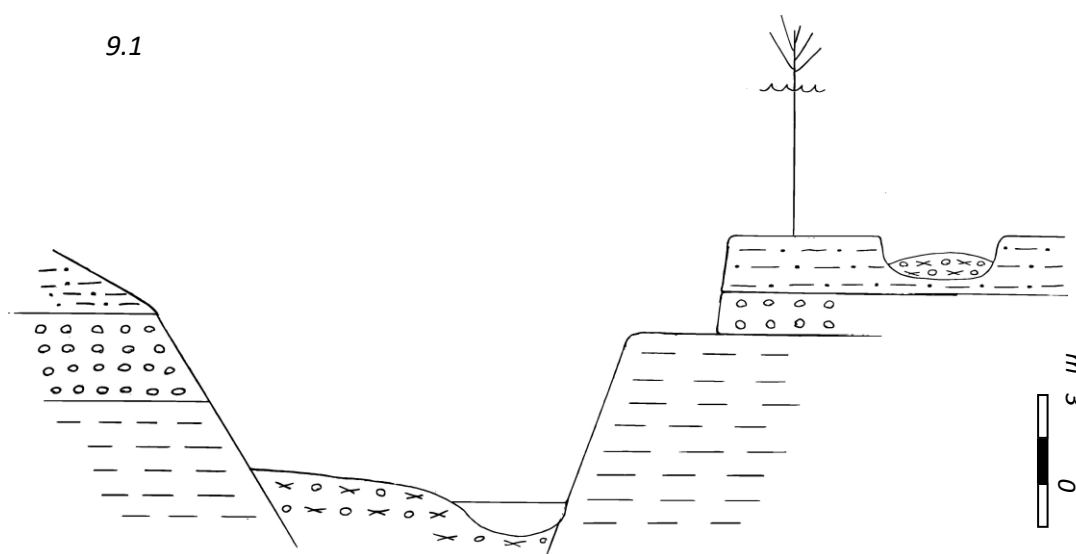
21.4 L'erosione differenziale sulla sponda destra





Stop 9

9.1



Distanza dal punto iniziale	16253 m
Larghezza alveo post-evento	10 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	9,8 m
H _{w3}	3,2 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	1,172%
Sponde e processi	La sponda destra è verticale e coesiva, la sinistra subverticale e coesiva; è avvenuta erosione sulla sponda e incisione sul terrazzo destri.

9. Corpo deposizionale

AREA	305 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	25-30 cm	
H _{w1}	6,3 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	2,7 mm
	D50	6,9 mm
	D84	18,5 mm

9.1 Sezione stratigrafica

9.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

9.3 L'incisione sul terrazzo destro e il deposito in secondo piano

9.4 La trashline sul terrazzo destro

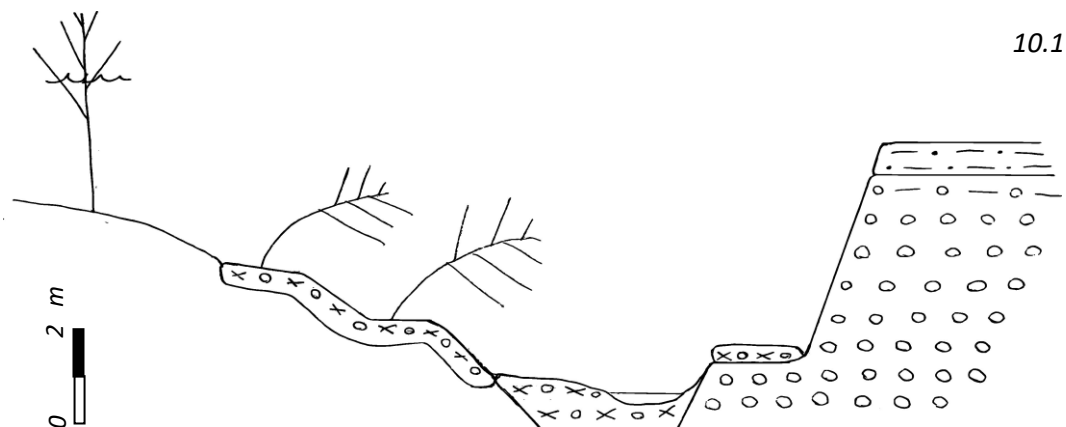
9.5 Erosione differenziale sulla sponda destra

9.6 L'area in esame vista da monte





Stop 10



10.1

Distanza dal punto iniziale	16524 m
Larghezza alveo post-evento	20-25 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro

H _{w2}	7,5 m
H _{w3}	x
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,71%
Sponde e processi	Sponda destra subverticale, non coesiva, con allargamento dell'alveo per erosione.

10. Corpo deposizionale

AREA	4895 m ² (10A)	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	20 cm (10A)	
H _{w1}	x	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	2,9 mm
	D50	6,9 mm
	D84	16,9 mm

10.1 Sezione stratigrafica del punto 10B

10.2 Ortofoto Protezione Civile di con i punti 10A, dove è stata fatta analisi granulometrica, e 10B, dove è stata fatta la sezione stratigrafica e l'analisi granulometrica della barra (e non del deposito) ; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

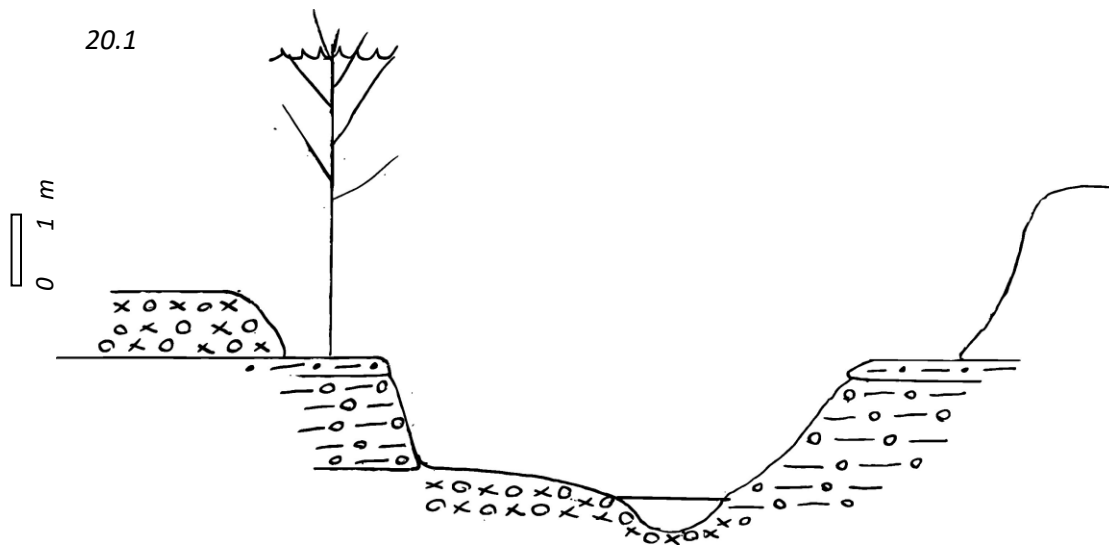
10.3 Il tratto di alveo da 10A a 10B

10.4 I depositi 10A, rimaneggiati in seguito all'evento

10.5, 10.6 Il deposito 10B



Stop 20



Distanza dal punto iniziale	19006 m
Larghezza alveo post-evento	13 m
Posizione deposito	Terrazzo sinistro
H _{w2}	7 m
H _{w3}	3,5 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,642%
Sponde e processi	Entrambe le sponde sono subverticali e composite.

20. Corpo deposizionale

AREA	1499 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	100 cm	
H _{w1}	2,5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,1 mm
	D50	6,8 mm
	D84	15,2 mm

20.1 Sezione stratigrafica

20.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

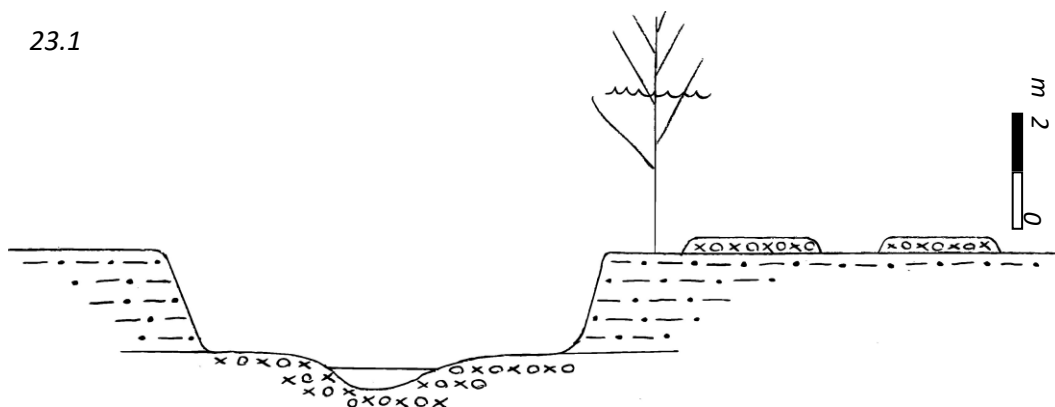
20.3 L'alveo e il deposito a sinistra

20.4 Il deposito



Stop 23

23.1



Distanza dal punto iniziale	20594 m
Larghezza alveo post-evento	16 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	6,5 m
H _{w3}	2,7 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,77%
Sponde e processi	Entrambe le sponde subverticali e coesive.

23. Corpo deposizionale

AREA	6720 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	30 cm	
H _{w1}	3,5 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	3,8 mm
	D50	7,5 mm
	D84	18,1 mm

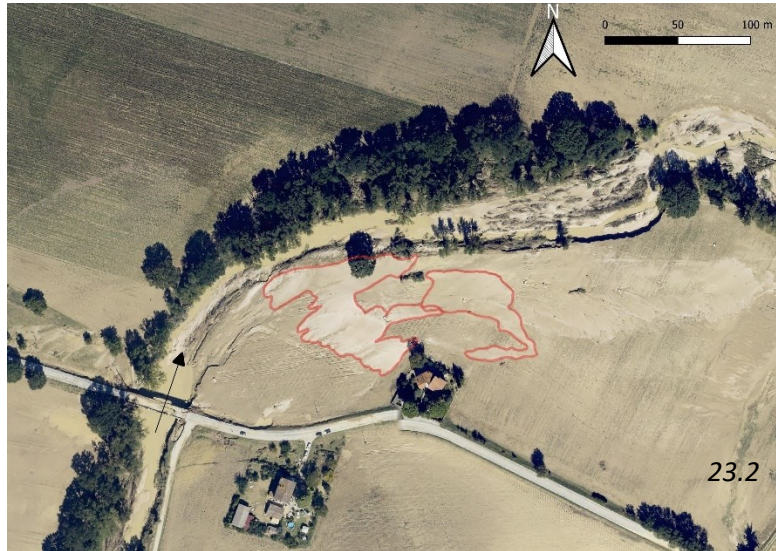
23.1 Sezione stratigrafica

23.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

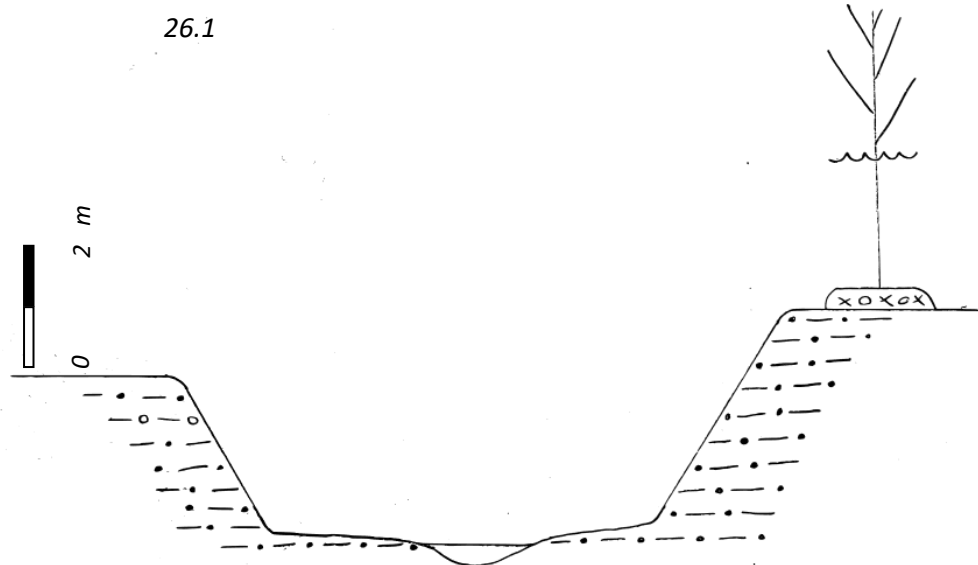
23.3, 23.4 I depositi

23.5 La sponda destra composta poco più a valle, con i depositi visibili sul terrazzo

23.6 La barra su cui è stata fatta l'analisi granulometrica



Stop 26



Distanza dal punto iniziale	25321 m
Larghezza alveo post-evento	20 m
Posizione deposito	Terrazzo destro
H _{w2}	6,4 m
H _{w3}	2 m
Pendenza locale dell'alveo (400 m)	0,5%
Sponde e processi	Entrambe le sponde subverticali, coesive.

26. Corpo deposizionale

AREA	49 m ²	
SPESSORE MASSIMO OSSERVATO	35 cm	
H _{w1}	4 m	
PARAMETRI GRANULOMETRICI	D16	4,7 mm
	D50	8,1 mm
	D84	14,3 mm

26.1 Sezione stratigrafica

26.2 Ortofoto Protezione Civile Regione Marche; la direzione del flusso è indicata dalla freccia nera, il deposito è evidenziato in rosso

26.3 Il deposito

26.4 Sponde destra (primo piano) e sinistra

