

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

**ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA**

Attività “ C “

Relazione Intermedia

Modellazione idraulica a fondo mobile

Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano

Gruppo di Lavoro:

Lorenzo Minatti (Referente CERAFRI), Enio Paris (referente UNIFI),

Luca Solari, Pina De Cicco, Laura Boschi (UNIFI),

Beatrice Mengoni, Sofia Morandi (RT)

Firenze, agosto 2013

INDICE

1. IL QUADRO CONOSCITIVO	9
1.1 LE SEZIONI FLUVIALI.....	13
1.2 I RILIEVI SEDIMENTOLOGICI.....	14
1.3 I DATI IDROMETRICI.....	16
1.4 LE SCALE DI DEFLUSSO.....	17
1.5 I DATI DI PORTATA.....	20
1.6 DATI INTEGRATIVI.....	20
1.6.1 Rilievi sedimentologici integrativi.....	22
2. ELABORAZIONE DEI DATI.....	23
2.1 LE CURVE DI DURATA.....	23
2.2 I DATI SUL TRASPORTO SOLIDO.....	34
2.3 IL CONFRONTO TRA IL RILIEVO 1970 E IL RILIEVO 2000.....	44
3. DINAMICA FLUVIALE: GLI STRUMENTI DI INDAGINE	50
3.1 IL BILANCIO SEDIMENTOLOGICO.....	52
3.1.1 Aspetti concettuali.....	52
3.1.2 Individuazione dei tratti significativi.....	54
3.1.3 Caratterizzazione sedimentologica di ciascun tratto.....	56
3.1.4 Le curve di durata delle portate liquide per ciascun tratto.....	57
3.1.5 Le caratteristiche idrauliche.....	69
3.1.6 Il criterio di stima della capacità di trasporto solido.....	73
3.1.7 Implementazione del modello di bilancio sedimentologico.....	74
4. MODELLAZIONE MORFODINAMICA	92
4.1 CONCETTI GENERALI.....	92
4.2 MODELLAZIONE DI CANALI COMPOSITI.....	95
4.3 MODELLO DI EROSIONE/DEPOSITO.....	97

4.4	SCHEMA NUMERICO	100
4.5	IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO	107
4.5.1	Geometria	108
4.5.2	Calibrazione del modello	109
4.6	SIMULAZIONE MORFODINAMICA A SCALA DI EVENTO	123
4.6.1	Granulometrie e trasporto solido.	124
4.6.2	Le simulazioni effettuate.	125
4.7	ANALISI DEI RISULTATI.....	128
	BIBLIOGRAFIA	140
	APPENDICE A – SCHEMA NUMERICO	145
	APPENDICE B - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI A FONDO MOBILE	148

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

**ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA**

Attività " C "

Relazione Intermedia

Modellazione idraulica a fondo mobile

Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano

IL QUADRO CONOSCITIVO

Gruppo di Lavoro:

Lorenzo Minatti (Referente CERAFRI), Enio Paris (referente UNIFI),

Luca Solari, Pina De Cicco, Laura Boschi (UNIFI),

Beatrice Mengoni, Sofia Morandi (RT)

Firenze, agosto 2013

PREMESSA

Nell'ambito dell'Accordo stipulato in data 19 dicembre 2012 tra la Regione Toscana e il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze, il Programma delle Attività prevede lo svolgimento di attività connesse alla modellazione idraulica a fondo mobile (attività C) che in particolare comprendono:

- L' Individuazione di corsi d'acqua caratterizzati da rischio da dinamica d'alveo (attività C1);
- Lo studio della dinamica fluviale, del trasporto solido e la modellazione idraulica a fondo mobile in moto vario per il fiume Ombrone Grossetano (caso pilota, attività C2);
- Lo studio della dinamica fluviale e del trasporto solido e modellazione idraulica a fondo mobile in moto vario: applicazione ad ulteriori corsi d'acqua (attività C3);
- l'individuazione degli interventi per la mitigazione del rischio da dinamica d'alveo (attività C4).

Per quanto riguarda l'individuazione dei corsi d'acqua caratterizzati da rischio da dinamica d'alveo (attività C1), tale attività è stata svolta di concerto con l'Ufficio Difesa del Suolo della Regione Toscana. Sulla base delle esigenze manifestatesi sia in occasione dei recenti eventi alluvionali, sia in situazioni di tendenze evolutive più remote e che attualmente si rivelano di una certa importanza in relazione al rischio idraulico e/o al rischio da dinamica d'alveo anche in relazione a interventi nel frattempo realizzati e/o progettati, i corsi d'acqua di interesse risultano:

- Fiume Albegna, da Ponte della Marsialiana alla foce, lunghezza tratto circa 18 km, con applicazione congiunta del bilancio sedimentologico e del modello di moto vario a fondo mobile;

- Fiume Orcia, per un tratto di circa 10 km a monte della confluenza con il F. Ombrone Grossetano, con applicazione del solo bilancio sedimentologico;
- Fiume Bisenzio, da Mercatale fino alla confluenza nel F. Arno, lunghezza tratto circa 38 km, con applicazione del solo bilancio sedimentologico;
- F. Ombrone Pistoiese, da Pistoia fino alla confluenza nel Fiume Arno, lunghezza tratto 20 km, con applicazione del solo bilancio sedimentologico;
- Fiume Frigido, da Canevara alla confluenza, lunghezza tratto 14 km, solo bilancio sedimentologico.

La presente relazione descrive le metodologie e i criteri seguiti per lo svolgimento delle attività "C2 – Modellazione idraulica a fondo mobile applicata al Fiume Ombrone Grossetano".

Il Fiume Ombrone è stato già oggetto di diversi studi, ma tra questi solo lo studio commissionato dalla Regione Toscana – Ufficio del Genio Civile di Grosseto del 2002, ha affrontato il problema del trasporto solido. Ad oggi appare importante procedere ad un nuovo studio per i seguenti motivi:

- Lo studio 2002 ha avuto come principali obiettivi l'aggiornamento delle sezioni fluviali, la caratterizzazione sedimentologica del fiume Ombrone e dei suoi principali affluenti, e lo svolgimento di una campagna di misure del trasporto solido al fondo e in sospensione nel periodo 1994-2000;
- Nonostante la disponibilità di preziosi dati sul trasporto solido, questi non sono stati ancora utilizzati;
- Nel periodo 2000-2012 l'Ombrone è andato soggetto ad una serie di eventi di piena rilevanti che possono aver influenzato anche significativamente l'assetto plano-altimetrico del corso d'acqua.

Per quanto sopra, il corso vallivo del Fiume Ombrone è oggetto del presente studio con i seguenti obiettivi:

- 1) Valutazione del regime del trasporto solido nel Fiume Ombrone e nei suoi principali affluenti;
- 2) Individuazione delle attuali tendenze evolutive altimetriche;
- 3) Individuazione degli interventi di mitigazione del rischio idraulico e da dinamica d'alveo.

Lo studio comprende il tratto di valle del Fiume Ombrone da Sasso d'Ombrone fino alla foce per una lunghezza complessiva di circa 60 km. Di seguito si riportano le principali fasi in cui si articola lo studio:

FASE 1 – Quadro conoscitivo: individuazione, acquisizione e analisi di dati, documenti e studi relativi alla dinamica fluviale del Fiume Ombrone Grossetano.

FASE 2 – Caratterizzazione geometrica, idrologica e sedimentologica del corso d'acqua mediante l'elaborazione dei dati disponibili e di nuovi dati.

FASE 3 – Costruzione del quadro di riferimento per il bilancio sedimentologico: definizione dell'ambito spazio-temporale, individuazione dei tratti significativi, costruzione delle curve di durata, calcolo dei parametri idraulici, individuazione del criterio di stima della capacità di trasporto solido.

FASE 4 – Bilancio sedimentologico: analisi delle variazioni del trasporto solido medio annuo lungo i tratti significativi e individuazione delle tendenze evolutive.

FASE 5 – Modello matematico di moto vario a fondo mobile: costruzione di un modello numerico basato sulla discretizzazione delle equazioni di base per la fase liquida e la fase solida mediante il metodo dei volumi finiti.

FASE 6 – Implementazione e calibrazione del modello con riferimento alla geometria recente del corso d'acqua e ai dati idrologici e idrometrici relativi agli eventi di piena del 2004.

FASE 7 – Analisi morfodinamica a scala di evento condotta sulla base dei risultati del modello e finalizzata alla individuazione delle tendenze evolutive.

FASE 8 - Confronti tra i risultati ottenuti nella fase 4 e nella fase 7.

FASE 9 - Indicazioni per interventi di mitigazione del rischio idraulico e da dinamica d'alveo

Nei capitoli seguenti vengono descritti nel dettaglio i contenuti delle singole fasi sopra richiamate.

1. IL QUADRO CONOSCITIVO

Lo studio è condotto avvalendosi degli studi e della documentazione già disponibile, utile a costruire il quadro conoscitivo con riferimento ai seguenti elementi fondamentali: caratterizzazione idraulica e sedimentologica del corso d'acqua e dei principali affluenti, caratterizzazione morfologica attraverso i profili delle sezioni trasversali, acquisizione dei dati sul trasporto solido.

Sulla base dell'acquisizione e dell'analisi della documentazione raccolta sono individuate le eventuali integrazioni per il completamento del quadro conoscitivo necessario alle successive fasi del presente studio. Sono presi come base di riferimento per una prima traccia del quadro conoscitivo i seguenti studi e documenti:

- Ministero dei Lavori Pubblici, Servizio Idrografico, Rilievi dell'Alveo dei Corsi d'Acqua, Pubbl.n. 23 del Servizio, Fasc. XII e XI, Roma 1976.
- Regione Toscana, Piano di Bacino del Fiume Ombrone – Studi Preliminari, Rapporto di Sintesi, Aprile 1991.
- Regione Toscana, Regionalizzazione delle portate di piena in Toscana, Firenze, 1998.
- Autorità di Bacino del Fiume Ombrone, Piano di Assetto Idrogeologico, Piano degli Interventi Strutturali, Grosseto, 2000.
- Regione Toscana, Progetto dell'Impianto di Monitoraggio delle Portate Liquide e Solide nel Bacino del Fiume Ombrone Grossetano, Relazione Tecnica Conclusiva, Firenze, Febbraio 2002.
- Regione Toscana, Dipartimento delle Politiche territoriali e Ambientali, Integrazione del Sistema Dati ed Allertamento e Determinazione delle Scale di Deflusso Teorico per la Regione Toscana, Firenze, Maggio 2003.
- Amministrazione Provinciale di Siena, Proposta di modifica al Piano di Interventi per la Mitigazione del Rischio Idraulico nel Bacino Ombrone in Provincia di Siena, 2005.

Degli altri studi consultati se ne riporta di seguito una sintesi dei contenuti rimandando alla citazione bibliografica per gli eventuali approfondimenti.

Progetto dell'impianto di monitoraggio delle portate liquide e solide nel bacino del F. Ombrone Grossetano [31] [32]

Lo studio, iniziato nel 1995 e concluso nel 2001 si articola nelle seguenti fasi:

- progetto e installazione di tre stazioni di misura delle portate liquide e solide nel bacino del Fiume Ombrone: F. Orcia a Monte Sant'Angelo, F. Merse a Montepescini e F. Ombrone a Ponte d'Istia;
- progetto ed esecuzione dei rilievi d'alveo relativi alle sezioni fluviali e sedimentologiche. In particolare, nel 1999 sono stati eseguiti rilievi topografici per un totale di 223 sezioni fluviali [30], di cui 160 sul corso principale del fiume Ombrone, in corrispondenza delle sezioni già esistenti rilevate dal Servizio Idrografico negli anni 1971-73 [19] [20]. Per quanto riguarda i rilievi sedimentologici, in totale sono stati effettuati 41 stazioni di campionamento di cui 14 sull'asta principale del F. Ombrone [31].
- esecuzione delle attività di taratura delle stazioni di misura per la costruzione delle scale di deflusso delle portate liquide, per la messa a punto dei campionatori automatici del trasporto in sospensione, per la definizione della curva di correlazione portate liquide – portate solide.
- analisi dei dati e della dinamica d'alveo in atto sulla base dell'elaborazione dei dati di trasporto solido, della corrente liquida, delle caratteristiche granulometriche, e delle sezioni fluviali.

- *Evoluzione storica dell'uso del suolo nel bacino del Fiume Ombrone Grossetano ed effetti sulla produzione dell'apporto solido alla foce [24].*

Tale studio affronta il problema delle variazioni di uso del suolo che all'interno del bacino idrografico del Fiume Ombrone possono aver causato modifiche nel regime degli apporti solidi dai versanti verso il reticolo idrografico e quindi alla costa. In particolare, lo studio analizza l'assetto della costa in prossimità della foce dell'Ombrone che fino alla metà dell'Ottocento ha beneficiato dell'apporto detritico dell'Ombrone, mostrando una vasta cuspidè deltizia. Successivamente, anche in seguito all'opera di bonifica per colmata e all'estrazione di grandi quantità di inerti dall'alveo fluviale, l'apporto solido del fiume si è progressivamente ridotto, dando luogo ad un arretramento della linea di riva, al momento ancora in atto.

Lo studio intende fornire una stima degli effetti indotti dalle variazioni dell'uso del suolo sulla produzione solida a scala di bacino. A tal fine, dopo aver ricavato l'uso del suolo al 1830 dal Catasto Leopoldino e quello al 1996 dal Progetto Corine, utilizza il modello di erodibilità R.U.S.L.E., Revised Universal Soil Loss Equation per quantificare l'erodibilità dei versanti. Il modello fornisce una notevole diminuzione del valore della perdita media annua di suolo che può essere attribuita, almeno in buona parte, ai cambiamenti che si sono verificati nell'utilizzazione del suolo e, in particolare, alla drastica riduzione del numero dei prati e dei pascoli.

Evoluzione storica del delta del Fiume Ombrone

Pranzini [23] ricostruisce il bilancio sedimentologico del delta del F. Ombrone ottenendo un apporto solido alla foce dell'ordine di 1 milione di metri cubi/anno di materiale solido che dovevano arrivare dal bacino alla fine dell'ottocento. Tenendo conto della subsidenza, dell'innalzamento del livello medio del mare, delle opere di bonifica, e utilizzando anche i risultati di altri studi, Pranzini perviene alla conclusione che il fenomeno erosivo del delta del Fiume Ombrone sia da imputarsi alle variazioni di uso del suolo a scala di

bacino che hanno causato la riduzione della produttività di sedimenti. Ciò appare coerente con i risultati ottenuti nello studio [24].

Coastal Erosion Monitoring - A network of regional observatories, Results from RESMAR Project, Ed. By Luigi Cipriani, Regione Toscana, 2013 [9]

Nello studio sono riportati dati recenti sui fenomeni erosivi della costa grossetana. In particolare, come si può osservare dalla Figura 1, il settore areale di Bocca d'Ombrone è andato soggetto nel periodo 2005-2010 ad un repentino incremento del tasso erosivo rispetto al ventennio precedente.

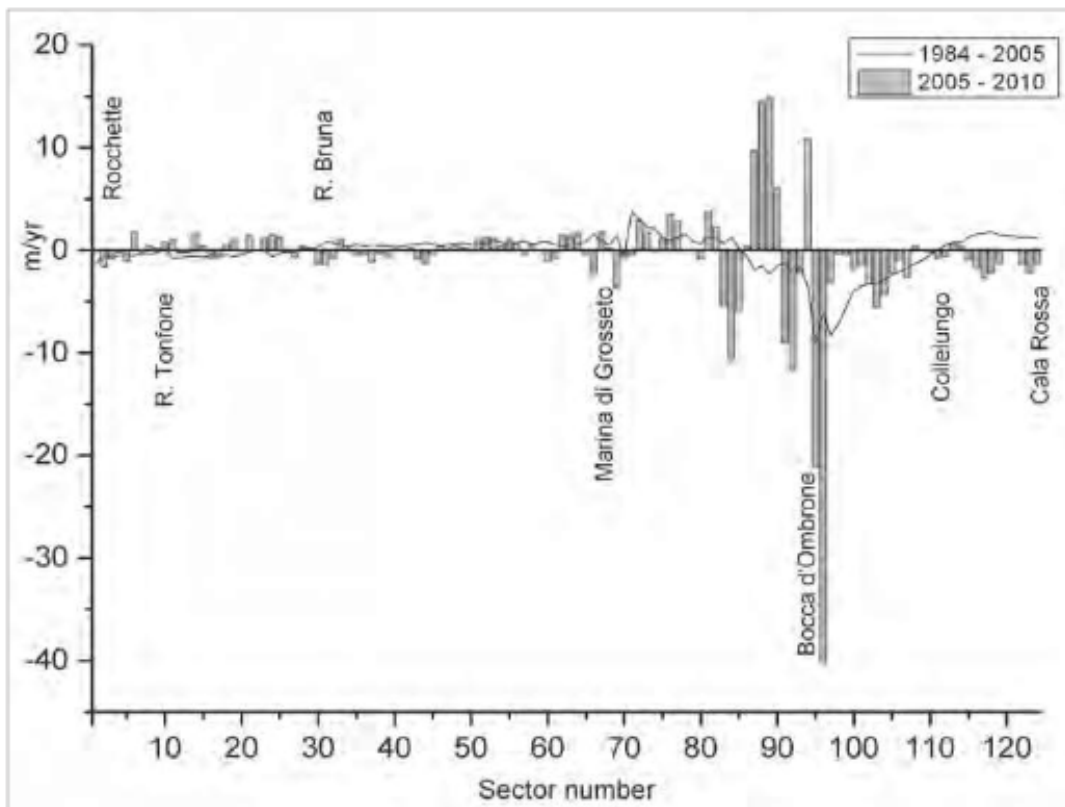


Figura 1 Evoluzione dei fenomeni erosivi della costa grossetana [9]

Utilizzando i dati riportati in [9] [23] è stato possibile ricostruire il processo erosivo del tratto costiero di Bocca d'Ombrone riportando l'arretramento della linea di riva a partire dal 1880, come illustrato nella Figura 2.

Si osserva un trend costante fino agli anni 60 circa, che successivamente si incrementa fino a primi anni del 2000 per poi subire una brusca accelerazione fino al 2010.

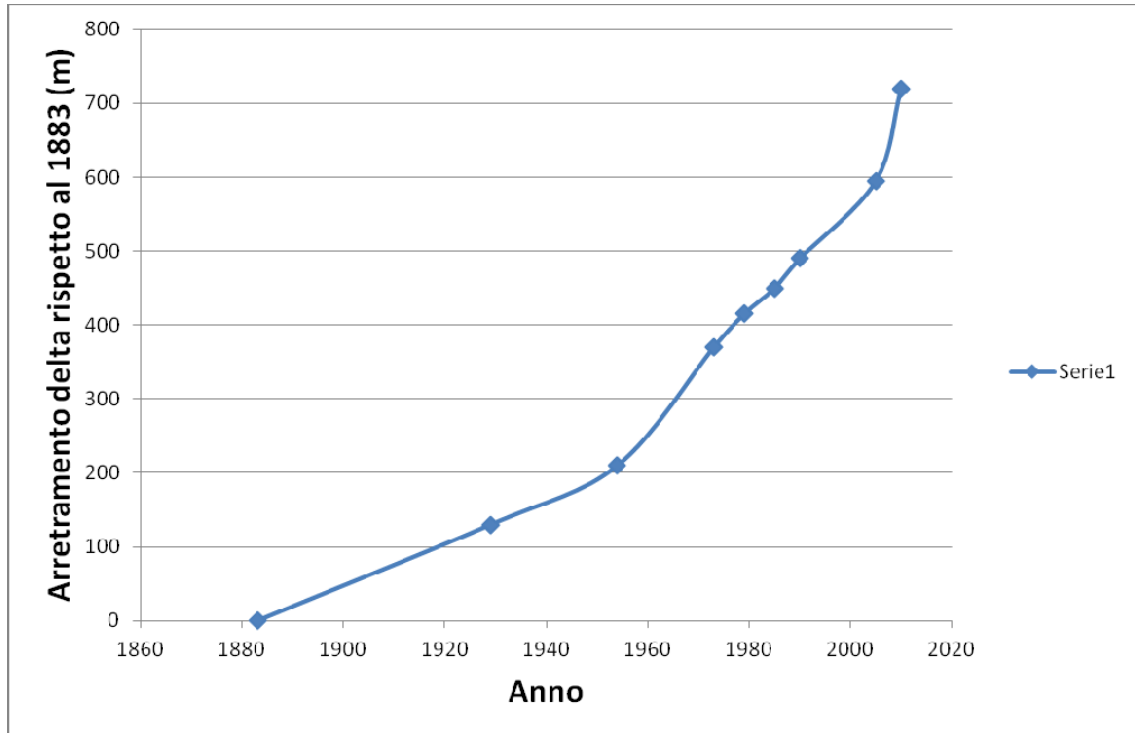


Figura 2 Evoluzione dei fenomeni erosivi della costa grossetana dal 1880 al 2012.

1.1 Le sezioni fluviali

Nel periodo 1968-73 il Servizio Idrografico di Pisa ha effettuato il rilievo delle sezioni fluviali del fiume Ombrone dalla Foce fino a Buonconvento, per una lunghezza complessiva del corso d'acqua pari a 115 km e un numero di sezioni pari a 364 [19] [20]. Le sezioni trasversali furono delimitate da due pilastri in cemento armato infissi sulle sponde opposte e rilevati planimetricamente e altimetricamente. La descrizione di tali rilievi è riportata con grande cura nella Pubblicazione n. 23 del Servizio Idrografico (Figura 3) ove sono rappresentati i profili del thalweg, della superficie d'acqua in condizioni di magra e in condizioni di massima piena (evento del novembre 1966). Nella stessa pubblicazione sono riportate le cartografie in scala 1:10.000 relative al corso d'acqua, con l'ubicazione delle sezioni e le coordinate dei pilastri di

riferimento. Sono infine riportati i profili di alcune sezioni significative del corso d'acqua. Tale rilievo sarà di seguito indicato come "rilievo 70".

Nel 1999 il genio Civile di Grosseto affidava alla **IRTEF S.R.L.** di Firenze il rilievo di 223 sezioni relative all'asta principale del fiume Ombrone e dei suoi principali affluenti, ripartite come indicato nella Tabella 1.

Tabella 1 Sezioni fluviali rilevate nel bacino del f. Ombrone Grossetano

Corso d'acqua	n. sezioni rilevate da IRTEF	Rilievi precedenti
Ombrone	160	Servizio Idrografico 1971-73
Merse	9	Assenti
Arbia	19	Assenti
Farma	10	Assenti
Maiano	5	Assenti
Melacce	8	Assenti
Orcia	12	Assenti

I rilievi delle sezioni sono stati riferiti ad una rete GPS comprendente n. 6 vertici IGM e n. 212 vertici di nuova determinazione per un totale di n. 218 vertici materializzati con centrini in alluminio murati su manufatti esistenti posti in maniera tale che fossero visibili almeno da un altro vertice, il tutto come meglio descritto nelle relazioni tecniche contenute in [31]. Tale rilievo sarà di seguito indicato come "rilievo 2000".

1.2 I rilievi sedimentologici

Nel citato studio [31] è stata effettuata una campagna di rilievi sedimentologici nel 1995 relativamente al corso principale del Fiume Ombrone da Buonconvento fino alla Foce e i tratti significativi prima della confluenza dei suoi principali affluenti, Merse, Orcia, Arbia, Trasubbie, Gretano, Melacce, Maiano, per un totale di 41 stazioni di campionamento e un numero di oltre 400

rilievi sedimentologici. Il tutto come meglio descritto nella Relazione Tecnica [31].

I dati relativi a questa campagna di misure sono stati acquisiti e descritti nella relazione "Misure e rilievi nei corsi d'acqua".

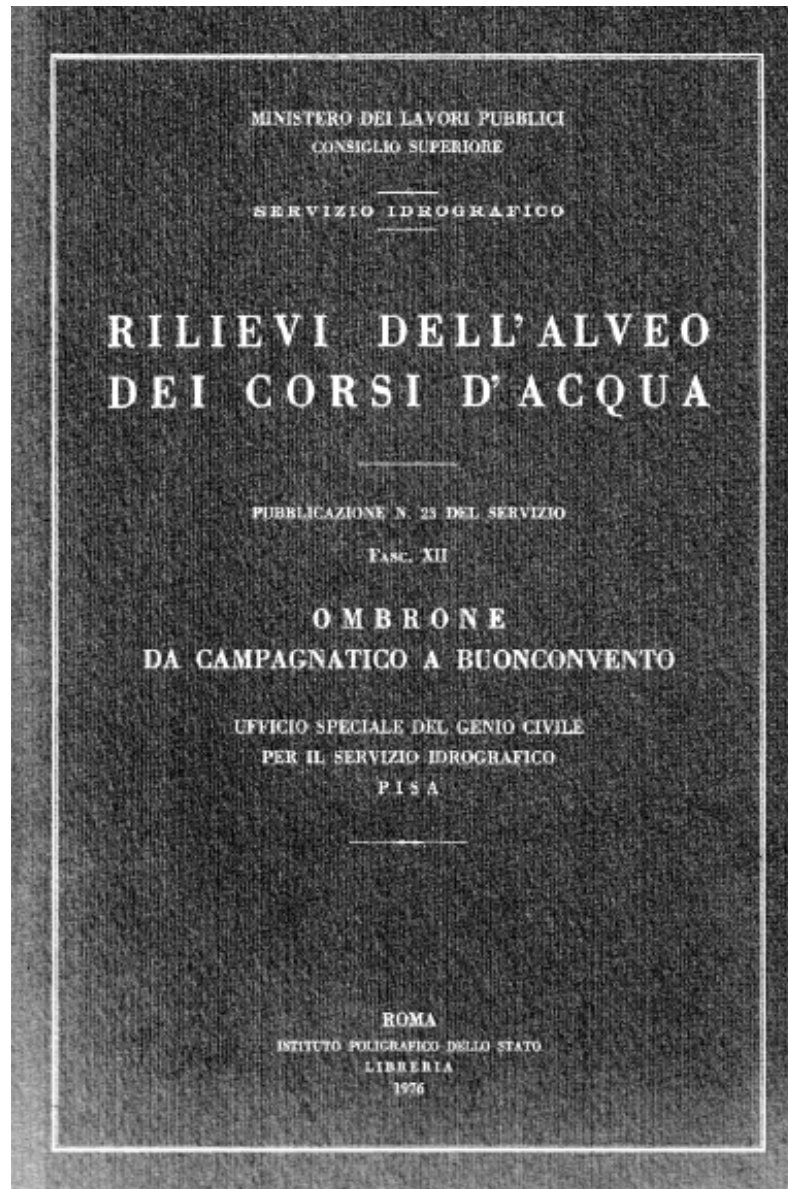


Figura 3 Pubblicazione n. 23, Servizio Idrografico, RILIEVI DELL'ALVEO DEI CORSI D'ACQUA Ministero dei Lavori Pubblici, Roma, 1976.

1.3 I dati idrometrici

Nel bacino del Fiume Ombrone sono presenti le stazioni del Servizio Idrologico le cui caratteristiche sono elencate nella Tabella 2. I dati idrometrici di interesse riguardano le stazioni ubicate lungo il corso principale del Fiume Ombrone per le quali sono stati acquisiti i valori delle portate medie giornaliere utili per la costruzione delle curve di durata (v. par.2)

Ombrone per le quali sono stati acquisiti i valori delle portate medie giornaliere utili per la costruzione delle curve di durata.

Tabella 2 Stazioni idrometriche nel bacino del fiume Ombrone Grossetano

Denominaz. Stazione	Coordinate Gauss-Boaga	Coordinate Gauss-Boaga	Coordinate UTMN	Coordinate UTME	Quota m.s.m.	Tipologia
	N	E				
Buonconvento	4778826.63	1701404.87	4779011.13	701456.37	-	Idrometro
					131.52	Asta idrometrica
Sasso d'Ombrone	4756186.10	1689506.40	4756370.61	689557.90	-	Idrometro
					54.52	Asta idrometrica
Berrettino	4735087.20	1673820.68	4735271.70	673872.18	7.70	Sensore idrometrico
Istia	4738952.88	1679386.25	4739137.38	679437.75	-	Idrometro
					12.04	Asta idrometrica
					12.07	Asta idrometrica (rif. ad (viadotto))
					12.07	Asta idrometrica (viadotto)
Orcia	4759135.79	1697872.04	4759320.29	697923.54	-	Sensore idrometrico
					98.75	Asta idrometrica
Merse	4774243.96	1689402.46	4774428.46	689453.96	-	Sensore idrometrico
					121.31	Asta idrometrica
Arbia	4786044.80	1699295.71	4786229.30	699347.21	-	Sensore idrometrico
Trasubbie	4740224.59	1683229.54	4740409.09	683281.04	-	Sensore idrometrico

Denominaz. Stazione	Coordinate Gauss-Boaga N	Coordinate Gauss-Boaga E	Coordinate UTMN	Coordinate UTME	Quota m.s.m.	Tipologia
Farma	4772196.35	1687238.22	4772380.85	687289.72	-	Sensore idrometrico

1.4 Le scale di deflusso

Dallo studio [26] sono state acquisite le scale di deflusso disponibili per l'asta principale del fiume Ombrone e, più precisamente, per le stazioni idrometriche di Sasso d'Ombrone, Ponte d'Istia e Berrettino. Ai fini del presente studio, le scale di deflusso, originariamente espresse in termini di altezze idrometriche, sono state riformulate in termini di altezze d'acqua e espresse analiticamente in una forma monomia. Ovviamente tale operazione ha comportato alcune approssimazioni rispetto alle curve originarie, soprattutto per quanto riguarda il tratto più basso delle curve. Poiché in tale tratto le portate di magra praticamente risultano ininfluenti sulle portate solide, le approssimazioni introdotte sono state ritenute accettabili.

Nelle Figura 4, Figura 5, Figura 6 si riportano le curve originali per le tre stazioni considerate. Nella Tabella 3 si riportano i coefficienti a e n della forma analitica della scala di deflusso del tipo:

$$y = a \cdot Q^n \quad 1$$

ove y rappresenta l'altezza d'acqua misurata in metri a partire dalla quota del thalweg (riportata in tabella) della sezione considerata, mentre Q è la portata corrispondente in metri cubi al secondo.

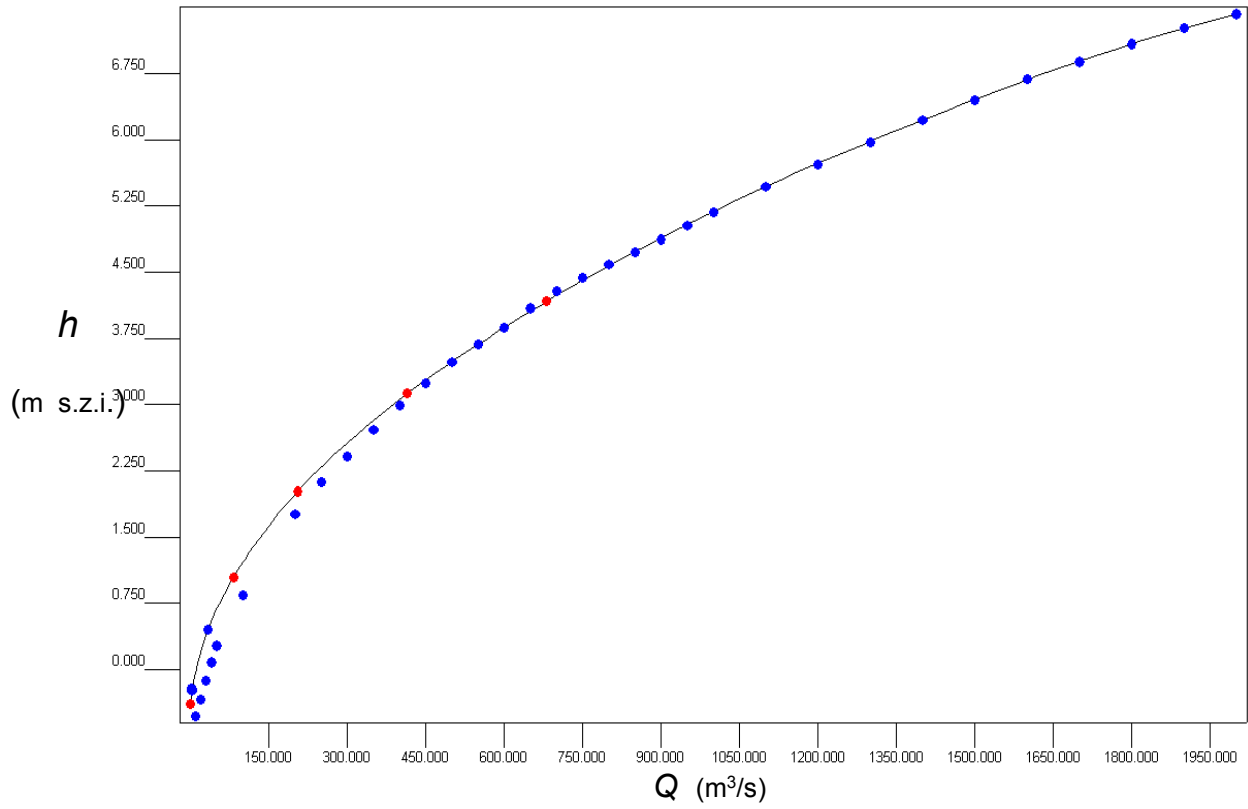


Figura 4 Stazione di Sasso d'Ombrone: scala di deflusso tratta da [26].

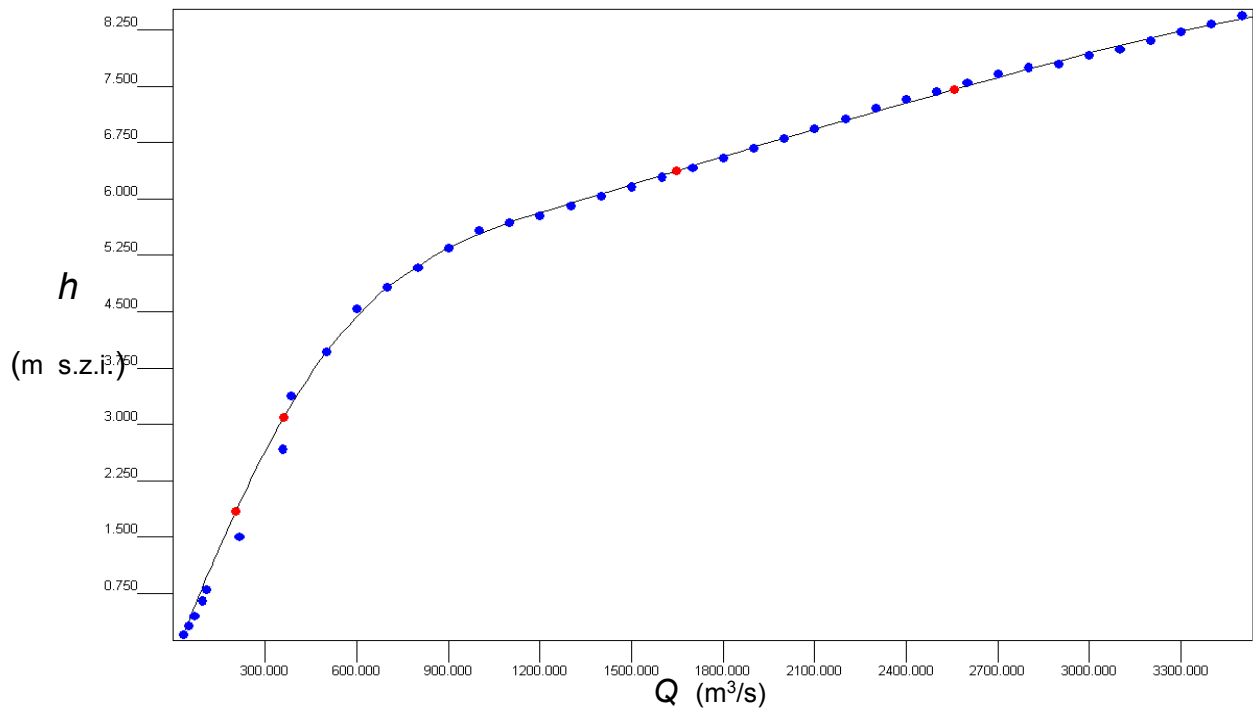


Figura 5 Stazione di Ponte d'Istia: scala di deflusso tratta da [26].

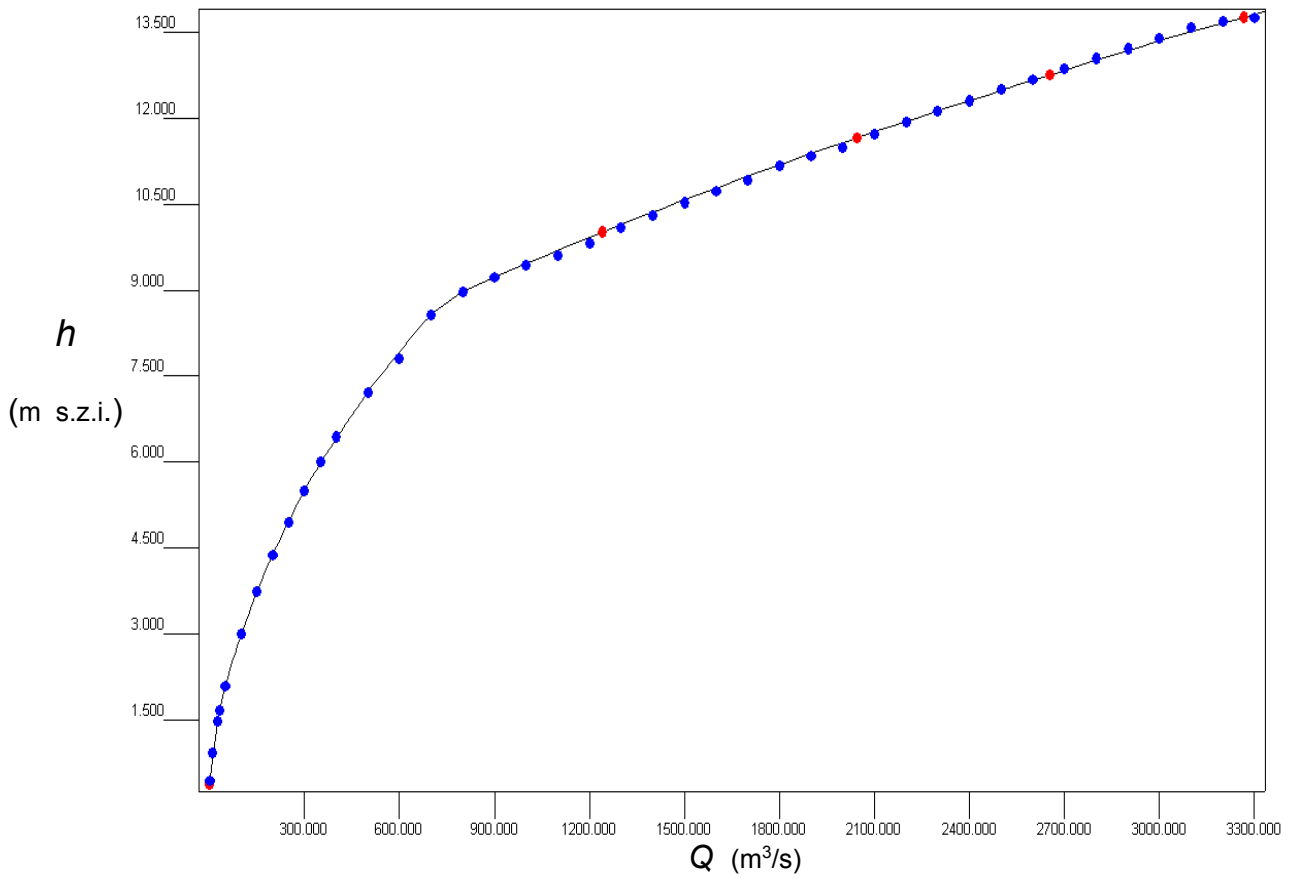


Figura 6 Stazione di Berrettino: scala di deflusso tratta da [26].

Tabella 3 Coefficienti a e n delle curva di deflusso $y = a Q^n$

(y = altezza d'acqua sullo zero idrometrico)

Nome stazione	Codice	Quota zero idrometrico (m.s.m.)	Quota thalweg (m.s.m.)	a	n
Sasso d'Ombrone	5792	54.68	53.70	0.30	0.44
Ponte d'Istia	5821	12.07	9.60	0.96	0.30
Berrettino	5841	1.98	1.02	0.81	0.36

1.5 I dati di portata

Al fine di caratterizzare il regime delle portate liquide del fiume Ombrone nel tratto studiato sono stati acquisiti i dati relativi alla stazione idrometrica del F. Ombrone a Sasso d'Ombrone in quanto dotata di serie storica significativa.

I dati ricavati dalle pubblicazioni del Servizio Idrografico [21], sono particolarmente utili in quanto forniscono, oltre ai valori delle portate al colmo che si sono verificate per ciascun anno di osservazione, i dati delle portate medie giornaliere già elaborati in termini di durate espresse in giorni /anno.

Nella Tabella 4 seguente si elencano i dati tratti dalle pubblicazioni citate, relativamente alla portata media giornaliera massima nell'anno, avente cioè durata pari a 1 giorno/anno, e la corrispondente portata al colmo.

Presso il SIR-Servizio Idrologico regionale, sono stati acquisiti i dati delle portate medie giornaliere alla stazione di Sasso d'Ombrone per il periodo 1953-2012.

1.6 Dati integrativi

Sulla base della documentazione analizzata sono stati individuati gli elementi conoscitivi necessari ad integrare il quadro conoscitivo, Questi comprendono:

- i rilievi LIDAR da utilizzare per il completamento delle sezioni fluviali con le aree golenali;
- i nuovi rilievi sedimentologici utili a caratterizzare la dinamica d'alveo a seguito dei numerosi eventi di piena avvenuti nel decennio 2000-2010.

Tabella 4 - F. Ombrone a Sasso d'Ombrone: dati di portata tratti da [21].

SASSO D'OMBRONE			
	A sottesa (Alto) [Kmq]	2704	
	A sottesa (S.I.) [Kmq]	2657	

SASSO D'OMBRONE			
N. progr.	ANNO	Portata media giornaliera [mc/s]	Portata al colmo [mc/s]
1	1936	755	994
2	1937	826	1680
3	1938	594	1250
4	1939	1160	2000
5	1940	1020	2380
6	1941	652	1059
7	1942	700	1022
8	1949	558	972
9	1950	310	1110
10	1951	390	573
11	1952	230	346
12	1953	452	788
13	1954	314	607
14	1955	247	424
15	1956	356	668
16	1957	460	665
17	1958	447	1010
18	1959	471	747
19	1960	377	1570
20	1961	416	795
21	1962	372	535
22	1963	536	944
23	1964	673	843
24	1965	1270	1700
25	1966	2660	3110
26	1967	237	514
27	1968	535	857
28	1969	369	741
29	1970	273	477
		MINIMO	346
		Massimo	3110
		Media .min-max	997.2

1.6.1 Rilievi sedimentologici integrativi

Nel bacino del Fiume Ombrone sono state svolte due campagne di rilievi sedimentologici, una nel 1990 nell'ambito dello studio [27], l'altra nel 1998 nell'ambito del già citato studio [31]. Occorre osservare che i rilievi del 1990, in numero pari a sette, si riferiscono al solo tratto del Fiume Ombrone, mentre nel 1998 sono stati eseguiti 41 rilievi comprendenti anche i maggiori affluenti.

Nonostante la significatività della campagna di misura eseguita nel 1998, le numerose piene che si sono verificate negli ultimi dieci anni, insieme alla dinamica evolutiva del corso d'acqua, hanno fatto ritenere necessaria l'esecuzione di una terza campagna di misura nell'ambito del presente studio. Nel periodo aprile-giugno 2013 sono stati effettuati 9 rilievi sedimentologici sul corso principale, con ubicazione praticamente coincidente con quella dei rilievi 1998. Ciò al fine di poter condurre confronti significativi per evidenziare le eventuali modifiche nella composizione granulometrica del materiale d'alveo.

Al momento della stesura della presente relazione il numero complessivo dei rilievi sedimentologici effettuati è pari a 49. Ubicazione, modalità di prelievo e caratteristiche sedimentologiche sono riportati nella Relazione Intermedia relativa alle attività "D", che fa parte degli elaborati prodotti nell'ambito del presente studio.

2. ELABORAZIONE DEI DATI

2.1 Le curve di durata

Ai fini del calcolo del trasporto solido su scala medio annua, necessario ai fini del bilancio sedimentologico, occorre disporre delle curve di durata del corso d'acqua, cioè di una funzione che associ ad ogni portata la corrispondente durata, cioè il periodo per il quale tale portata è stata uguagliata o superata. La curva di durata caratterizza pertanto il regime idraulico del corso d'acqua.

Le curve di durata sono ottenibili da dati rilevati per le sezioni ove risulta presente una stazione idrometrica del Servizio Idrografico. Quanto maggiore risulta l'estensione temporale dei dati disponibili tanto più la curva di durata sarà rappresentativa del "regime medio annuo" delle portate liquide.

Nel bacino del fiume Ombrone le stazioni significative sono: Ombrone a Sasso d'Ombrone, Orcia a Monte Amiata e Merse a Ornate. Ai fini della presente relazione, la costruzione delle curve di durata farà riferimento alla sola stazione di Sasso d'Ombrone.

Per la costruzione delle curve di durata sono stati adottati i seguenti criteri:

1. Poiché le curve di durata delle portate liquide costituiscono la base per il calcolo del trasporto solido medio annuo, è necessario fare riferimento alle portate al colmo piuttosto che ai valori medi giornalieri. Ovviamente nel caso in cui alla scala giornaliera la portata al colmo non si discosti molto dal valore medio giornaliera, è indifferente l'utilizzo di un dato rispetto all'altro. Per effettuare la verifica di tale condizione è pertanto necessario disporre del valore contemporaneo della portata media giornaliera e del suo valore al colmo, desumibili dalle Pubblicazioni del Servizio Idrologico già citate [21].
2. I dati del Servizio Idrologico, per la non ampia estensione temporale, non permettono di valutare in modo significativo le

portate di piena più rare, cioè con frequenze di ricorrenza basse. Per ovviare a ciò si è fatto ricorso al codice Alto che permette di stimare su base statistica le portate al colmo per qualunque valore del tempo di ritorno superiore a due anni;

3. Poiché esistono due campagne di rilievi topografici delle sezioni trasversali del F. Ombrone, effettuati a distanza di circa 30 anni uno dall'altro, è stato ritenuto utile costruire le curve di durata per il periodo di tempo al quale si riferiscono i rilievi topografici, in modo da associare il regime idraulico del corso d'acqua alla corrispondente configurazione geometrica. In particolare al rilievo d'alveo del 1970 si sono associate le curve di durata elaborate sui dati del periodo 1926-1970, mentre al rilievo del 1999 sono state attribuite le curve di durata elaborate sul periodo di osservazione compreso tra il 1971 e il 2012. Si può osservare che il numero di anni di osservazione è praticamente lo stesso per i due sottoperiodi.

La metodologia per la costruzione della curva di durata si può basare su criteri diversificati. In termini di portate medie giornaliere un criterio può essere quello di utilizzare le coppie di punti durata-portata già elaborati dal Servizio Idrografico, interpolandoli e/o estrapolandoli mediante una opportuna funzione. Altro criterio è l'elaborazione di tutti i dati giornalieri di portata disponibili sul periodo di osservazione ottenendo così una curva praticamente continua. Come funzione interpolante/estrapolante può essere utilizzata la trasformazione a tre parametri di Gibrat che ad ogni valore della portata Q associa la variabile ausiliaria z definita dalla:

$$z = a \cdot \log(Q - Q_o) + b \quad 2$$

alla quale è assegnata una distribuzione di frequenza gaussiana e, quindi, una durata espressa in giorni/anno da:

$$\phi(z) = \frac{365}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-z^2} dz$$

3

la stima dei parametri a , b , e Q_0 può essere effettuata mediante regressione delle coppie dei valori noti durata-portata.

Sulla base dei dati reperiti nelle pubblicazioni [21], nonché dei dati sulle portate medie giornaliere fornite dal SIR per il periodo 1953 – 2012, è stato possibile costruire le curve di durata in termini di portate giornaliere. I dati contenuti in [21] hanno inoltre permesso l'individuazione della correlazione tra portate medie giornaliere e portate al colmo, come riportato nella Figura 7.

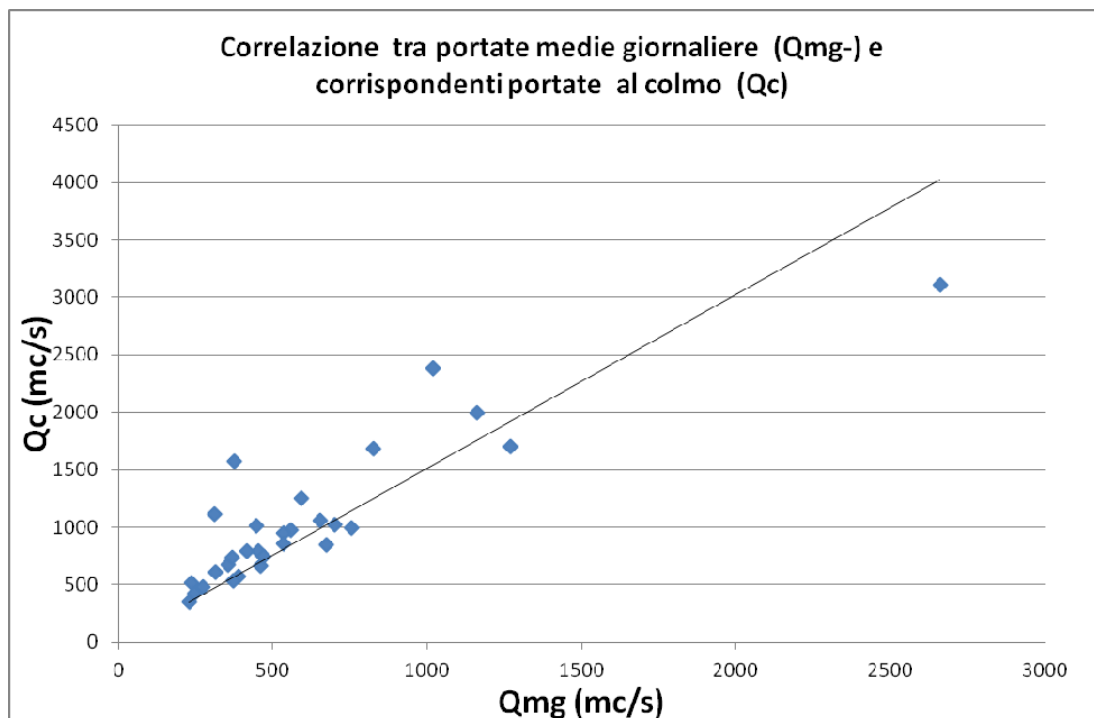


Figura 7 Ombrone a Sasso d'Ombrone: correlazione tra portate al colmo (Q_c) e portate medie giornaliere (Q_{mg})

Si può osservare che il rapporto $K_c = Q_c/Q_{mg}$ tra portata al colmo e portata media giornaliera è dell'ordine di 1.5. Tale rapporto tende di norma a diminuire con il crescere della portata in quanto cresce anche la durata dell'onda di piena. Nella presente analisi K_c viene assunto costante. Tale correlazione sarà nel seguito usata per passare dalle portate medie giornaliere a quelle al colmo e viceversa. Si osserva infine che tale correlazione è stata

ottenuta su dati relativi al solo periodo 1926-70. Si assume tuttavia che la natura di tale correlazione possa essere estesa anche al periodo successivo.

La curva di durata in termini di portata al colmo è quindi ricavabile secondo i seguenti criteri:

- Per le basse durate, in generale minori di 0.5 gg/anno, il codice Alto fornisce già i valori delle portate al colmo;
- Per le durate > 0.5 gg/anno, i dati medi giornalieri forniti dal Servizio Idrografico [21] e dal SIR, vengono trasformati in portate al colmo mediante il coefficiente K_c ($Q_c = K_c Q_{mg}$).
- La portata al colmo di durata 1 giorno è direttamente ricavabile utilizzando le osservazioni delle portate al colmo riportate in [21], facendone la media dei dati disponibili, avendo preventivamente scartato il minimo e il massimo della serie per evitare l'inclusione di eventi eccezionali.

Curva di durata per il periodo 1926-1970

Sulla base dei criteri precedentemente esposti, si è proceduto alla elaborazione di dati disponibili per la determinazione della funzione di Gibrat, ricavandone i tre coefficienti mediante la miglior correlazione lineare nel diagramma z - $\log(Q - Q_0)$, come rappresentato in Figura 8.

I parametri corrispondenti risultano: $Q_0 = 0$, $a = 1.22$, $b = 1.44$.

La curva di durata per il fiume Ombrone a Sasso d'Ombrone risulta in definitiva quella mostrata in Figura 9, ove sono riportati i punti dedotti dal Servizio Idrografico e dal codice Alto, insieme alla funzione di Gibrat.

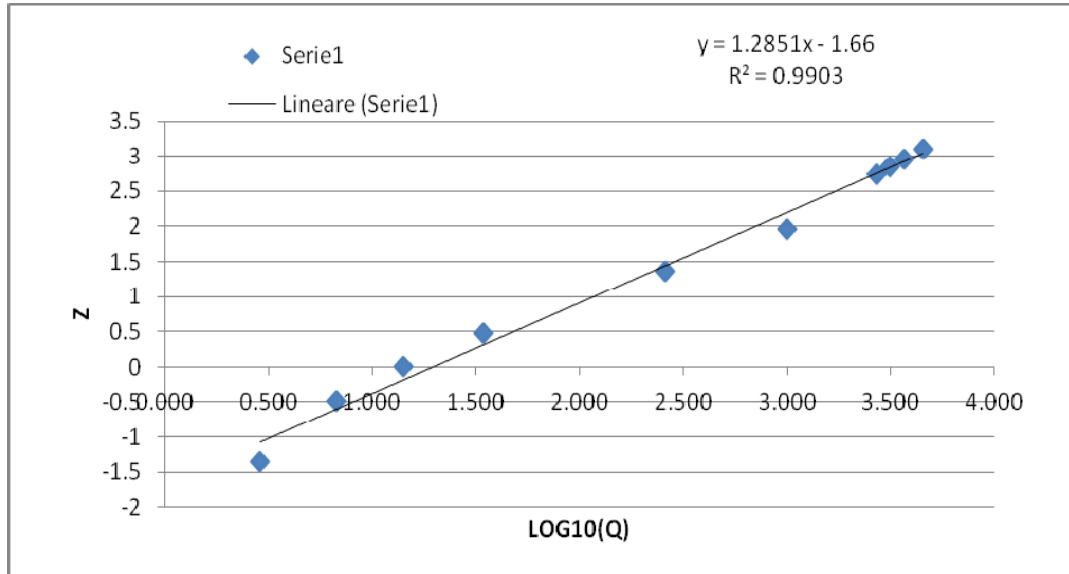


Figura 8 Correlazione ottimale per la stima dei parametri di Gibrat (1926-70)

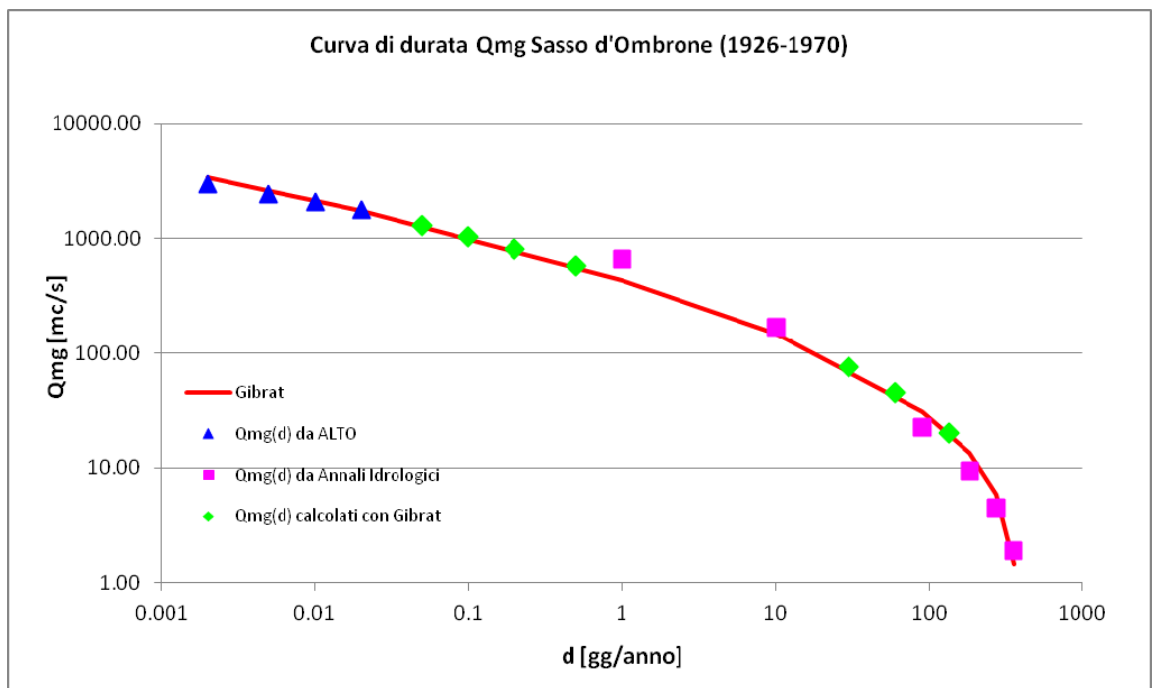


Figura 9 Curva di durata per il periodo 1926-1970

La Tabella 5 riassume la procedura di costruzione della curva di durata e precisamente:

Tabella 5 Sintesi della costruzione della curva di durata a Sasso d'Ombrone per il periodo 1926-1970

Q colmo per durate mancanti calcolata con Gibrat d[gg/yr]	Y [-]	Z [-]	Q Gibrat colmo [mc/s]	TABELLA RIASSUNTIVA		
				d [gg/yr]	Qc [mc/s]	Qmg [mc/s]
0.05	0.999726	2.573	1967.97	0.002	4511.99	2988.07
0.1	0.999452	2.4439	1561.66	0.005	3673.42	2432.73
0.2	0.998904	2.3085	1225.36	0.01	3133.23	2074.98
0.5	0.99726	2.1182	871.47	0.02	2704	1790.73
30	0.835616	0.9832	114.47	0.05	1967.97	1303.29
60	0.671233	0.6906	67.97	0.1	1561.66	1034.21
135	0.260274	0.2349	30.32	0.2	1225.36	811.5
				0.5	871.47	577.13
				1	997.22	660.41
				10	258.21	171
dati da Annali (Fonte SIR – Servizio Idrologico regionale)				30	114.47	75.81
dati calcolati con ALTO				60	67.97	45.01
dati calcolati mediante eq di Gibrat per durate mancanti				91	34.13	22.6
dati scalati =Qmg(SASSO)*(Amonte/A)				135	30.32	20.08
Calcolo della curva di Gibrat				182	14.04	9.3
				274	6.72	4.45
				355	2.87	1.9

- Le portate con basse frequenze (elevati tempi di ritorno T_r compresi tra 500 e 50 anni) sono state ricavate attraverso il codice ALTo. Quest'ultimo non è stato utilizzato per frequenza maggiori ($T_r < 50$ anni) in quanto l'algoritmo di calcolo tende a fornire un risultato costante);
- Pertanto, le portate al colmo per $2 < T_r < 50$ sono state stimate mediante la curva di Gibrat;
- La portata al colmo con durata 1 giorno, cioè la portata di piena media annua ($T_r = 1$ anno) è stata stimata come media delle portate al colmo massime annuali disponibili dalle pubblicazioni [21]. Si può notare il soddisfacente accordo di tale dato, del tutto indipendente dalla procedura di costruzione della curva di durata, con la curva stessa.
- Per le durate maggiori di 1 giorno sono stati utilizzati i dati del SIR eventualmente integrati con quelli ottenuti dalle pubblicazioni [21].

Curva di durata per il periodo 1971-2012

Per tale periodo sono disponibili i dati delle portate medie giornaliere forniti dal SIR – Servizio Idrografico Regionale, in base ai quali è stata costruita la curva di durata secondo i seguenti criteri:

- Le portate con frequenze comprese nell'intervallo 0.002-0.02 ($500 < T_r < 50$) sono sempre derivata dal codice Alto e pertanto coincidono con quelle già attribuite anche al periodo 1926-1970;
- Le portate con durate comprese nell'intervallo 0.5-0.02 ($2 < T_r < 50$) sono stimata dalla curva di Gibrat;
- Le portate con durate superiori sono state ottenute dai dati forniti dal SIR;
- Utilizzo degli stessi valori di portata di piena forniti dal codice per i tempi di ritorno 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 anni, corrispondenti alle durate in giorni/anno di 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5;

- Utilizzo dello stesso coefficiente di correlazione K_c tra portate al colmo e portate medie giornaliere;
- Trasformazione dei dati di portata al colmo forniti da Alto in dati medi giornalieri dividendoli per il coefficiente K_c ;
- Calcolo della curva di durata per i $365 \times 33 = 12045$ dati giornalieri dopo averli ordinati in ordine decrescente e avendo attribuito all' i -esimo dato la durata in giorni pari a $i/33$;
- Determinazione dei parametri della curva di Gibrat mediante correlazione lineare nel diagramma z - $\log(Q - Q_0)$, come rappresentato in Figura 10.

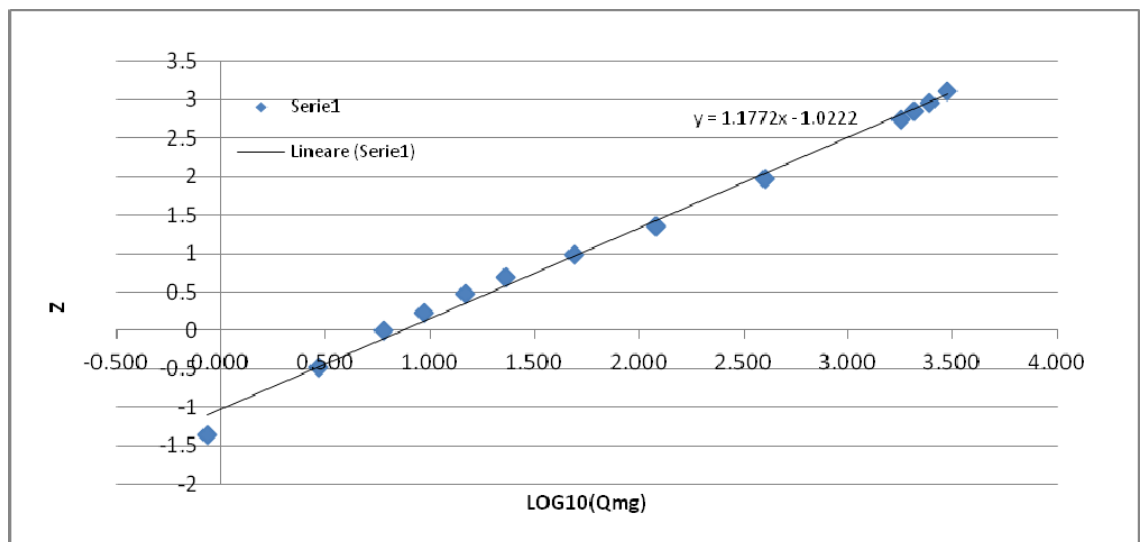


Figura 10 Correlazione ottimale per la stima dei parametri di Gibrat (1971-2012)

La curva di durata per il fiume Ombrone a Sasso d'Ombrone risulta in definitiva quella mostrata in Figura 11, ove sono riportati i punti dedotti dal Servizio Idrografico e dal codice Alto insieme alla funzione di Gibrat ottenuta ottimizzando tutta la serie dei dati disponibili. Come si può notare, l'accordo tra le diverse tipologie di dati è da ritenersi soddisfacente, così come la curva interpolante di Gibrat.

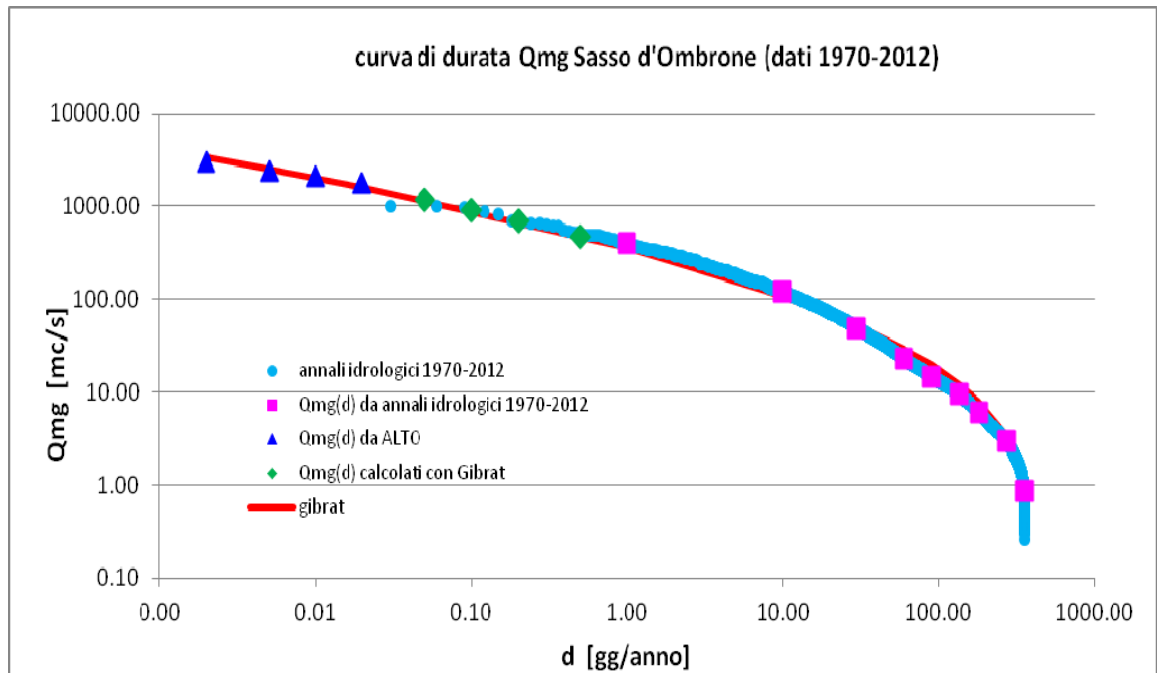


Figura 11 Sasso d'Ombrone: Curva di durata per il periodo 1970- 2012

La Tabella 6 mostra una sintesi della procedura di costruzione della curva di durata e precisamente:

- Le portate con basse frequenze (elevati tempi di ritorno T_r compresi tra 500 e 50 anni) sono state ricavate sempre mediante il codice ALTO e pertanto risultano esattamente uguali a quelle ottenute per il periodo precedente 1926-1970;
- Le portate per durate corrispondenti all'intervallo $2 < T_r < 50$ sono state stimate mediante la curva di Gibrat: questo per estrapolare la serie storica delle portate medie giornaliere coerentemente con i dati forniti da Alto. La Figura 11 mostra infatti una tendenza dei dati medi giornalieri verso portate più basse rispetto a quelle fornite da Alto.
- Per le durate maggiori di 2 giorno sono stati utilizzati i dati del SIR.

Tabella 6 Sintesi della costruzione della curva di durata a Sasso d'Ombrone per il periodo 1970-2012

Legenda	TABELLA RIASSUNTIVA		
	d [gg/yr]	Qmg [mc/s]	Qc [mc/s]
	0.002	2988.07	4511.99
	0.005	2432.73	3673.42
	0.01	2074.98	3133.23
	0.02	1790.73	2704
	0.05	1167.45	1762.85
	0.1	906.06	1368.15
	0.2	694.58	1048.82
	0.5	478.1	721.93
	1	398	600.98
	10	120.36	181.74
	30	48.96	73.93
	60	23	34.73
dati calcolati con ALTO	91	14.79	22.34
dati calcolati mediante eq di Gibrat	135	9.4	14.2
dati da SIR	182	6.02	9.09
	274	2.94	4.44
	355	0.86	1.29

Confronto tra le curve di durata

La notevole estensione della serie storica disponibile a Sasso d'Ombrone consente di effettuare in modo significativo il confronto tra le curve di durata ricavate per i due sottoperiodi considerati.

La Figura 12 riporta le due curve di durata. Si nota come nel periodo recente 1970-2012 i valori delle portate medie giornaliere "ordinarie", quelle cioè con durate uguali o superiore a 1 giorno/anno, risultano mediamente inferiori di circa il 50% rispetto a quelle osservate nel periodo antecedente (v. Tabella 7) per la stessa durata. Tale differenza sembra ridursi al diminuire della

frequenza anche se il trend mostrato dai dati SIR in Figura 11 parrebbe comunque confermare tale risultato anche verso le frequenze più basse.

Tale risultato mostra quindi che nell'ultimo quarantennio la variazione del regime idrologico delle portate si è sicuramente manifestata sulle portate con frequenze elevate (bassi tempi di ritorno), cioè le portate più ricorrenti e quindi quelle più determinanti nel bilancio idrologico e nel bilancio sedimentologico.

Per i tempi di ritorno più elevati i dati non sono sufficienti a trarre alcuna conclusione.

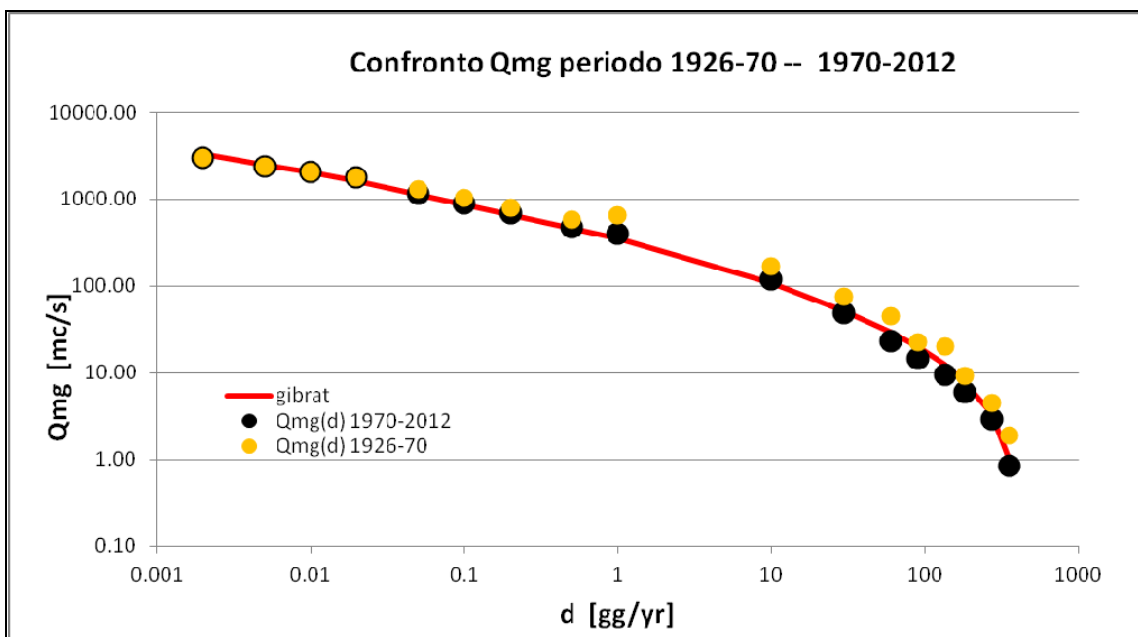


Figura 12 Sasso d'Ombrone: confronto tra le curve di durata relative ai due periodi considerati

Tabella 7 Sasso d'Ombrone: valori delle portate medie giornaliere nei due periodi considerati

CONFRONTO Q10-Q91-Q182-Q274-Q355 periodo 1926-70 vs 1920-2012		
d [gg]	Qmg periodo 1970-2012 (mc/s)	Qmg periodo 1926-70 (mc/s)
10	120.358	171.00
91	14.792	22.60
182	6.020	9.30
274	2.940	4.45
355	0.855	1.90

2.2 I dati sul trasporto solido

In questo paragrafo viene analizzato il problema del trasporto solido. A tal fine conviene richiamare i principali risultati ottenuti nello studio [31], ove sono state condotte nel periodo 1998-2000 presso la stazione di Ponte d'Istia misure di campo di portata liquida e di portata solida e analisi sedimentologiche di laboratorio.

Nel suddetto periodo sono stati monitorati 8 eventi significativi, con valori di portata liquida compresi tra 32 mc/s e 383 mc/s, come riportato nella

Tabella 8 insieme ai valori dei livelli idrici e delle portate solide in sospensione e al fondo.

Tabella 8 Misure di livello, di portata liquida e di portata solida per gli eventi considerati (periodo 1998-2000) – zero idrometrico asta a Ponte d'Istia = 12.07 m.s.m.

N. misura	Data evento	Portata Liquida (mc/s)	Portata solida fondo (kg/s)	Portata solida sospensione (kg/s)	Altezza d'acqua Max. (m)	Livello idrico (m.s.m.)
1	22/12/98	67.66	0.049	111.8	2.87	12.52
2	23/12/98	32.4	0.0080.00	6.81	2.62	12.27
3	12/01/99	92.11	0.633	94.28	2.96	12.72
4	13/01/99	49.44	0.032	18.67	2.69	12.39
5	16/11/99	214.68	1.88	561.7	4.17	13.57
6	16/11/00	356.8	3.87	2320	6.92	14.74
7	16/11/00	383.2	4.65	2321	6.91	15.45
8	17/11/00	107.9	0.64	112.7	3.53	12.87

L'analisi della dinamica del trasporto solido condotta sulla base dei dati misurati a Ponte d'Istia conduce alle seguenti considerazioni:

- il trasporto solido al fondo si mobilita per portate superiori a circa 30 mc/s;
- il materiale trasportato al fondo fino a portate inferiori a 400 mc/s appare costituito in prevalenza da sabbia, mentre il materiale d'alveo risulta prevalentemente ghiaioso;

- il materiale in sospensione, sempre per portate inferiori a 400 mc/s, risulta costituito da limo, con granulometrie tutte inferiori a 0.06 mm (v. Figura 13);
- la soglia critica per il trasporto del materiale d'alveo in sospensione inizia quando la velocità di attrito $U^* = (ghS)^{0.5}$ risulta confrontabile con la velocità di caduta dello stesso materiale. I valori massimi osservati della velocità di attrito risultano dell'ordine di circa 0.15 m/s in corrispondenza delle massime portate liquide osservate. Per tale valore della velocità di attrito si dovrebbe verificare il trasporto in sospensione di sedimenti con dimensioni fino a circa 0.7 mm;

L'analisi della curva granulometrica del materiale d'alveo rilevata poco a monte del Ponte d'Istia (Rilievo sedimentologico OM11) mostra che sedimenti di tali dimensioni sono presenti in alveo ma con percentuale molto bassa, inferiore al 5% (v. Figura 14). Ciò parrebbe confermato anche dall'analisi granulometrica del materiale trasportato al fondo (Figura 15).

In conclusione, le misure di trasporto solido effettuate nello studio [31] indicano che il quantitativo della componente sabbiosa è alquanto scarso, almeno nel tratto sotteso da Ponte d'Istia, ed è trasportato prevalentemente al fondo.

La portata solida al fondo risulta di circa 3 ordini di grandezza inferiore alla portata in sospensione (v. Figura 16),

Il confronto tra i valori del trasporto solido misurati e quelli calcolati ha mostrato che il criterio di Ackers e White risulta il più affidabile. Tale criterio [1] si basa sui seguenti parametri:

- Il parametro di mobilità generale *Fgr*:

$$Fgr = \frac{u_*^n}{\sqrt{(Sg - 1)gD_{35}}} \left(\frac{U}{5.65 \log \left(10.6 \frac{R}{D_{35}} \right)} \right)^{1-n}$$

4

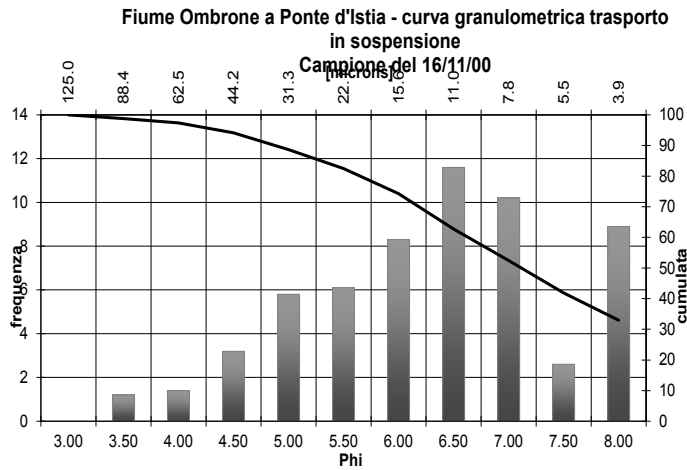


Figura 13 Granulometria del materiale trasportato in sospensione (evento del 16/11/2000)

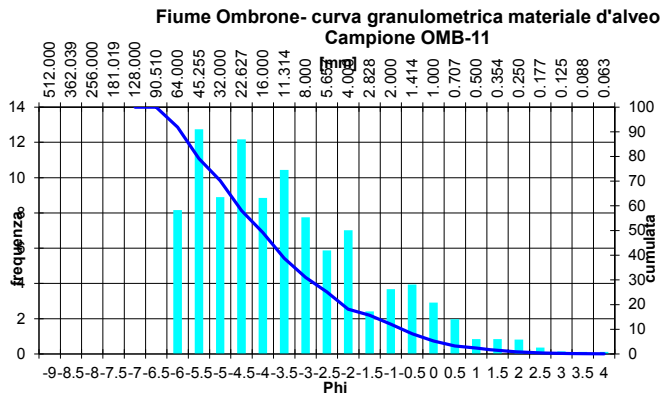


Figura 14 Granulometria del materiale d'alveo sezione OMB-11

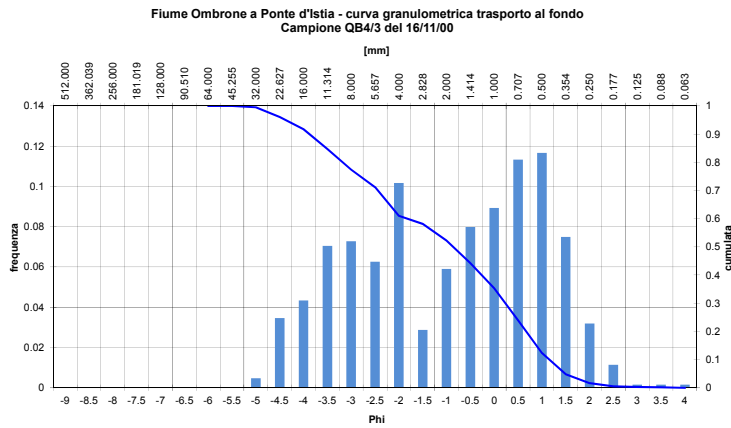


Figura 15 Granulometria del materiale trasportato al fondo (evento del 16/11/2000)

F. Ombrone a Ponte d'Istia: portata solida in sospensione e portata solida al fondo in funzione della portata liquida

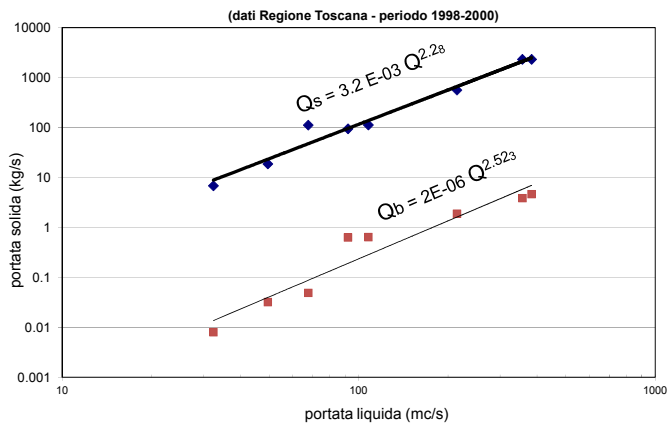


Figura 16 Correlazione portate liquide – portate solide a Ponte d'Istia

dove:

S Pendenza dell'alveo

R Raggio idraulico

$S_g = \gamma_{\text{sedimenti}} / \gamma_{\text{acqua}}$ Gravità specifica

$u_* = \sqrt{ghS}$ Velocità di attrito

Il parametro F_{gr} è il prodotto di due fattori pesati secondo un coefficiente funzione del diametro dei sedimenti

$$n = 1.0 - 0.56 \log D_{gr} \quad 1 < D_{gr} < 60$$

$$n = 0.0 \quad D_{gr} > 60$$

con:

$$D_{gr} = D_{35} \left((Sg - 1)g / \nu^2 \right)^{1/3} \quad 5$$

Il primo fattore è connesso alla tensione totale attraverso u^* mentre il secondo è relativo alla tensione effettiva sul fondo attraverso l'espressione:

$$u_*' = \frac{U}{5.65 \log(10.6R / D_{35})} \quad 6$$

Per i materiali molto fini (ma sempre non non coesivi) D_{gr} tende a uno e quindi n ed il secondo fattore di F_{gr} tendono ad 1. In tal caso F_{gr} è espresso solo in termini del primo fattore e quindi in termini di tensioni totali che, essendo legate alla turbolenza, sono idonee a rappresentare il fenomeno del trasporto in sospensione.

Per sedimenti grossolani $D_{gr} > 60$ il materiale è prevalentemente trasportato al fondo per cui la dinamica è essenzialmente governata dalla tensione effettiva ed il secondo fattore risulta dominante rispetto al primo. Infatti quest'ultimo tende a 1 in quanto l'esponente n tende a 0.

Nella zona di transizione entrambi i termini assumono importanza in funzione dell'esponente n .

Il trasporto solido totale in forma adimensionale, G_{gr} , risulta definito dalla seguente espressione:

$$G_{gr} = \left(\frac{u_*'}{U} \right)^n \frac{\gamma C_p h}{\gamma_s D_{35}} \quad 7$$

dove C_p è la concentrazione in peso dei sedimenti trasportati.

Il trasporto solido è messo quindi in funzione del parametro di mobilità F_{gr} secondo la funzione:

$$G_{gr} = K_t \left(F_{gr} / A - 1 \right)^m \quad 8$$

con:

$$m = 9.66 / D_g + 1.34 \quad 1 < D_{gr} < 60$$

$$m = 1.50 \quad D_{gr} > 60$$

e

$$\log(K_t) = 2.86 \log(D_{gr}) - (\log(D_{gr}))^2 - 3.53 \quad 1 < D_{gr} < 60$$

$$K_t = 0.025 \quad D_{gr} > 60$$

Tenendo conto di queste relazioni, dai valori di h , S e D_{35} vengono calcolati D_{gr} , A , n , m , e K_t . Calcolando poi la velocità media U , si calcola F_{gr} e G_{gr} dalla quale ricava la concentrazione in peso C_p ed il trasporto totale in peso riferito all'unità di larghezza:

$$q_t = C_p \gamma q$$

Il trasporto solido totale Q_t risulta il prodotto di q_t per la larghezza dell'alveo attivo.

La scala di deflusso delle portate solide

Per il trasporto solido si farà quindi riferimento alla stazione di Ponte d'Istia, proprio per la disponibilità dei dati presenti per questa sezione. La scala di deflusso delle portate solide rappresenta la relazione tra le portate liquide e le corrispondenti portate solide. I dati misurati alla stazione di Ponte d'Istia costituiscono un prezioso riferimento ma necessitano di essere estrapolati per consentire l'analisi in condizioni di portate liquide superiori a quelle misurate.

Per l'estrapolazione è stato fatto riferimento alla scala di deflusso delle portate liquide (Figura 17 e Figura 18), per mezzo della quale è possibile associare ad ogni portata liquida il corrispondente livello idrico.

Quindi, per ogni portata assegnata, e quindi per ogni livello idrico, la portata solida corrispondente è stata calcolata secondo la seguente procedura:

- suddivisione della sezione liquida in sottosezioni di calcolo, analogamente a quanto effettuato per le misure di campo, limitando il computo al solo alveo inciso all'interno del quale si ritiene preponderante il fenomeno del trasporto solido;

- calcolo, per ciascuna sottosezione, della corrispondente velocità media tramite il criterio di White-Paris-Bettess, e della parte di portata liquida in transito all'interno dell'alveo inciso;
- calcolo del trasporto solido su ciascuna sottosezione e, quindi, stima del trasporto solido complessivo su tutta la sezione, mediante il criterio di Ackers e White come modificato da Day e White (1984) per tener conto della non uniformità del materiale sulle condizioni di inizio del trasporto;
- definizione della scala di deflusso associando i valori del trasporto solido così ottenuti ai corrispondenti valori di portata liquida complessiva (alveo inciso e aree golenali).

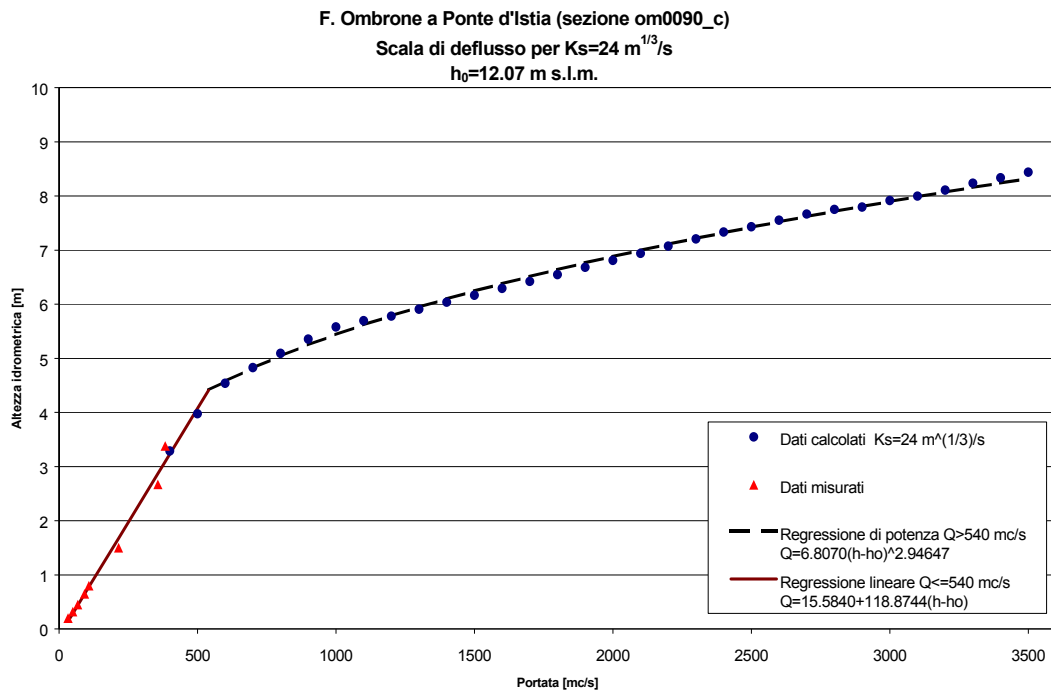


Figura 17 Scala di deflusso in termini di altezza idrometrica [29]

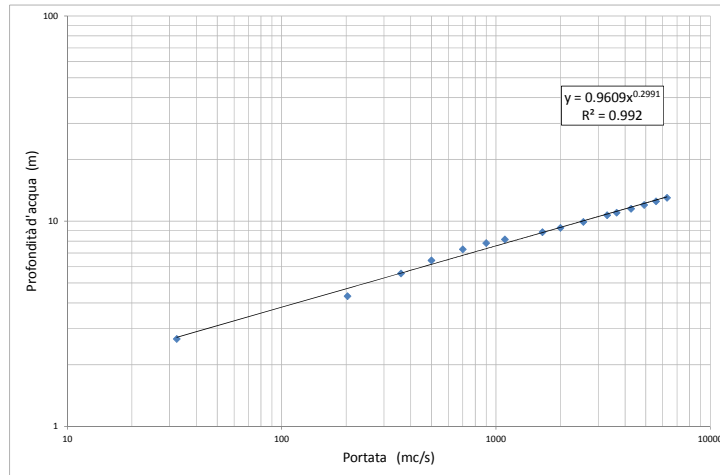


Figura 18 Scala di deflusso del F. Ombrone a Ponte d'Istia in termini di profondità d'acqua [29]

Sulla base delle procedura descritta è stata ottenuta la scala di deflusso della portata solida per il materiale d'alveo come mostrato nella Figura 19 [10].

Come già richiamato, la stima della portata solida effettuata con il criterio di Ackers e White si riferisce al valore totale del materiale trasportato, sia al fondo sia in sospensione.

Tuttavia, come prima richiamato, la componente del materiale d'alveo trasportata in sospensione è alquanto modesta, proprio per la scarsità del materiale più fine presente al fondo.

Viceversa, la quantità solida trasportata in sospensione comprendente tutte le componenti, anche quelle non presenti al fondo con granulometrie inferiori a $60 \mu\text{m}$, è molto elevata e preponderante rispetto a quella computata con la formula di Ackers e White.

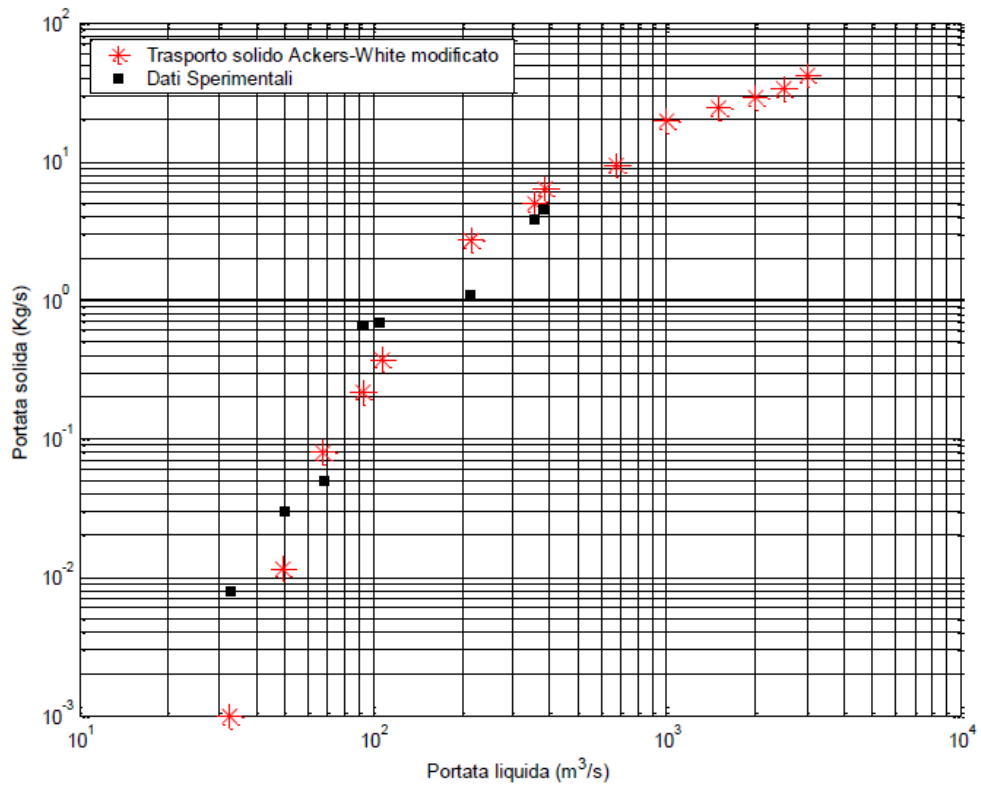


Figura 62: Scala di deflusso delle portate solide (materiale d'alveo) del fiume Ombrone a Ponte d'Istia, scala logaritmica;

Figura 19 F. Ombrone a Ponte d'Istia: Scala di deflusso delle portate solide per il materiale d'alveo [10].

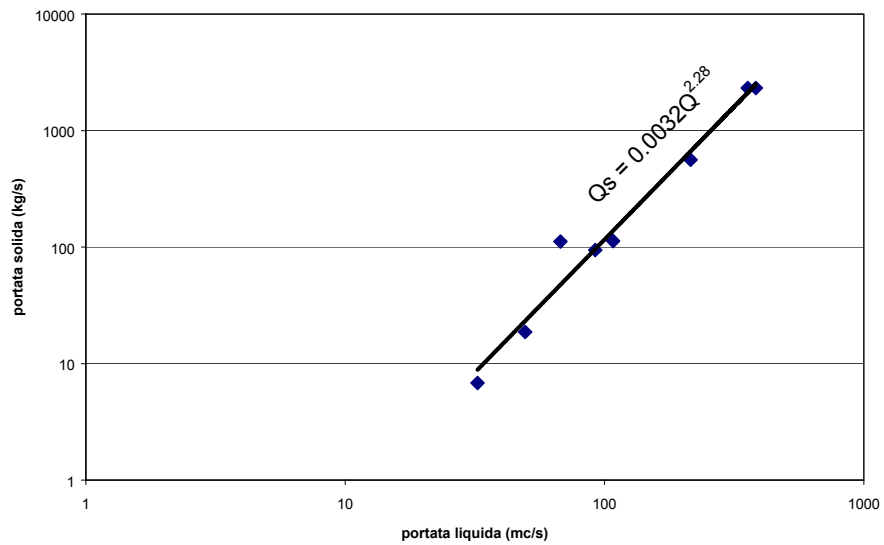


Figura 20 Correlazione portate solide in sospensione – portate liquide a Ponte d'Istia

Dall'analisi dei dati sopra riportati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- il materiale dell'alveo è costituito prevalentemente da materiale ghiaioso fino a pochi chilometri dalla foce. La percentuale media in sabbia è dell'ordine del 15-20% e si mobilita per portate superiori a circa 50 mc/s (sezione di Ponte d'Istia) con valori di trasporto solido comunque inferiori ai 5 kg/s per eventi di piena contenuti nell'alveo inciso (portate liquide dell'ordine di 400 mc/s);
- le portate solide in sospensione osservate sono molto più elevate ma non contengono, almeno per gli eventi considerati, frazioni significative di materiale sabbioso e pertanto non contribuiscono al ripascimento del litorale.

2.3 Il confronto tra il rilievo 1970 e il rilievo 2000

Nello studio [29] è stato effettuato il confronto tra i profili longitudinali del fiume Ombrone relativi ai rilievi del 1970 e del 2000, per il tratto compreso tra Buonconvento fino alla foce, di lunghezza pari a circa 116 km.

I risultati in termini di variazioni altimetriche del thalweg si possono sintetizzare come segue:

- *Tratto tra il ponte ferroviario di Buonconvento e il ponte ferroviario Monte Antico-Buoncovento a Mattioni:* il tratto risulta mediamente stabile con una tendenza al deposito evidente soprattutto nella parte di valle. I fenomeni erosivi più evidenti risultano presenti subito a valle del ponte ferroviario di Bibbiano con profondità massima di erosione dell'ordine del metro che si estendono per circa 2 Km.
- *Tratto tra il ponte ferroviario a Mattioni e il ponte ferroviario Monte Antico-Buoncovento:* anche tale tratto, pur manifestando una pendenza sensibilmente superiore a quella precedente, risulta mediamente stabile con alternanze pressoché equivalenti di zone di deposito e di erosione.

- *Tratto dal ferroviario Monte Antico-Buoncovento fino al ponte a Sasso d'Ombrone*: tale tratto con pendenza media analoga a quella del tratto precedente mostra viceversa una tendenza erosiva che mediamente è quantificabile in abbassamento del thalweg dell'ordine di 0.5 m.
- *Tratto tra il ponte a Sasso d'Ombrone e il ponte di Campagnatico*: in tale tratto si verifica una erosione piuttosto marcata subito a valle del ponte che si estende per circa 3 Km e raggiunge valori massimi di abbassamento del fondo dell'ordine di 2 m. Segue un tratto di deposito che si estende per circa 4 Km e successivamente il fondo appare stabile fino a circa 3 Km a monte del ponte di Campagnatico ove segue un tratto nuovamente in erosione per una profondità di circa 1 m fino al ponte.
- *Tratto dal ponte di Campagnatico fino alla traversa della Steccaia*: in tale tratto si verifica nella parte iniziale una zona di erosione subito a valle del ponte di Campagnatico che raggiunge profondità dell'ordine di 2 m, seguita da un tratto in deposito fino alla passerella dell'acquedotto del Fiora. L'entità del deposito è praticamente confrontabile con quella di erosione. A valle della passerella e per circa 4 Km il fondo appare mediamente in equilibrio, mentre il rimanente tratto fino a ponte d'Istia (lunghezza circa 10 Km) appare in erosione con abbassamento medio dell'ordine del metro. Il tratto compreso tra ponte d'Istia e la traversa della Steccaia appare sostanzialmente in equilibrio.
- *Tratto dalla traversa della Steccaia al ponte della ferrovia Grosseto-Roma*: mediamente il tratto si trova in una condizione di sostanziale equilibrio.
- *Tratto dal ponte della ferrovia Grosseto-Roma alla foce*: il tratto risulta in condizioni di erosione praticamente fino alla foce con abbassamenti particolarmente evidenti nella parte centrale del tratto che raggiungono punte dell'ordine di 3 m (sezione OM0009__).

Per quanto riguarda le variazioni planimetriche, analizzate mettendo a confronto i profili trasversali delle sezioni, si evidenzia quanto segue:

- si notano spostamenti più o meno sensibili di alcune sezioni in generale ubicate in tratti curvilinei. In particolare, tale fenomeno è evidente a valle della traversa della Steccaia, ove si verificano traslazioni che raggiungono anche i 15 metri rispetto alla sezione rilevata nel 1971 (es. sezioni OM0005, OM0009, OM0020, OM0037, OM0071).
- Uno spostamento di circa 300 metri appare nella sezione OM0128. Ciò è probabilmente dovuto o ad un errore di posizionamento planimetrico di uno dei due rilievi, oppure ad un'effettiva traslazione della sezione in quanto, anche la sezione a monte (OM131) ha subito uno spostamento di circa 60 metri.
- Nel tratto intermedio, compreso tra la confluenza con il t. Trasubbie e la confluenza con il fiume Merse, non si evidenziano sensibili variazioni planimetriche.
- Il tratto a monte della confluenza con il f. Merse si hanno spostamenti sia in sponda destra che sinistra contenuti nell'ordine dei 10 metri e generalmente ubicati in tratti curvilinei.

Per quanto riguarda le variazioni del fondo rilevate durante gli eventi monitorati, si osserva che rispetto al profilo della sezione rilevata topograficamente, i profili del fondo risultano variabili in funzione della portata in transito (Figura 21). E' evidente il fenomeno del trasporto solido e della movimentazione del fondo, probabilmente associata alla presenza di dune che, oltre ad influenzare la geometria, induce variazioni anche rilevanti nel coefficiente di resistenza.

F. Ombrone a Ponte d'Istia: profilo del fondo rilevato con rilievo topografico a confronto con i profili rilevati durante gli eventi nel periodo 1998-2000 (solo sezione alveo inciso)

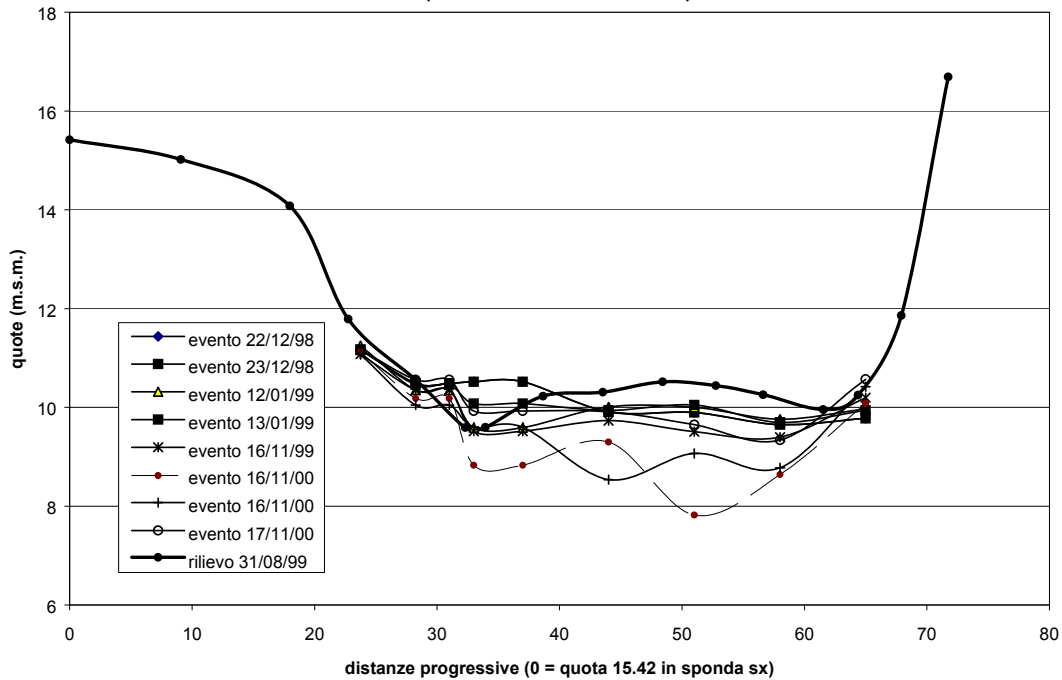


Figura 21 F. Ombrone: evoluzione del fondo a Ponte d'Istia

In sintesi si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il confronto tra i rilievi topografici 1970 e 2000 mostra una generale tendenza dell'alveo all'erosione, anche se l'entità delle variazioni riscontrate risulta in diversi tratti di natura fisiologica, rientrando cioè nella normale dinamica di un corso d'acqua e non particolarmente significative di specifiche tendenze evolutive;
- La linea di riva in prossimità della foce risulta soggetta ad un'accelerata erosione in particolare a partire dagli anni sessanta. Ciò può essere attribuita a variazioni del regime meteo marino e/o a variazioni degli apporti solidi da parte del fiume Ombrone. In quest'ultimo caso, i fattori che possono aver influito sulla riduzione dell'apporto solido comprendono le attività di bonifica, cessate negli anni '50, le estrazioni di inerti, iniziate nel dopoguerra e terminate negli anni '80, le variazioni di uso del suolo già richiamate a causa delle quali si è verificato un progressivo abbandono di terreni coltivati.

- attualmente, il profilo longitudinale del fiume Ombrone è in una fase di erosione generalizzata quantificabile mediamente nell'ordine del metro rispetto al profilo rilevato negli anni '70. Il tratto a valle della traversa della Steccaia sembra mostrare il fenomeno erosivo più intenso.
- per quanto attiene alle variazioni planimetriche, si osservano fenomeni di tipo essenzialmente localizzato e imputabili presumibilmente a condizioni di instabilità delle sponde indotte, per quanto è possibile dedurre dai dati disponibili, dalla naturale dinamica del corso d'acqua soprattutto in presenza di tratti curvilinei;
- le variazioni altimetriche a scala di evento nella sezione di Ponte d'Istia, come risultano dai dati raccolti nel presente lavoro, appaiono piuttosto significative anche per portate non eccezionali. Esse sono molto probabilmente da imputarsi alla dinamica del trasporto al fondo, costituito per i rilievi effettuati in prevalenza da sabbia, che pertanto sembrerebbe manifestarsi sotto forma di avanzamento dunale.

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

**ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA**

Attività “ C “

Relazione Intermedia

Modellazione idraulica a fondo mobile

Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano

BILANCI SEDIMENTOLOGICI

Gruppo di Lavoro:

Lorenzo Minatti (Referente CERAFRI), Enio Paris (referente UNIFI),

Luca Solari, Pina De Cicco, Laura Boschi (UNIFI),

Beatrice Mengoni, Sofia Morandi (RT)

Firenze, agosto 2013

3. DINAMICA FLUVIALE: GLI STRUMENTI DI INDAGINE

Ai fini dello studio della dinamica fluviale, il tratto considerato del Fiume Ombrone Grossetano è compreso tra la stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone e la foce, per una lunghezza complessiva di 63 km. I principali affluenti in tale tratto sono il T. Gretano, il T. Melacce e il T. Trasubbie.

L'intervallo temporale inizia dal 1926 fino al 2012. Nonostante le grandi trasformazioni che il corso d'acqua ha subito a partire sin dalla fine del XVII secolo, quali la costruzione della traversa della Steccaia e del diversivo per la bonifica a colmata della Maremma, oppure le variazioni di uso del suolo tra il XIX e il XX secolo, si ritiene utile fissare l'attenzione sul periodo recente per la disponibilità di dati certi pur tenendo conto degli studi e dei risultati ottenuti per i periodi antecedenti.

All'interno del periodo considerato occorre fare le seguenti considerazioni:

- Le attività di bonifica mediante derivazione delle portate di piena attraverso il diversivo d'Ombrone si sono concluse intorno al 1950;
- Pochi anni dopo iniziava la fase di estrazione di inerti dagli alvei fluviali, attività diffusa un po' dappertutto sul territorio nazionale, che è proseguita fino agli anni '80.
- Gran parte delle variazioni dell'uso del suolo devono essere avvenute nei primi decenni del dopoguerra.

E' parso pertanto opportuno dividere l'intero periodo in due sottoperiodi, uno compreso tra il 1926 e il 1970, l'altro tra il 1970 e il 2012. Come già descritto, nel 1970 è stato completato il rilievo delle sezioni fluviali del Fiume Ombrone da parte de Servizio Idrografico [19] [20] e nel 2000 è stato effettuato un secondo rilievo da parte della Regione Toscana [31].

La dinamica evolutiva del fiume Ombrone viene analizzata attraverso due distinti approcci:

- **la costruzione del bilancio sedimentologico** su scala medio annua, finalizzato alla individuazione delle tendenze evolutive dell'alveo. A tal

fine il tratto di corso d'acqua considerato sarà suddiviso in tratti omogenei significativi per ognuno dei quali verrà computato il trasporto solido medio annuo ottenuto dalla convoluzione della capacità di trasporto solido del tratto e la curva di durata corrispondente. L'analisi fornisce indicazioni sulle tendenze evolutive a scala temporale breve-media.

- **Implementazione di un modello in moto vario a fondo mobile:** il modello si basa sulle equazioni di De Saint Venant per la fase liquida, l'equazione della capacità di trasporto e l'equazione di Exner per la fase solida. Il modello è utilizzato per l'analisi morfodinamica del corso d'acqua alla scala dell'evento di piena.

Ai fini del rischio idraulico e della corretta gestione dei sedimenti fluviali appare necessario applicare in forma congiunta il modello di bilancio sedimentologico e la verifica in moto vario a fondo mobile. Il primo modello fornisce indicazioni sulle tendenze evolutive del corso d'acqua su scala temporale medio-lunga mentre il secondo evidenzia il comportamento dell'alveo alla scala dell'evento di piena. La sovrapposizione dei risultati forniti dai due modelli consente le seguenti analisi: ove il corso d'acqua manifesti tendenze al deposito e in questi stessi tratti il modello di moto vario non evidenzia condizioni di rischio idraulico per la portata di piena prefissata, non appare necessario alcun intervento. In caso contrario, occorre prevedere un piano di rimodellamento del materiale depositato tenendo eventualmente conto dei tratti in erosione che potrebbero accogliere tale materiale. In generale, i tratti in erosione devono essere considerati ai fini del rischio da dinamica d'alveo connesso alla stabilità delle strutture.

L'applicazione separata dei modelli suddetti fornisce, attraverso il bilancio sedimentologico, l'inquadramento delle tendenze evolutive del corso d'acqua, mentre attraverso il modello in moto vario a fondo mobile la verifica idraulica per un prefissato evento di piena.

Di seguito si fornisce la descrizione degli strumenti utilizzati.

3.1 Il bilancio sedimentologico

3.1.1 Aspetti concettuali

Gli alvei dei corsi d'acqua naturali sono soggetti a evoluzioni plano-altimetriche indotte dai fenomeni di erosione o deposito di tipo esteso, coinvolgenti cioè lunghi tratti del corso d'acqua. Come noto, tali processi possono essere originati da variazioni della capacità di trasporto solido e/o da variazioni nel regime del trasporto solido. Una volta innescati e permanendo le condizioni che li hanno generati, tali processi si estendono nel tempo fino ad esaurirsi grazie al meccanismo di auto-modellamento dell'alveo che tende a ristabilire una condizione di equilibrio.

Il bilancio sedimentologico non consente la simulazione della dinamica evolutiva nel tempo, bensì fornisce l'assetto del corso d'acqua e le sue tendenze evolutive sulla base della situazione attuale analizzata mediante il confronto tra le capacità di trasporto solido calcolate per i diversi tratti significativi nei quali risulta diviso il corso d'acqua.

Infatti, si può ritenere che un tratto fluviale abbia un assetto più o meno stabile se sussiste un continuo bilanciamento tra capacità di trasporto e portata solida in arrivo al tratto stesso.

Ciò può essere espresso dall'equazione di continuità al fondo che in forma differenziale si scrive:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} (1 - e) = \pm q_s \quad 9$$

ove Q_s [mc/s] è la capacità di trasporto solido, B la larghezza dell'alveo attivo [m], z la quota del thalweg [m], e [-] la porosità del materiale d'alveo, q_s [mc/s.m] è il contributo laterale del trasporto solido, positivo se entrante, negativo se uscente.

Applicando la $\frac{\partial Q_s}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} (1 - e) = \pm q_s$ 9 ad un tratto di lunghezza Δx e integrando su un intervallo di tempo Δt si ottiene l'equazione:

$$\Delta z = (Q2 - Q1) \frac{\Delta t}{B \Delta x} \quad 10$$

dove Δz rappresenta la variazione altimetrica subita dal tratto di lunghezza Δx durante l'intervallo di tempo Δt , per effetto dello squilibrio tra la portata solida in uscita dal tratto, $Q2$, e la portata solida in arrivo, $Q1$.

Occorre a questo punto specificare meglio il concetto. Con riferimento alla Figura 22, per portata solida in arrivo al tratto i -esimo considerato si intende la somma di quella in uscita dal tratto precedente, $Q2_{i-1}$, e di quella eventualmente presente come contributo laterale del tratto, $q_{si} \Delta x$; quindi:

$$Q1_i = Q2_{i-1} + q_{si} \cdot \Delta x \quad 11$$

La portata in uscita dallo stesso tratto, $Q2_i$, si identifica con la capacità di trasporto solido CTS, cioè $Q2_i = CTS$, avendo assunto che questa risulti sempre saturata all'interno del tratto.

Ipotizzando nulli gli apporti solidi laterali, $q_{si} = 0$, La
$$\Delta z = (Q2 - Q1) \frac{\Delta t}{B \Delta x}$$

10 può quindi essere riscritta per il generico tratto i -esimo nella forma seguente:

$$(\Delta z B)_i \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta V_i}{\Delta t} = Q1 - Q2 = Q2_{i-1} - CTS_i \quad 12$$

dove ΔV_i indica il volume, eroso o depositato, nell'intervallo Δt .

L'equazione di bilancio nella forma della

$$(\Delta z B)_i \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\Delta V_i}{\Delta t} = Q1 - Q2 = Q2_{i-1} - CTS_i \quad 12 \quad \text{si presta ad una}$$

interpretazione immediata della dinamica dell'alveo: quando la portata solida in ingresso al tratto fluviale, $Q1 = Q2_{i-1}$, uguaglia la capacità di trasporto solido del tratto, CTS_i , non si hanno variazioni altimetriche ($\Delta z = 0$) e l'alveo è in condizioni di equilibrio.

Quando si verifica $Q1 = Q2_{i-1} > CTS_i$ si ha il fenomeno del deposito ($\Delta z > 0$), mentre se $Q1 = Q2_{i-1} < CTS_i$ si ha il fenomeno dell'erosione ($\Delta z < 0$).

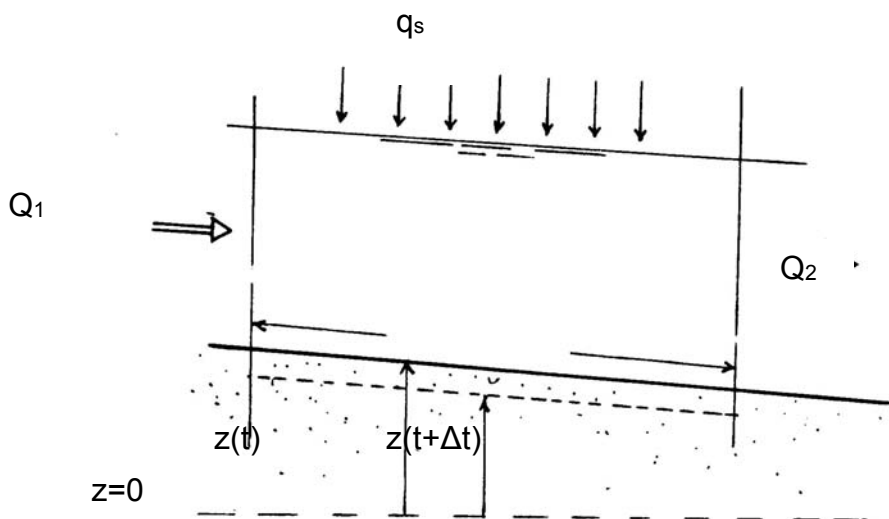


Figura 22 Bilancio sedimentologico per un generico tratto fluviale.

3.1.2 Individuazione dei tratti significativi

Ai fini della stima del bilancio sedimentologico il tratto di interesse del Fiume Ombrone, sulla base dei risultati emersi nello studio sopracitato [29], è stato suddiviso in sottotratti che presentano caratteristiche morfologiche (larghezza della sezione, pendenza, assetto planimetrico) e sedimentologiche (granulometria del materiale d'alveo) tali da potersi considerare mediamente uniformi.

In particolare nella suddivisione in sottotratti è stata posta l'attenzione, oltre che sulle caratteristiche suddette, anche sulla presenza di:

- variazioni di pendenza del fondo localizzate (salti in roccia, briglie);
- opere in alveo (ponti, traverse);
- immissioni di affluenti.

Nella Tabella 9, Tabella 10, Tabella 11, si riporta la sintesi delle caratteristiche morfologiche e sedimentologiche analizzate per i diversi sottotratti dedotte dai risultati dello studio [29].

Tabella 9 Caratteristiche morfologiche e geometriche dei sottotratti individuati per il Fiume Ombrone.

Sottotratto 2013	Località	Sez. Rilievo 2000	Lunghezza tratto [m]	Andamento planimetrico	Pendenza media tratto
1	Sasso d'Ombrone	OM0216 – OM0203	3868.60	rettilineo	0.0019
2	Paganico	OM0203 – OM0173	10947.40	rettilineo/ meandriforme	0.0013
3	Campagnatico- Pianetti	OM0173 – OM0153	5142.40	meandriforme	0.0015
4	S.Antonio	OM0153 – OM0123	7203.50	rettilineo/ meandriforme	0.0009
5	Arcille	OM0123 – OM0099	8410.20	meandriforme	0.0011
6	Istia d'Ombrone	OM0099 – OM0053	11951.70	rettilineo/ meandriforme	0.0007
7	Santa Maria di Rispecchia	OM0053 – OM0009	13566.20	meandriforme	0.0006
8	Spergolaia	OM0009 – OM00002	4680.30	meandriforme	0.0004
9	Bocca d'Ombrone	OM00002 – OM00009	4783.90	rettilineo	0.00000836

Tabella 10 Caratteristiche sedimentologiche dei sottotratti individuati per il Fiume Ombrone.

Sottotratto 2013	Rilievo sed. 1998	Tipologia rilievo sed. 1998 *	D₁₆ [mm]	D₃₅ [mm]	D₅₀ [mm]	D₈₄ [mm]
1	OMB 6	S-V	12.3	35.8	60.8	113.5
2	OMB 7	S-V	21.4	67.3	92.9	154.8
3	OMB 8	S-V	14.2	42.8	64.0	114.2
4	OMB 9	S-V	2.5	19.5	42.2	104.8
5	OMB 10	S-V	17.3	51.8	73.8	115.4
6	OMB 11	S	2.9	9.6	16.5	51.7
	OMB 12	S	2.7	7.3	11.4	23.6
7	OMB 13	S	0.65	8.60	17.27	41.10

Sottotratto 2013	Rilievo sed. 1998	Tipologia rilievo sed. 1998 *	D ₁₆ [mm]	D ₃₅ [mm]	D ₅₀ [mm]	D ₈₄ [mm]
8	-	-	-	-	-	-
9	OMB 14	S	0.55	0.74	0.92	2.38
* S = campionamento superficiale						
V = campionamento volumetrico						

Tabella 11 Affluenti, opere idrauliche e salti di fondo nei sottotratti individuati per il Fiume Ombrone.

Sottotratto 2013	Affluenti	Opere	Salto di fondo
1	-	Ponte di Sasso d'Ombrone (SP 7)	-
2	T. Gretano	-	-
3	T. Melacce	Ponte di Campagnatico (SP 18)	-
4	-	Passerella Acquedotto del Fiora	-
5	T. Trasubbie	-	-
6	T. Maiano	Ponte a Istia d'Ombrone (SP 322) Traversa de La Steccaia Passerella Acquedotto Comunale di Grosseto	-
7	-	Ponte SS 1 (Via Aurelia) Ponte FS Pisa-Roma	2
8	-	-	-
9	-	-	-

3.1.3 Caratterizzazione sedimentologica di ciascun tratto

Per la determinazione del bilancio sedimentologico sono stati utilizzati i dati provenienti dalla campagna di rilievi sedimentologici del 1998 [31] per i computi relativi sia al periodo 1926-1970 sia al periodo 1970-2012. Tali dati sono già stati richiamati nella Tabella 10.

Tale scelta deriva dal ritenere più rappresentativi per il periodo 1970-2012 i rilievi effettuati nel 1998. Poiché non si hanno dati per il periodo 1926-1970, si è ritenuto opportuno attribuire anche a questo periodo le stesse caratteristiche granulometriche.

I dati recenti, acquisiti nella campagna di misura svolta nell'ambito del presente studio, verranno utilizzati per dedurre dal confronto con i rilievi precedenti elementi di conferma o meno dei risultati ottenuti.

3.1.4 Le curve di durata delle portate liquide per ciascun tratto

Disponendo per il periodo 1926-1970 e per il periodo 1970-2012 dei dati di portata media giornaliera della sola stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone si è reso necessario per i tratti più a valle ricavare i valori medi scalando i dati a disposizione per Sasso d'Ombrone mediante un opportuno coefficiente.

Considerando le sezioni idrologiche disponibili nel codice Alto e collocate all'interno di alcuni dei sottotratti a valle di Sasso d'Ombrone, è stato ricavato tale coefficiente come rapporto tra l'area del bacino sottesa alla sezione del codice e l'area sottesa alla stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone. Nella Tabella 12 si riporta il valore assunto dal coefficiente nei tratti.

Tabella 12 Coefficienti di ragguglio delle aree sottese dai tratti significativi.

Sottotratto n.	$A_{\text{sez. Alto}}/A_{\text{Sasso d'Ombrone}}$
3	1.02
4	1.062
5	1.088
7-8-9	1.227

Per ciascun tratto si riporta di seguito la curva di durata delle portate liquide.

Curve di durata per ciascun sottotratto per il periodo 1926-1970

Per il periodo 1926-1970 le curve di durata delle portate liquide al colmo in alcuni dei sottotratti a valle del primo sono state ottenute secondo i seguenti criteri:

- Calcolo delle portate di piena con il codice Alto per i tempi di ritorno di 2, 5, 10, 20, 100, 200, 500 anni corrispondenti alle durate in giorni/anno di 0.002, 0.005, 0.01, 0.02, alle diverse sezioni di calcolo disponibili nel codice stesso collocate in alcuni dei sottotratti.
- Trasformazione dei dati di portata al colmo forniti da Alto in dati medi giornalieri mediante divisione per il coefficiente K_c (v. par. 2.1).
- Calcolo dei valori di portata media giornaliera per le durate di 1, 10, 91, 182, 274 e 355 giorni/anno moltiplicando i valori medi giornalieri delle portate di ugual durata disponibili alla stazione di Sasso d'Ombrone per i coefficienti di ragguglio delle aree (Tabella 12).
- Determinazione della funzione di Gibrat mediante il calcolo dei tre parametri, stimati mediante l'ottimizzazione della correlazione lineare nel diagramma z-log (Q-Q₀).
- Calcolo dei valori medi giornalieri di portata per le durate mancanti di 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 30, 60, 135 giorni/anno mediante la funzione di Gibrat.
- Conversione dei valori medi giornalieri di portata in valori al colmo mediante moltiplicazione per il coefficiente K_c .

Nelle Figura 23Figura 30 si riporta la rappresentazione della correlazione tra z e $\log(Q-Q_0)$ per la stima dei parametri della funzione di Gibrat e la curva di durata delle portate medie giornaliere calcolate mediante i criteri appena esposti per i sottotratti n. 3, 4, 5, 7-8-9, collocati a valle del sottotratto n. 1 (comprendente Sasso d'Ombrone).

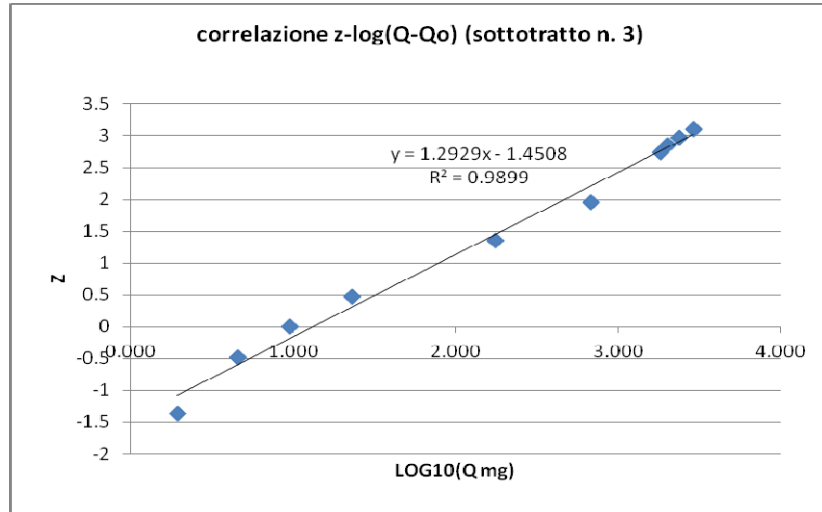


Figura 23 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 3).

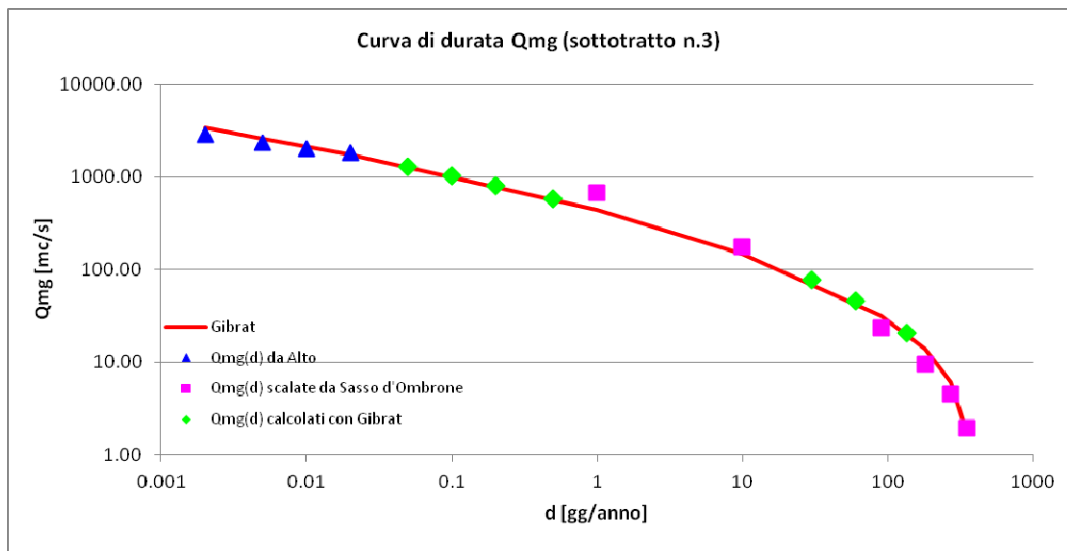


Figura 24 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 3)

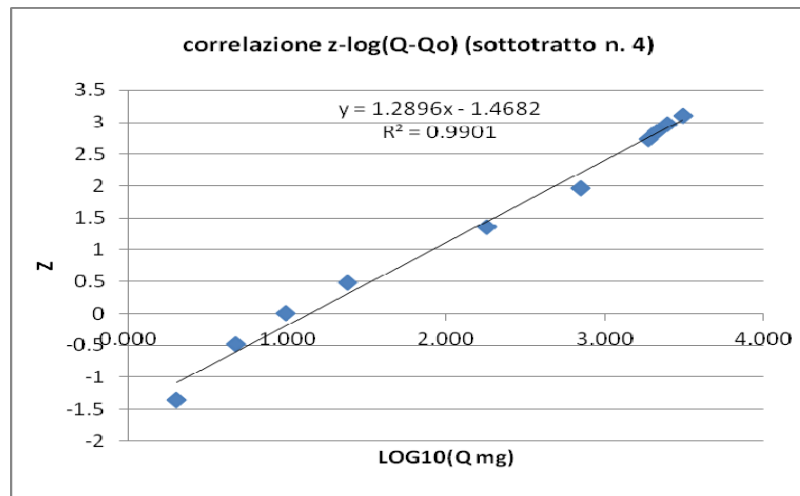


Figura 25 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 4).

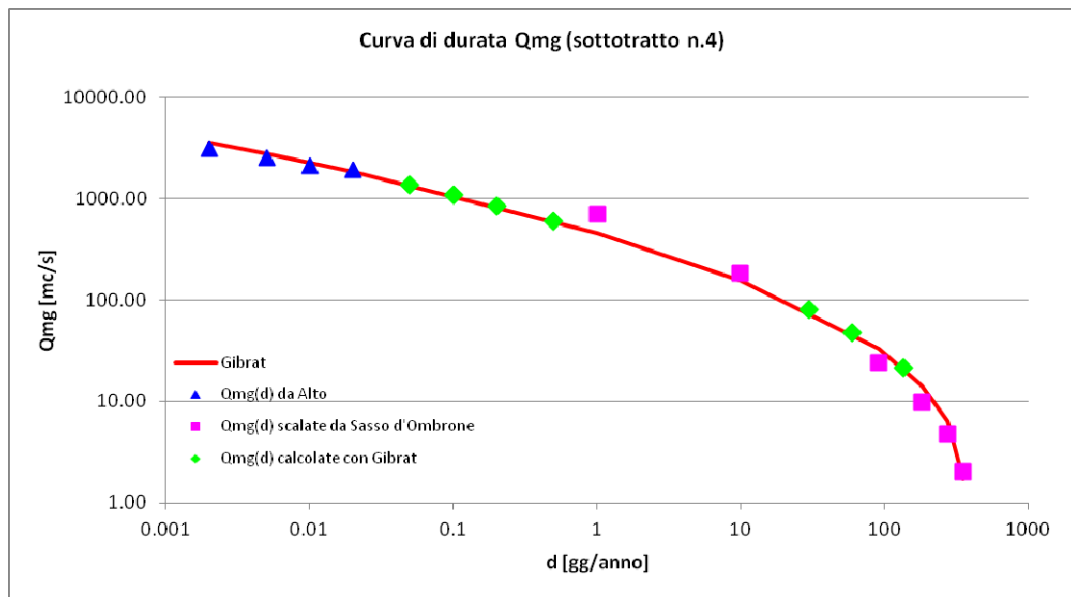


Figura 26 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 4).

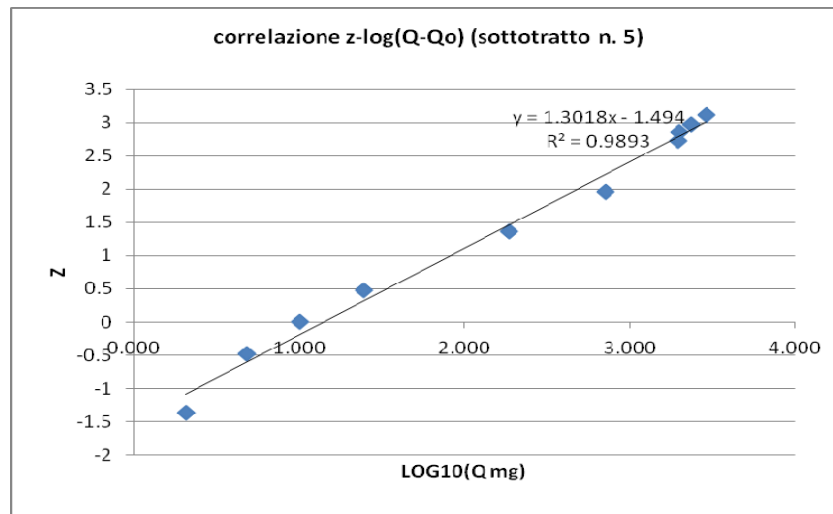


Figura 27 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 5).

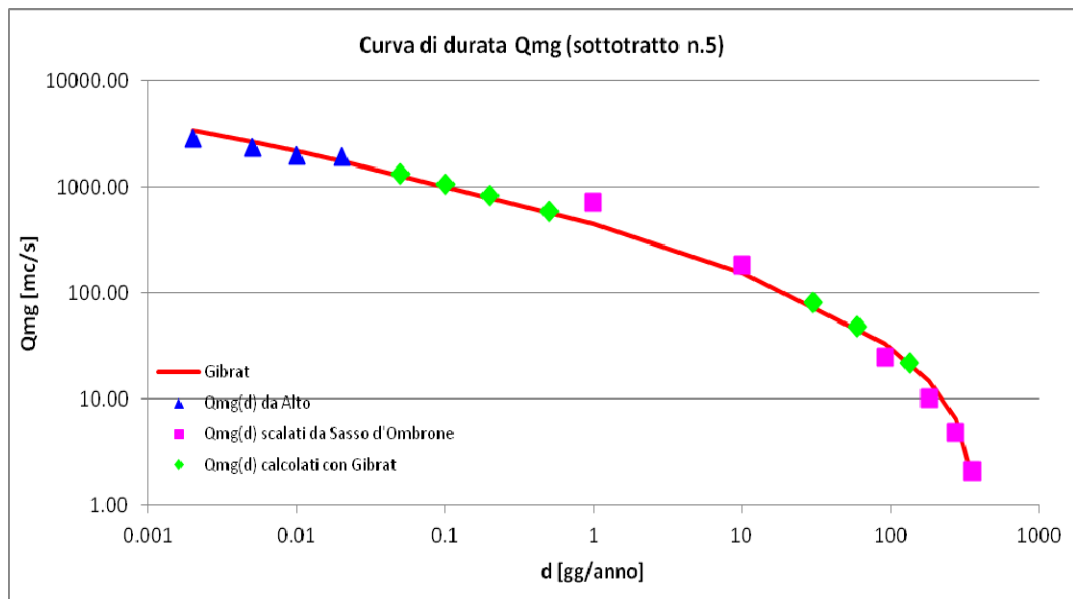


Figura 28 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 5).

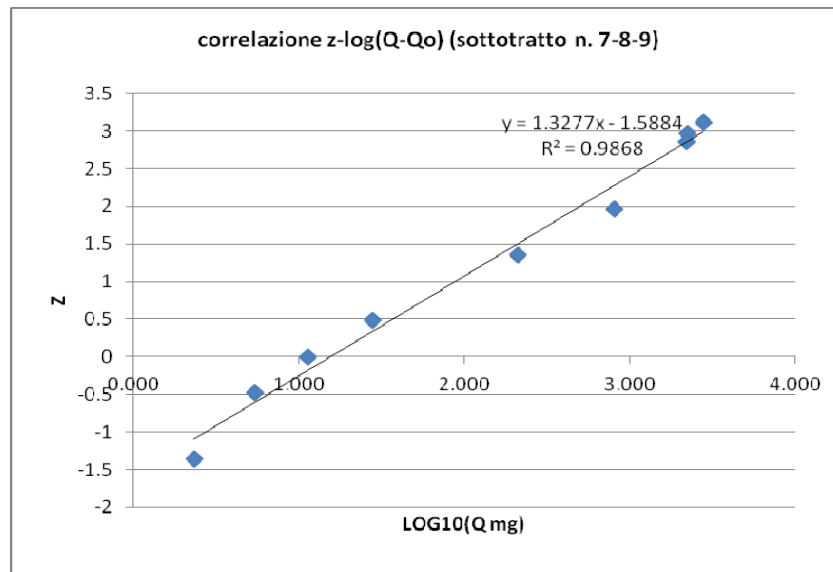


Figura 29 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 7-8-9).

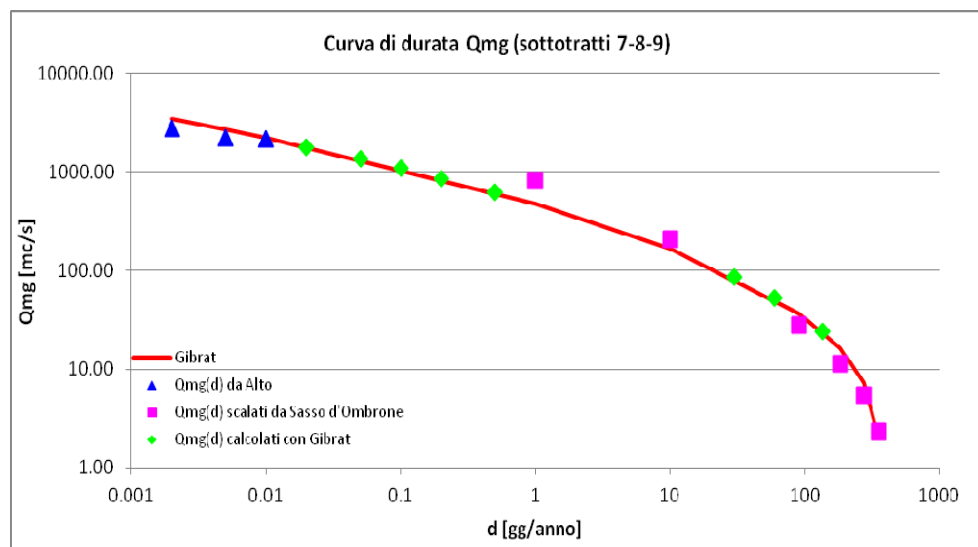


Figura 30 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratti n. 7-8-9).

Per i sottotratti n. 2 e n. 6 le curve di durata sono state elaborate mediante interpolazione lineare dei valori di portata al colmo calcolati negli altri sottotratti per le diverse durate, in funzione della distanza della sezione scelta come rappresentativa del sottotratti n. 2 e n. 6 dalla sezione di monte del tratto fluviale di interesse del Fiume Ombrone. Mediante divisione per il coefficiente Kc si sono poi ottenuti i valori di portata media giornaliera. Nella Figura 31 e Figura

32 sono riportati i punti della curva di durata ottenuti da interpolazione lineare rispettivamente per il sottotratto n. 2 e per il sottotratto n. 6.

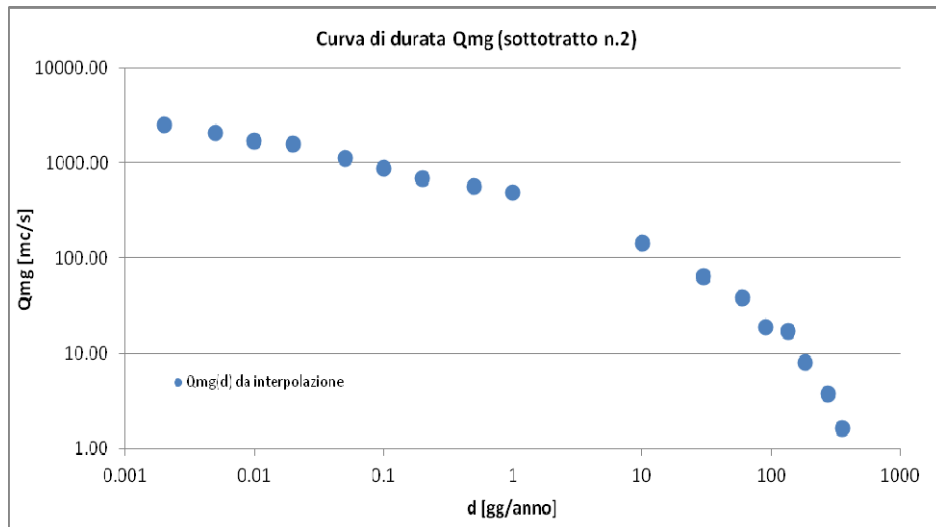


Figura 31 Punti della curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 2).

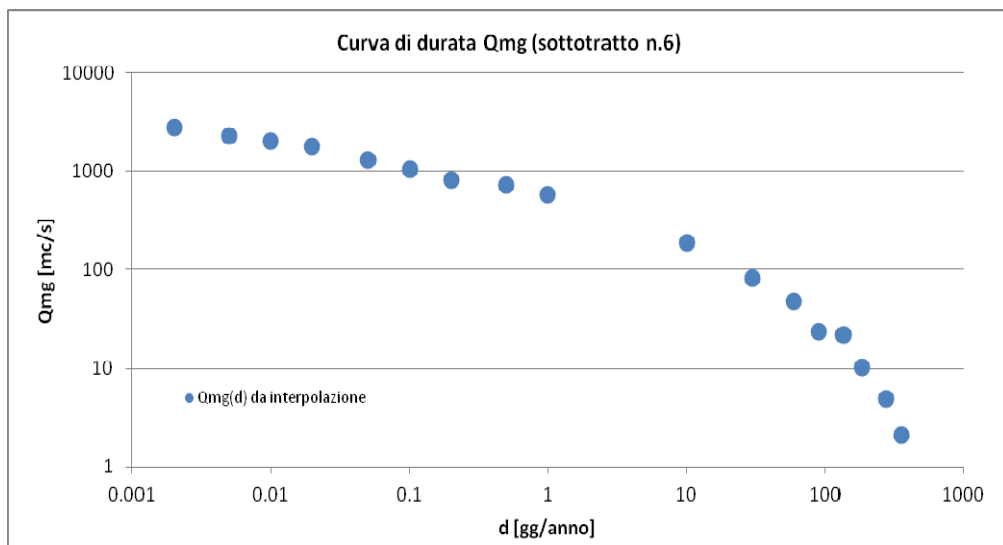


Figura 32 Punti della curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 6).

Curve di durata per ciascun sottotratto per il periodo 1970-2012

Seguendo gli stessi criteri descritti per il periodo 1926-1970, sono state calcolate le curve di durata delle portate medie giornaliere per i sottotratti a valle del primo (comprendente la stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone) per il periodo 1970-2012. In particolare, come per il periodo ante 1970, si sono

calcolate le curve di durata nei sottotratti n. 3, n. 4, n. 5 e n.7-8-9 e, successivamente, trovati per interpolazione lineare i punti della curva di durata per i sottotratti n. 2 e n.6. Si riportano nelle Figura 33Figura 42 i grafici relativi alla correlazioni $z\text{-log}(Q\text{-}Q_0)$ e le curve di durata ottenute per i diversi sottotratti.

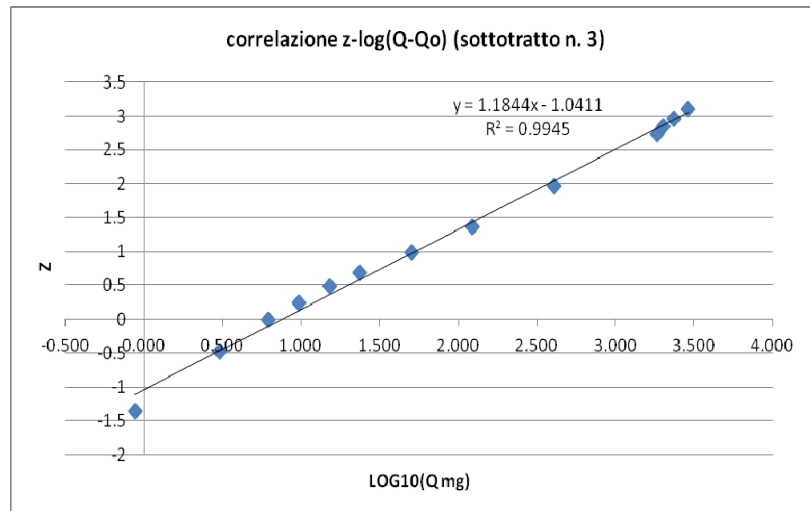


Figura 33 Correlazione $z\text{-log}(Q\text{-}Q_0)$ (sottotratto n. 3).

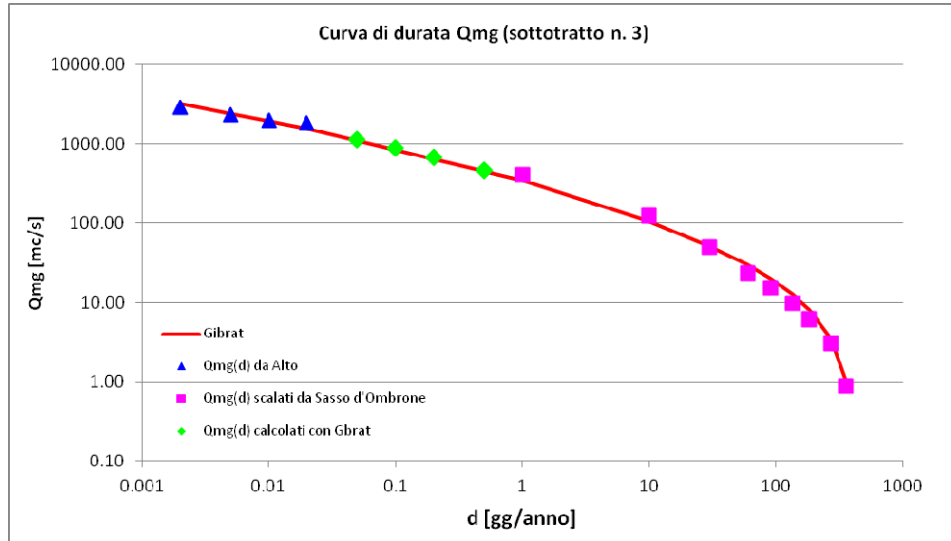


Figura 34 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 3).

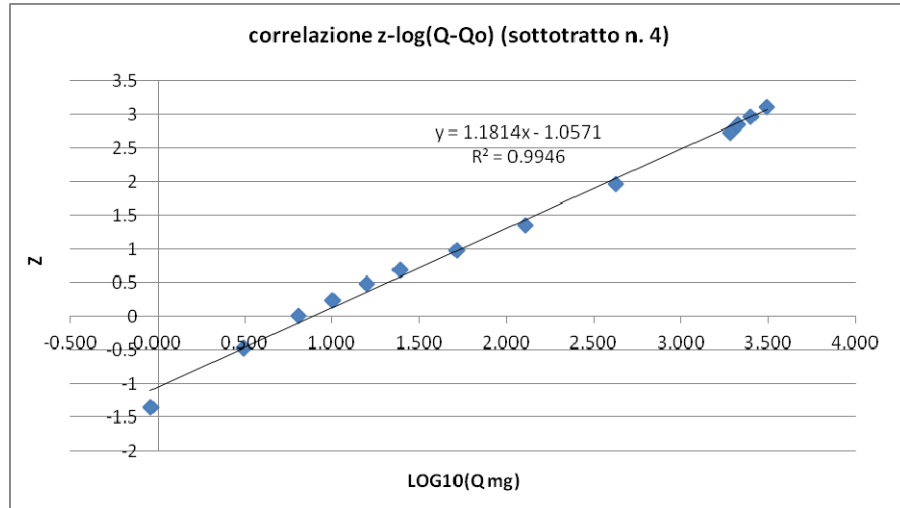


Figura 35 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 4).

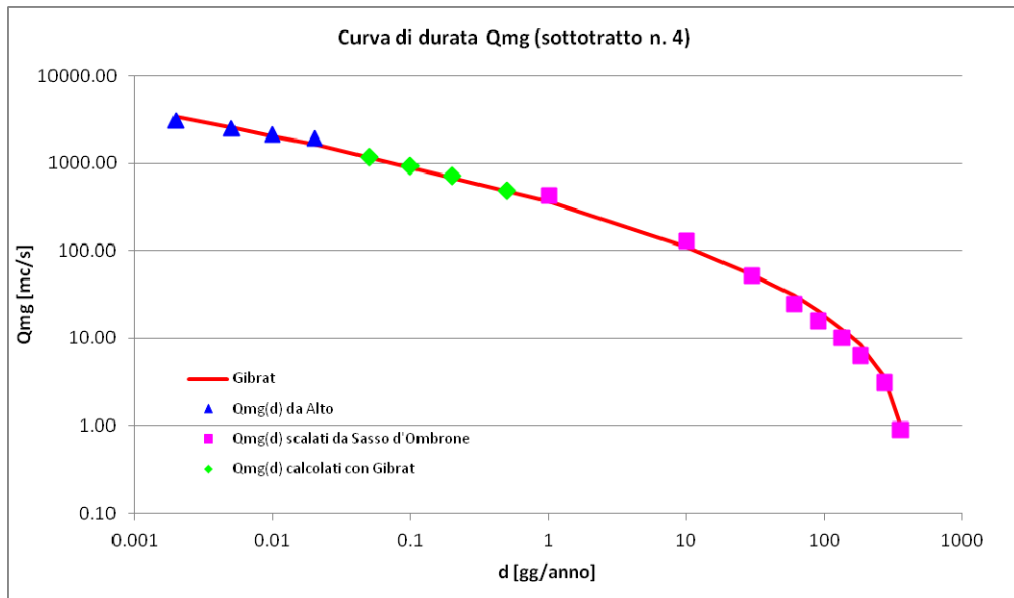


Figura 36 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 4).

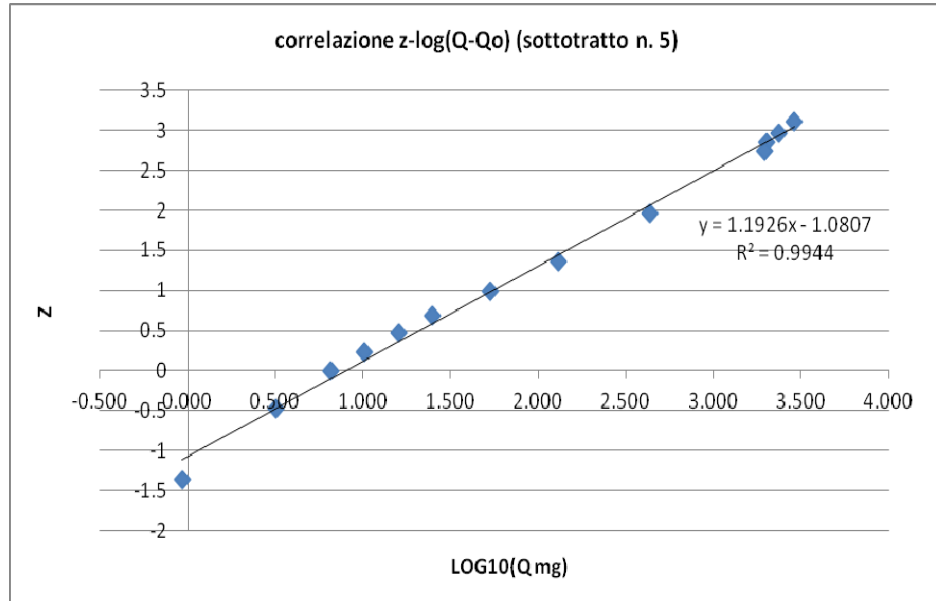


Figura 37 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 5).

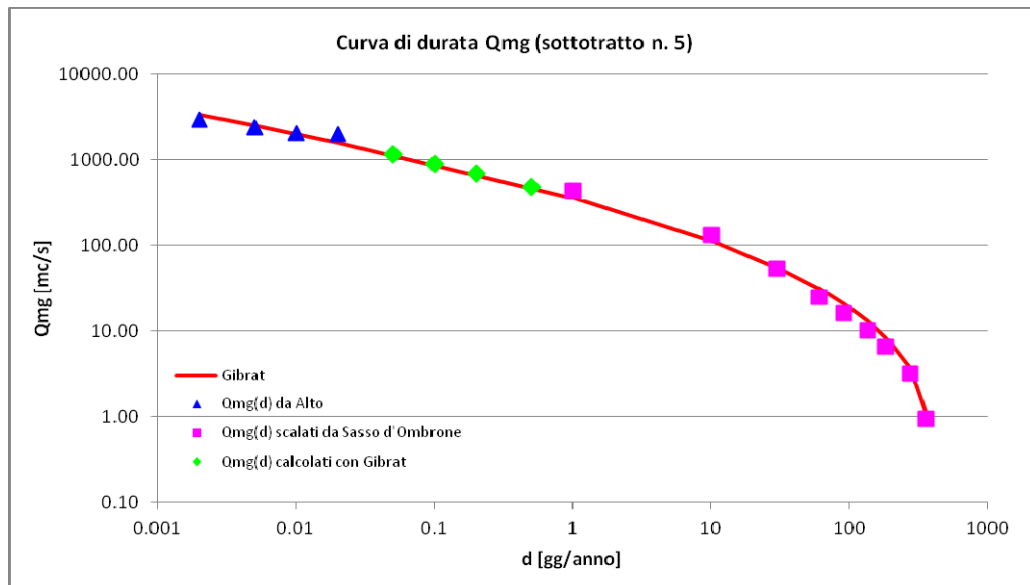


Figura 38 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 5).

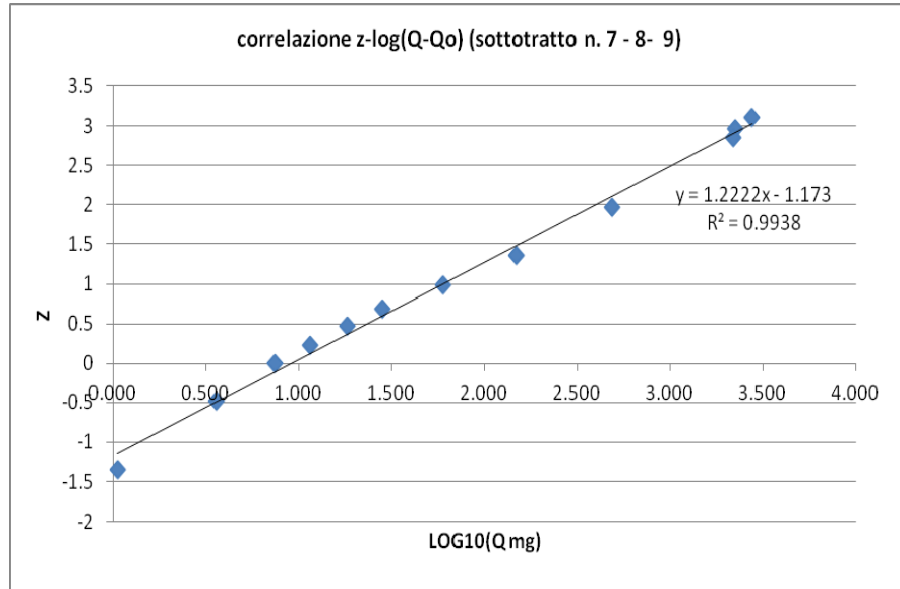


Figura 39 Correlazione z-log(Q-Qo) (sottotratto n. 7-8-9).

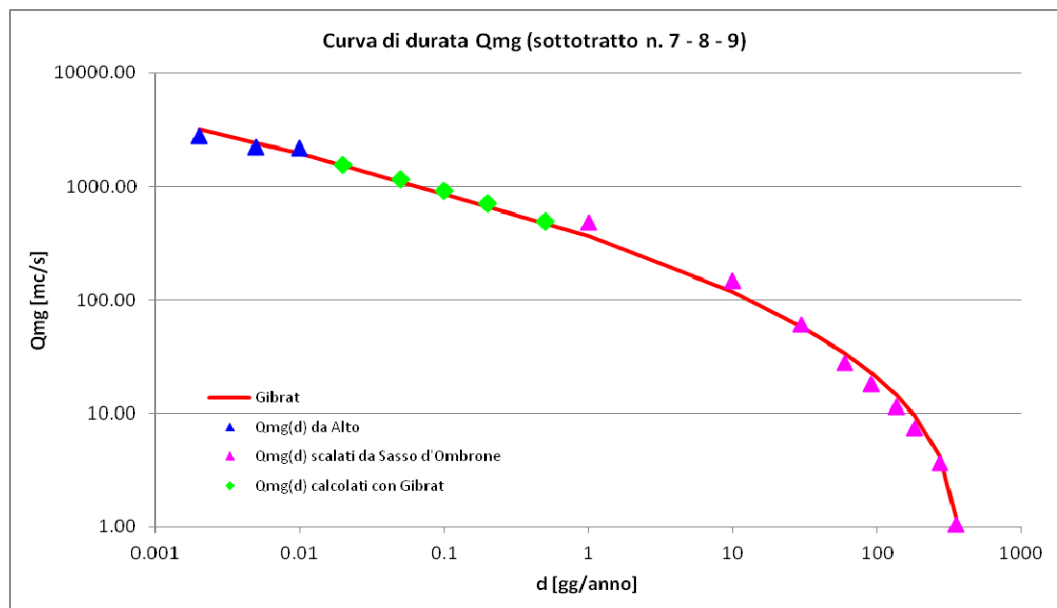


Figura 40 Curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 7-8-9).

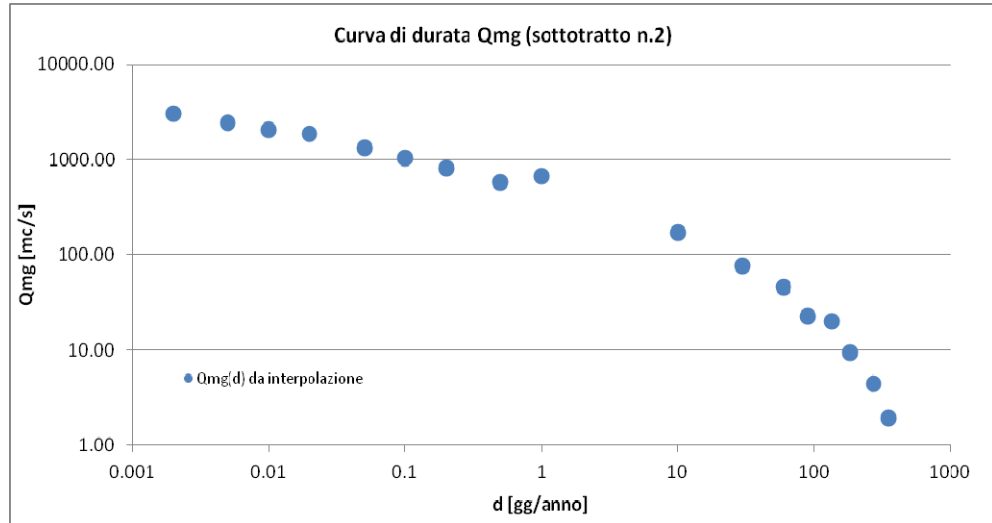


Figura 41 Punti della curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 2)

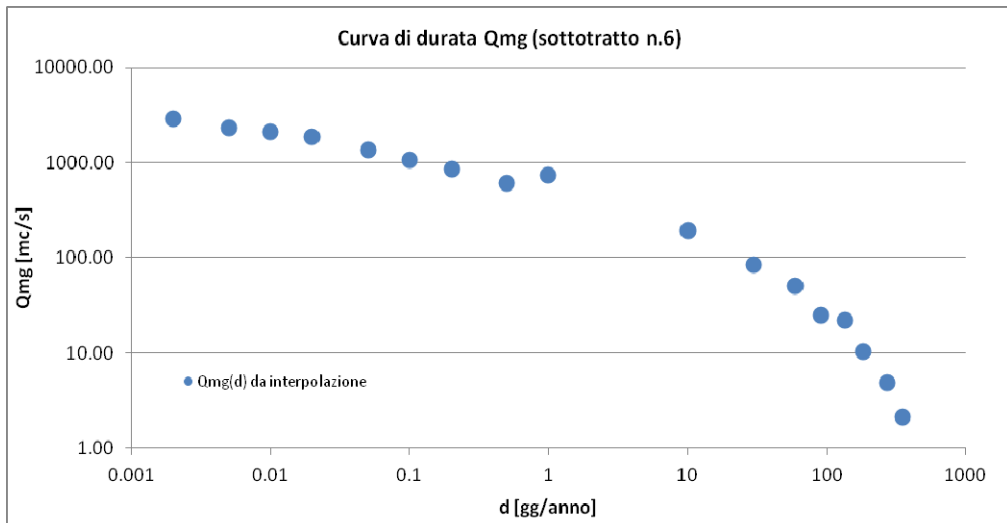


Figura 42 Punti della curva di durata delle portate medie giornaliere (sottotratto n. 6).

3.1.5 Le caratteristiche idrauliche

Ai fini della determinazione del bilancio sedimentologico è necessario procedere alla valutazione della capacità di trasporto solido di ciascun tratto. Poiché il bilancio è effettuato su scala medio annua, è necessario determinare per ciascuna portata della curva di durata le corrispondenti caratteristiche idrauliche utili per il calcolo della capacità di trasporto solido.

A tal fine sono state effettuate due diverse simulazioni in moto permanente mediante il software HEC-RAS, in particolare:

- una rappresentativa del periodo 1926-1970 utilizzando le sezioni fluviali rilevate nel 1970 e le curve di durata delle portate al colmo calcolate sul periodo 1926-1970;
- l'altra rappresentativa del periodo 1970-2012 utilizzando le sezioni fluviali rilevate nel 1999 e le curve di durata delle portate al colmo calcolate sul periodo 1970-2012.
- Per una corretta valutazione dei fenomeni del trasporto solido occorre fare riferimento alle portate al colmo piuttosto che alle portate medie giornaliere.

Per tale motivo le curve di durata espresse in termini di portate giornaliere come descritto nel paragrafo precedente vengono qui riformulate in termini di portate al colmo come di seguito illustrato.

Curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto per il periodo 1926-1970

Le curve di durata delle portate al colmo, per ciascun sottotratto, sono state ricavate moltiplicando i valori di portata delle curve di durata delle portate medie giornaliere, per il rapporto $K_c = Q_c/Q_{mg}$ tra portata al colmo e portata media giornaliera (v. par. 2.1). Nella presente analisi K_c è stato assunto costante.

Si riportano in Tabella 13 i valori di portata delle curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto per il periodo 1926-1970.

In Figura 43 è riportata la curva di durata delle portate al colmo relativa al sottotratto 1 in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombrone per il periodo 1926-1970.

Tabella 13 Curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto, per il periodo 1926-1970

d [gg/anno]	SOTTOTRATTI						
	1	2	3	4	5	6	7-8-9
	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]
0.002	4511.987	4531.23	4371.41	4676.75	4359.70	4364.25	4181.13
0.005	3673.423	3681.92	3556.97	3772.28	3546.32	3542.78	3392.25
0.01	3133.225	3067.38	3032.53	3194.74	3022.77	3178.70	3319.80
0.02	2704.000	2801.32	2768.00	2872.80	2943.60	2803.75	2726.66
0.05	1967.965	1977.69	1956.02	2055.05	2010.37	2026.39	2057.92
0.1	1561.662	1569.39	1554.40	1632.13	1600.10	1614.62	1645.25
0.2	1225.360	1231.49	1221.50	1281.79	1259.48	1273.24	1301.08
0.5	871.473	875.75	870.59	912.75	899.74	910.54	935.56
1	997.222	998.64	1020.83	1059.18	1085.36	1116.92	1224.03
10	258.210	258.69	264.32	274.25	281.03	290.00	316.94
30	114.474	115.31	115.99	120.95	121.50	125.74	131.33
60	67.971	68.51	69.19	72.04	72.72	75.47	79.37
91	34.126	34.08	34.93	36.25	37.14	37.56	41.89
135	30.321	30.54	31.15	32.35	32.90	33.67	36.42
182	14.043	14.08	14.38	14.92	15.28	15.82	17.24
274	6.720	6.71	6.88	7.14	7.31	7.41	8.25
355	2.869	2.87	2.94	3.05	3.12	3.22	3.52

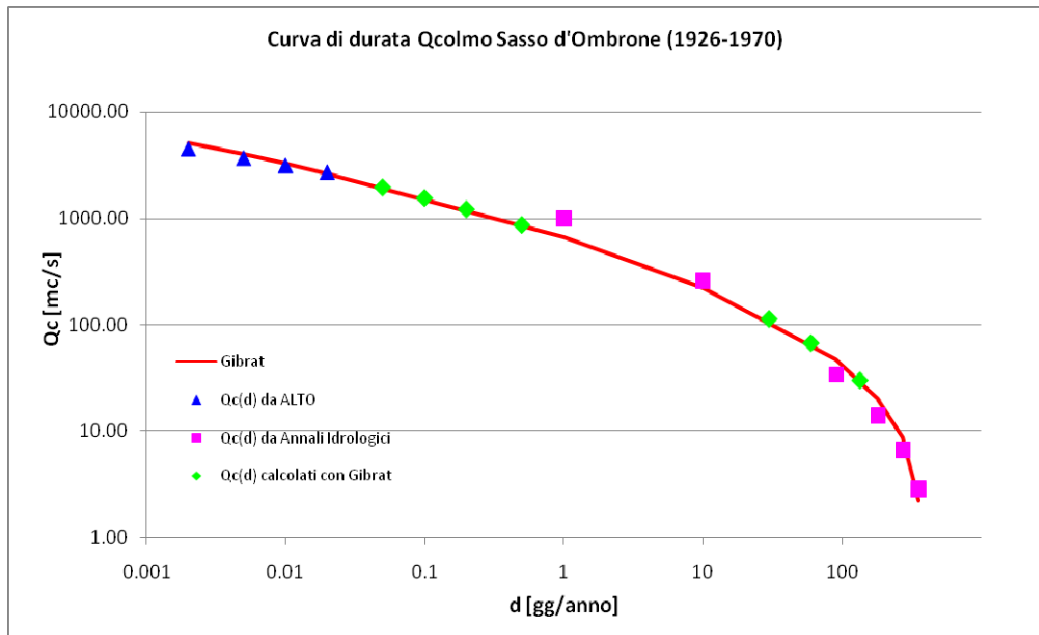


Figura 43 Curva di durata delle portate al colmo per il periodo 1926-1970, calcolata in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombrone

Curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto per il periodo 1970-2012

Analogamente al caso precedente, le curve di durata delle portate al colmo, per ciascun sottotratto, sono state ricavate moltiplicando i valori di portata delle curve di durata delle portate medie giornaliere relative al periodo 1970-2012, per il coefficiente Kc.

Si riportano in Tabella 14 i valori di portata delle curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto per il periodo 1970-2012.

In Figura 44 è riportata la curva di durata delle portate al colmo relativa al sottotratto 1 in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombrone per il periodo 1970-2012.

Tabella 14 Curve di durata delle portate al colmo per ciascun sottotratto, per il periodo 1970-2012

d [gg/anno]	SOTTOTRATTI						
	1	2	3	4	5	6	7-8-9
	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]
0.002	4511.987	4531.23	4371.41	4676.75	4359.70	4364.25	4181.13

d [gg/anno]	SOTTOTRATTI						
	1	2	3	4	5	6	7-8-9
	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]
0.005	3673.423	3681.92	3556.97	3772.28	3546.32	3542.78	3392.25
0.01	3133.225	3067.38	3032.53	3194.74	3022.77	3178.70	3319.80
0.02	2704.000	2855.33	2768.00	2872.80	2943.60	2670.96	2381.62
0.05	1762.854	1747.60	1700.55	1785.96	1749.07	1751.08	1754.40
0.1	1368.155	1356.90	1323.25	1388.82	1363.36	1367.33	1375.79
0.2	1048.815	1040.60	1017.18	1066.86	1049.90	1054.51	1066.19
0.5	721.932	716.43	702.86	736.49	727.31	730.34	745.19
1	600.980	602.14	615.20	638.32	654.10	675.19	737.67
10	181.741	181.88	186.04	193.03	197.80	202.75	223.08
30	73.933	74.32	75.68	78.53	80.47	84.76	90.75
60	34.730	34.67	35.55	36.89	37.80	38.15	42.63
91	22.336	22.39	22.86	23.72	24.31	25.17	27.42
135	14.197	14.23	14.53	15.08	15.45	15.97	17.43
182	9.090	9.10	9.31	9.65	9.89	10.14	11.16
274	4.439	4.47	4.54	4.72	4.83	5.17	5.45
355	1.291	1.29	1.32	1.37	1.41	1.43	1.58

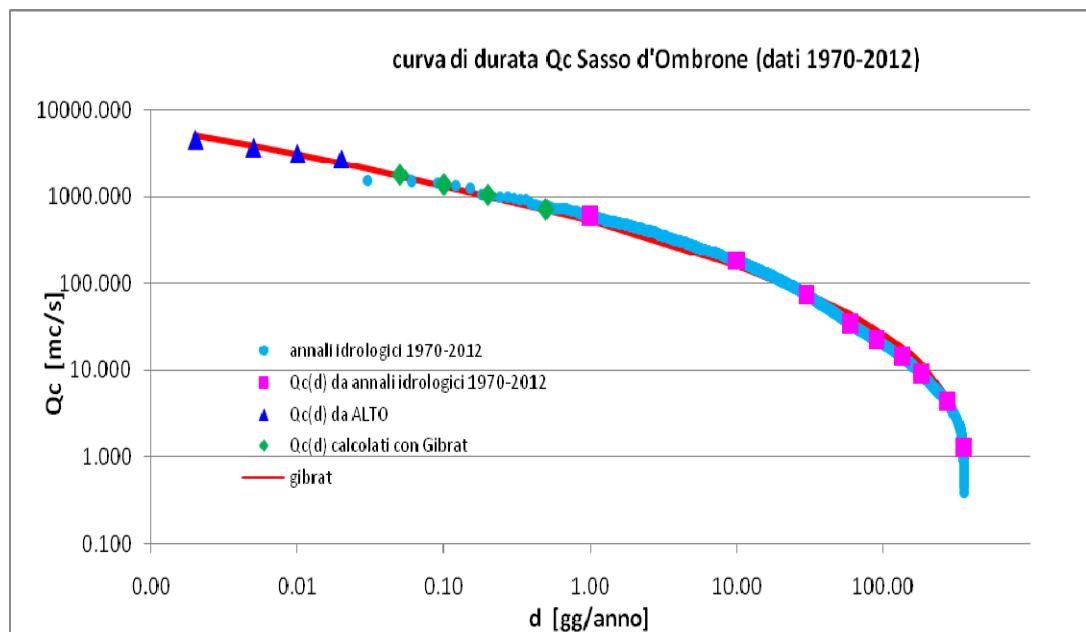


Figura 44 Curva di durata delle portate al colmo per il periodo 1970-2012, calcolata in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombrone

Per le simulazioni idrauliche in moto permanente in HEC-RAS sono state utilizzate le stesse condizioni al contorno:

- Condizione al contorno di monte: pendenza della linea dei carichi totali (approssimata in questo caso mediante la pendenza del tratto di canale a monte)
- Condizione al contorno di valle: valore noto di altezza d'acqua coincidente, nel caso in esame, con la quota del livello medio del mare (0.00 m).

3.1.6 Il criterio di stima della capacità di trasporto solido

Nel paragrafo 2.2 è già stata illustrata la formula di Ackers e White come quella che meglio descrive i dati del trasporto solido misurati a Ponte d'Istia.

Rimandando al paragrafo 2.2 per la descrizione della formula, si ritiene utile qui approfondire la metodologia di utilizzo della formula stessa nel caso in cui si è in presenza del fenomeno del corazzamento (armouring) dell'alveo, come avviene per i tratti di monte da 1 a 6.

In tal caso occorre introdurre un fattore di "nascondimento" (hiding factor) che considera il fenomeno per cui le particelle grossolane risultano più esposte all'azione della corrente e contemporaneamente quelle più fini risultano più protette, rispetto alla situazione che si avrebbe in condizioni di uniformità del materiale.

Tale fenomeno è messo in conto modificando il termine che esprime l'inizio del moto, cioè il parametro A che si modifica in A_i

$$A_i = \left(0.4 * \sqrt{\frac{D_r}{D_i}} + 0.6 \right) * A_w \quad 13$$

Dove

$$D_r = D_{50} * 1.6 \left(\frac{D_{16}}{D_{84}} \right)^{0.28} \quad 14$$

E

$$D_i = D_{16}$$

15

Il valore del diametro da attribuire a D_i è stato individuato calibrando il modello di bilancio sedimentologico sulla base delle misure di trasporto solido effettuate nel 1999 in prossimità di Ponte d'Istia [29].

Sono stati confrontati i valori di portata solida misurati a Ponte d'Istia nel 1999 con quelli calcolati in corrispondenza dello stesso sottotratto fluviale e per valori di portata liquida prossimi a quelli misurati nel 1999, adottando differenti valori di diametro D_i .

I valori di portata solida calcolati che meglio approssimano i valori misurati sono stati ottenuti adottando il fattore di nascondimento A_i calcolato con $D_i = D_{16}$.

Tenendo conto di queste relazioni, dai valori di h , S e D_{35} vengono calcolati D_{gr} , A_i , n , m , e K_t . Calcolando poi la velocità media U , si calcola F_{gr} e G_{gr} dalla quale ricava la concentrazione in peso C_p ed il trasporto totale in peso riferito all'unità di larghezza:

$$q_t = C_p \gamma q$$

16

Il trasporto solido totale Q_t risulta il prodotto di q_t per la larghezza dell'alveo attivo.

3.1.7 Implementazione del modello di bilancio sedimentologico

Per la stima del bilancio sedimentologico relativo ai due periodi di riferimento, 1026-1970 e 1970-2012, il tratto di interesse del fiume Ombrone è stato suddiviso in 9 sottotratti, individuati basandosi sui criteri descritti nel paragrafo 3.1.2. Ad ogni sottotratto si associa:

- la curva di durata delle portate al colmo per ciascuno dei due periodi di riferimento;
- le grandezze idrauliche calcolate nella simulazione in moto permanente in HEC-RAS: area bagnata (m^2), larghezza della sezione in corrispondenza del pelo libero (m), velocità media della

corrente (m/s), raggio idraulico (m), pendenza della linea dei carichi totali. Queste grandezze sono state mediate sulle sezioni ricadenti all'interno del sottotratto;

- la curva granulometrica di frequenza relativa del campione di materiale d'alveo rilevato e attribuito al sottotratto considerato;
- gli apporti laterali di materiale solido, (nessuna alimentazione diretta dalle sponde, dai versanti o dagli affluenti), assunti in questa fase uguali a 0.

Applicando la formula di trasporto solido descritta nel paragrafo 3.1.4 è stato determinato il trasporto solido medio annuo di ciascun sottotratto.

La curva di frequenza relativa ha inoltre permesso di determinare il trasporto solido medio annuo per classi granulometriche.

Il trasporto solido su base annua di ogni sottotratto si effettua integrando i contributi elementari che, nel tempo dt , forniscono un volume solido pari a:

$$dV = Q_s \cdot dt \quad 17$$

dove Q_s è il trasporto solido relativo al tempo dt e calcolato con la formula di Ackers-White [1].

Definito T il periodo di tempo considerato (nel nostro caso l'anno) si avrà:

$$V_T = \int_0^T Q_s \cdot dt \quad 18$$

Dove V_T è il volume solido annuale. Per svolgere l'integrale tutte le grandezze idrauliche, geometriche e sedimentologiche devono fare riferimento all'intervallo di tempo dt . L'integrale viene così discretizzato:

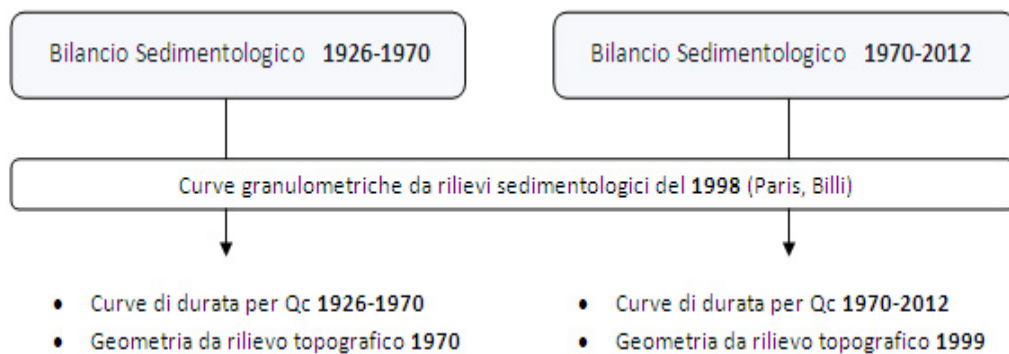
$$V_T = \int_0^T Q_s \cdot dt = \sum_{i=1}^n Q_{si} \delta t \quad 19$$

Dove n è il numero di punti discreti della curva di durata.

Il volume V_T rappresenta il volume di materiale solido annuo prodotto da ciascun sottotratto, vale a dire la quantità di materiale solido che ogni sottotratto è in grado di trasportare mediamente nell'arco temporale pari ad un anno.

Dalla differenza tra il volume di materiale in ingresso a monte di un sottotratto e il volume che il sottotratto stesso è in grado di trasportare si può definire la tendenza al deposito o all'erosione del materiale in ciascun sottotratto, e quindi la tendenza evolutiva del fondo alveo dell'intero tratto fluviale in esame.

Di seguito si riporta uno schema riassuntivo delle caratteristiche e dei dati utilizzati nella determinazione dei bilanci sedimentologici relativi a ciascun periodo.



Nel calcolo dei bilanci sedimentologici relativi ai due periodi di riferimento si è tenuto conto della diversità di assortimento granulometrico dei sottotratti di monte (da 1 a 6) rispetto a quelli di valle (7-8-9).

Nel tratto di monte il materiale presenta un'elevata non uniformità, per questo motivo nella metodologia di calcolo si è tenuto conto del fattore di nascondimento (hiding factor); al contrario nel tratto vallivo il materiale che caratterizza l'alveo tende ad essere più uniforme per cui è stato eliminato il fattore di nascondimento

Bilancio sedimentologico 1926-1970

Nel calcolo del bilancio sedimentologico relativo al periodo 1926-1970 sono stati utilizzati i seguenti dati:

- curva di durata delle portate al colmo per il periodo 1926-1970.
- curve granulometriche di frequenza relativa dei campioni rilevati durante la campagna di rilievi sedimentologici del 1998
- geometria da rilievo topografico del 1970

I risultati relativi al volume solido medio annuo (espresso in tonnellate/anno) prodotto in ciascun sottotratto e le tendenze evolutive dell'alveo in termini di deposito/erosione, sono riportati in Tabella 15.

Tabella 15 Volumi solidi annui espressi in tonnellate/anno e bilancio sedimentologico del Fiume Ombrone Grossetano per il periodo 1926-1970

SOTTOTRATTO	V [Ton/yr]	deposito/erosione (ton/yr)	tendenza
1	2.50E+04	-	-
2	5.59E+03	1.94E+04	deposito
3	7.42E+03	-1.82E+03	erosione
4	2.24E+03	5.17E+03	deposito
5	1.93E+03	3.13E+02	deposito
6	5.40E+03	-3.47E+03	erosione
7	3.36E+04	-2.82E+04	erosione
8	7.26E+04	-3.90E+04	erosione
9	6.84E+04	4.26E+03	deposito

La Figura 45 riporta la tendenza al deposito e all'erosione in ciascun sottotratto in termini di quantità di materiale depositato o eroso espresso in tonnellate/anno. In rosso è raffigurato il processo di erosione e in verde il processo di deposito.

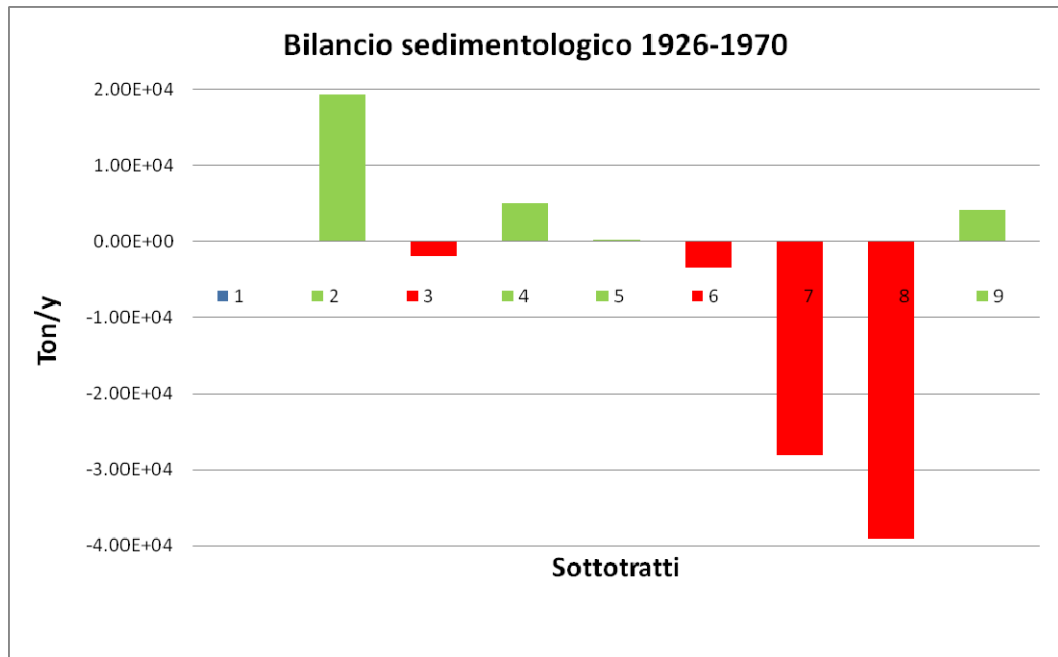


Figura 45 Bilancio Sedimentologico del fiume Ombrone Grossetano per il periodo 1926-1970

Il bilancio evidenzia una tendenza all'erosione nei sottotratti di valle 7 e 8 mentre nel tratto di monte ad eccezione del deposito che caratterizza il sottotratto 2, non sono evidenti particolari tendenze evolutive. Si riportano inoltre i grafici relativi al bilancio sedimentologico per classi granulometriche le cui sigle sono descritte nella tabella seguente:

Tabella 16 Classificazione dei sedimenti in funzione delle loro dimensioni al setaccio (Udden- Wentworth)

classe granulometrica	sigla	Di [m]	Φ medio
Large Boulder	LB	1.024	-10
Medium Boulder	MB	0.608874043	-9.25
Small Boulder	SB	0.304437021	-8.25
Large Cobble	LC	0.152218511	-7.25
Small. Cobble	SC	0.076109255	-6.25
Very Coarse Gravel	VCG	0.038054628	-5.25
Coarse Gravel	CG	0.019027314	-4.25
Medium Gravel	MG	0.009513657	-3.25
Fine Gravel	FG	0.004756828	-2.25
Very Fine Gravel	VFG	0.002378414	-1.25
Very Coarse Sand	VCS	0.001189207	-0.25
Coarse Sand	CS	0.000594604	0.75

classe granulometrica	sigla	Di [m]	Φ medio
Medium Sand	MS	0.000297302	1.75
Fine Sand	FS	0.000148651	2.75

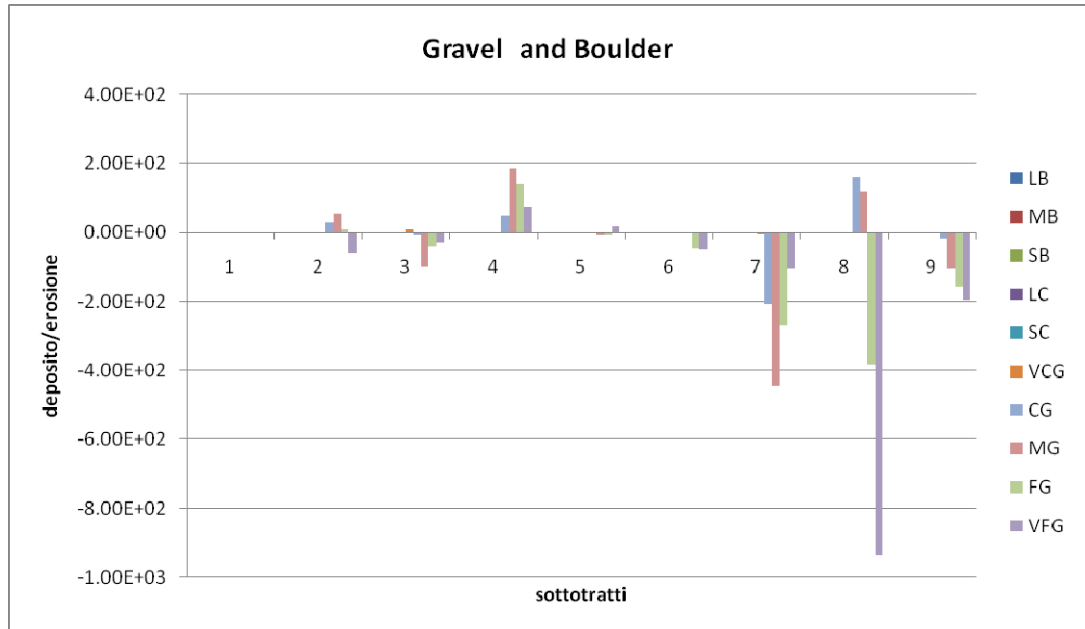


Figura 46 Bilancio sedimentologico per classi granulometriche comprese nell'intervallo - $10 < \Phi < -1.25$ (massi e ghiaia).

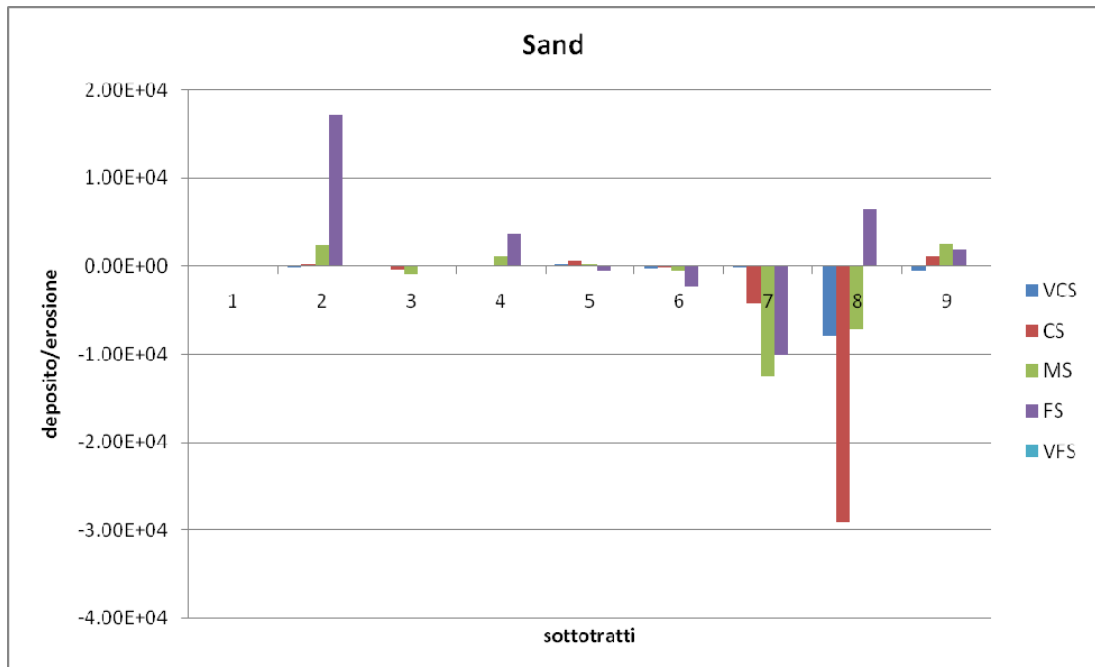


Figura 47 Bilancio sedimentologico per classi granulometriche comprese nell'intervallo - $0.25 < \Phi < 2.75$ (sabbia)

Bilancio sedimentologico 1970-2012

Nel calcolo del bilancio sedimentologico relativo al periodo 1970-2012 sono stati utilizzati i seguenti dati:

- curva di durata delle portate al colmo per il periodo 1970-2012.
- curve granulometriche di frequenza relativa dei campioni rilevati durante la campagna di rilievi sedimentologici del 1998
- geometria da rilievo topografico del 1999

Nella Tabella 17 sono riportati i volumi solidi annui e la tendenza al deposito/erosione di ciascun sottotratto.

Tabella 17 Volumi solidi annui espressi in tonnellate/anno e bilancio sedimentologico del Fiume Ombrone Grossetano per il periodo 1970-2012.

SOTTOTRATTO	V[Ton/y]	deposito/erosion e (ton/y)	tendenza
1	2.56E+04	-	-
2	3.40E+03	2.23E+04	deposito
3	4.30E+03	-9.05E+02	erosione
4	2.40E+03	1.90E+03	deposito
5	1.12E+03	1.28E+03	deposito
6	2.78E+03	-1.66E+03	erosione
7	3.28E+04	-3.00E+04	erosione
8	4.33E+04	-1.04E+04	erosione
9	3.18E+04	1.15E+04	deposito

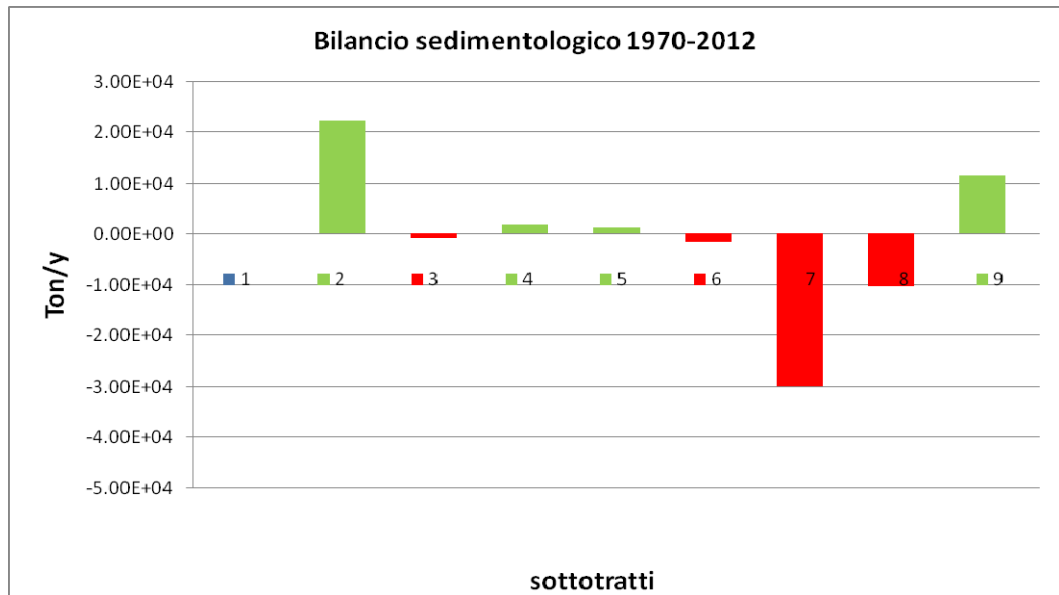


Figura 48 Bilancio Sedimentologico del fiume Ombrone Grossetano per il periodo 1970-2012

Anche il bilancio sedimentologico relativo al periodo 1970-2012 evidenzia una tendenza erosiva nel tratto vallivo in corrispondenza dei sottotratti 7 e 8 ed un cambio di tendenza nell'ultimo tratto.

Nelle Figura 49Figura 50 si riportano i grafici relativi al bilancio sedimentologico per classi granulometriche le cui sigle sono descritte nella Tabella 16 riportata in precedenza.

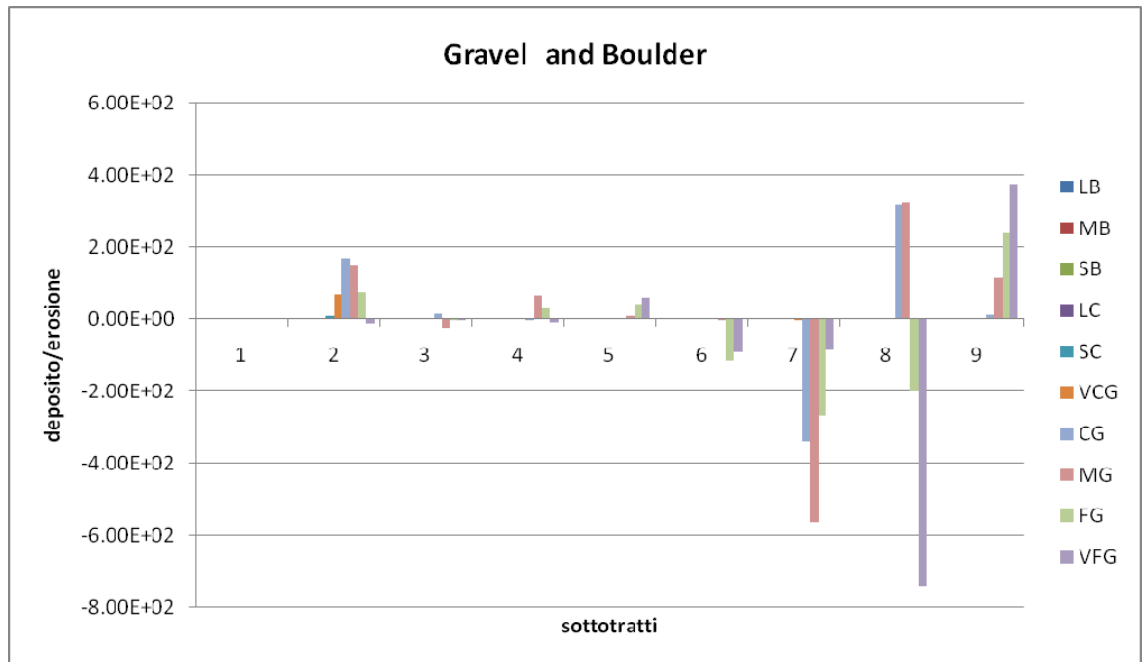


Figura 49 Bilancio sedimentologico per classi granulometriche comprese nell'intervallo - $10 < \Phi < -1.25$ (massi e ghiaia)

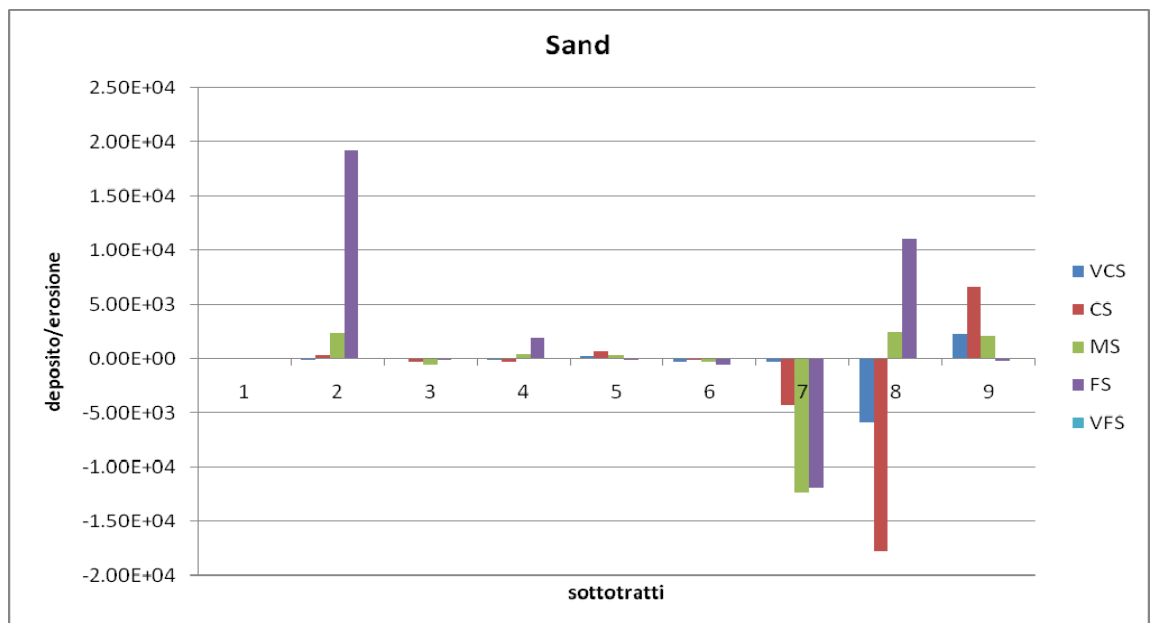


Figura 50 Bilancio sedimentologico per classi granulometriche comprese nell'intervallo - $0.25 < \Phi < 2.75$ (sabbia)

Confronti per i bilanci sedimentologici 1926-1970 e 1970-2012.

Il confronto tra i bilanci effettuati per i due sottoperiodi considerati mostra una sostanziale coincidenza delle tendenze evolutive del fondo alveo (Figura 51).

In particolare viene confermata la sostanziale condizione di equilibrio del tratto di monte ed una maggiore dinamica per il tratto posto a valle della traversa della Steccaia. Anche in termini di volumi, non si rilevano differenze sostanziali tra i due sottoperiodi analizzati (Tabella 18).

Conviene osservare che le variazioni altimetriche connesse ai fenomeni di deposito o di erosione evidenziati dai bilanci sedimentologici sono comunque modeste, dell'ordine di grandezza della decina di centimetri, pertanto scarsamente rilevanti in valore assoluto rispetto alle variazioni altimetriche che si verificano ad esempio in corrispondenza degli eventi di piena o in prossimità di fenomeni localizzati.

E' altrettanto importante rilevare che i valori effettivi delle variazioni altimetriche sono correlati alla affidabilità del modello di trasporto solido utilizzato. Nel caso considerato la formula di Ackers e White è stata verificata per il tratto ove sono state effettuate alcune misure del trasporto solido. Tale formula è quindi da ritenersi adeguata allo studio del trasporto solido del Fiume Ombrone.

I risultati del bilancio sedimentologico possono essere messi a confronto con l'analisi delle variazioni altimetriche che il thalweg mostra tra i due rilievi topografici del 1970 e del 2000 (Figura 52).

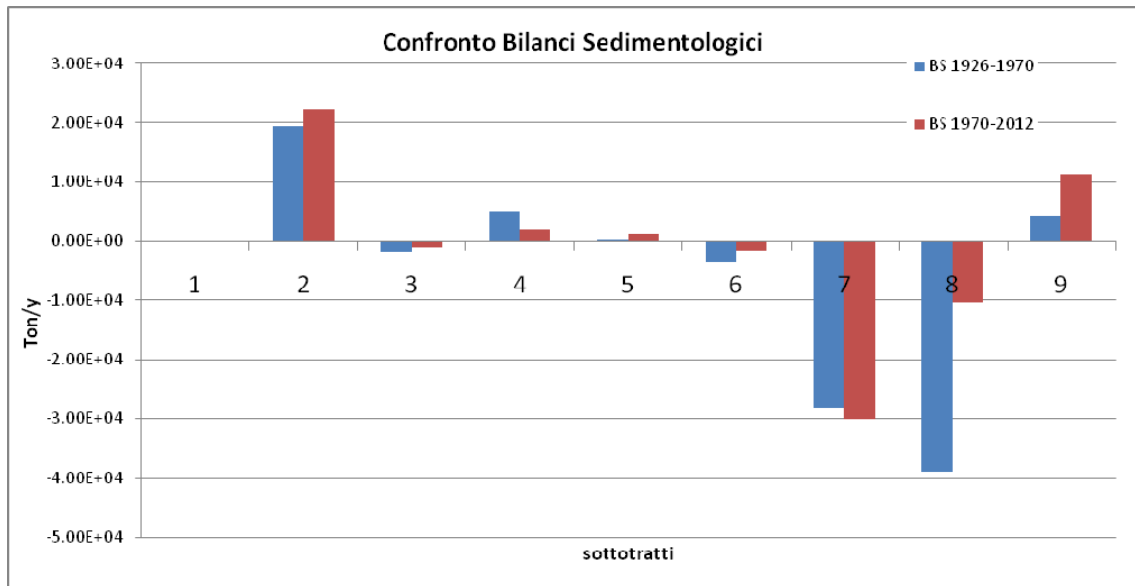


Figura 51 Confronto tra i bilanci sedimentologici del 1926-70 e del 1970-2012.

Tabella 18 Confronto tra volumi solidi annui e tendenze evolutive per i periodi 1926-1970 e 1970-2012

SOTTOTRATTO	Bilancio Sedimentologico 1926-70		Bilancio sedimentologico 1970-2012	
	Volume di deposito/erosione (ton/y)	tendenza	Volume di deposito/erosione (ton/y)	tendenza
1	-	-	-	-
2	1.94E+04	deposito	2.23E+04	deposito
3	-1.82E+03	erosione	-9.05E+02	erosione
4	5.17E+03	deposito	1.90E+03	deposito
5	3.13E+02	deposito	1.28E+03	deposito
6	-3.47E+03	erosione	-1.66E+03	erosione
7	-2.82E+04	erosione	-3.00E+04	erosione
8	-3.90E+04	erosione	-1.04E+04	erosione
9	4.26E+03	deposito	1.15E+04	deposito

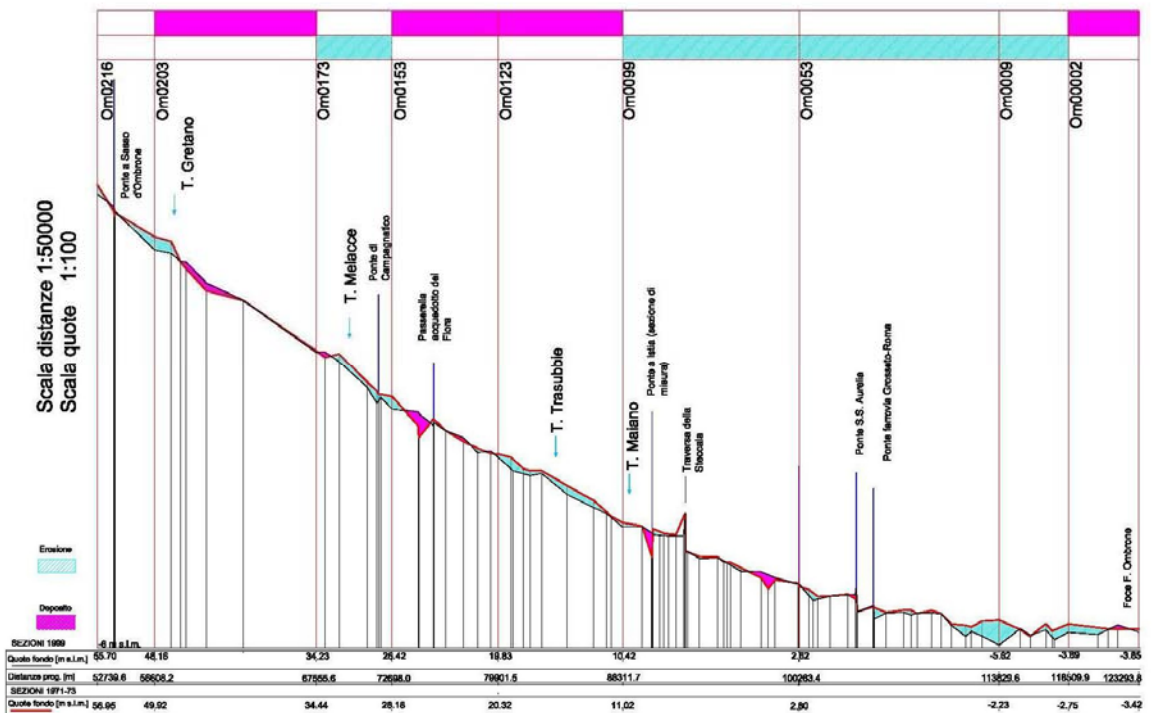


Figura 52 Confronto tra i profili longitudinali delle geometrie relative ai rilievi topografici del 1970 e del 1999

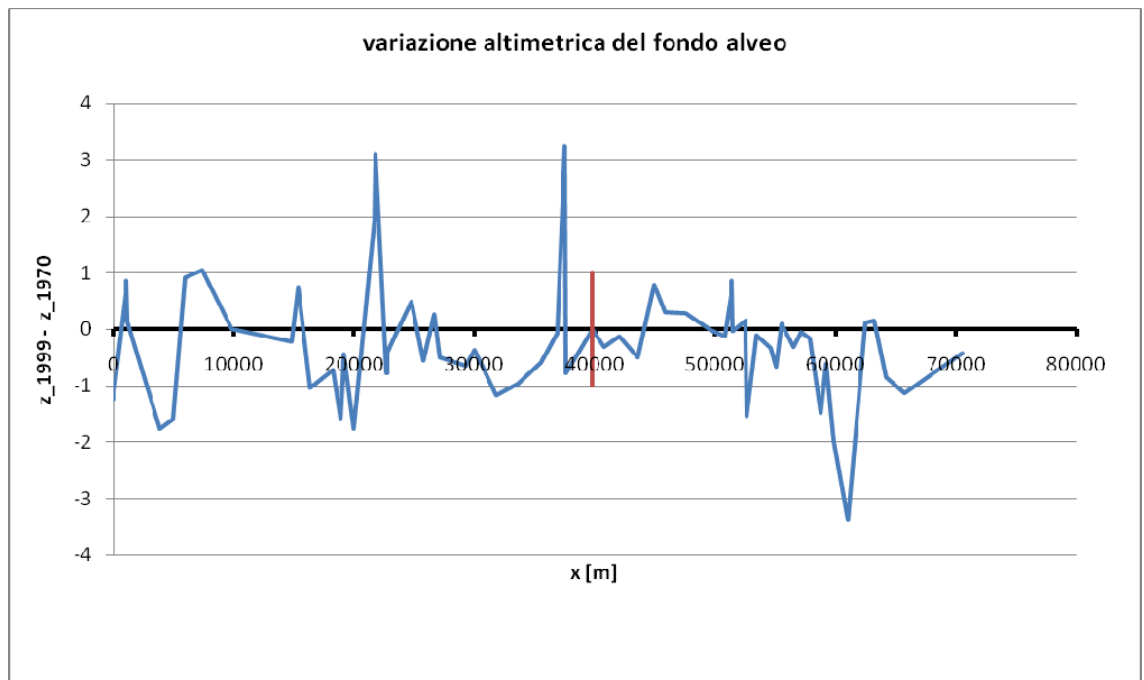


Figura 53 Variazione altimetrica del fondo alveo dal 1970 al 1999.

Se si osserva il confronto tra il profilo longitudinale del thalweg rilevato nel 1970 e quello rilevato nel 1999 [31] riportato in Figura 52 si evidenzia un notevole abbassamento del fondo alveo nei sottotratti 7 e 8 che rispecchia la tendenza evolutiva a carattere erosivo ottenuta dal bilancio sedimentologico.

Le aree colorate in ciano lungo la sovrapposizione dei profili, rappresentano i tratti in cui dal 1970 al 1999 si è avuto un abbassamento della quota del thalweg mentre le aree in viola rappresentano i tratti per i quali si è assistito invece ad un innalzamento della quota del thalweg nello stesso periodo.

I rettangoli tracciati nella parte alta del grafico rappresentano invece la tendenza evolutiva del fondo alveo che si è ottenuta dal bilancio sedimentologico, e che, come visto in precedenza, è la stessa per entrambi i periodi di riferimento.

In corrispondenza della sezione Om0009 che delimita il passaggio dal sottotratto 7 al sottotratto 9 si è avuto il massimo abbassamento del thalweg dal 1970 al 1999 pari a 3.4 metri.

La tendenza all'erosione che caratterizza il tratto di valle emerge anche dal grafico riportato in Figura 53, il quale rappresenta l'andamento lungo lo sviluppo longitudinale dell'asta fluviale, della differenza tra la quota del thalweg da rilievo topografico del 1999 e la quota del thalweg da rilievo del 1970.

Il grafico evidenzia, come già sottolineato in precedenza, una situazione di equilibrio nel tratto a monte della traversa della Steccaia, evidenziata in rosso con un tratto verticale, e una tendenza prevalentemente erosiva nel tratto immediatamente a valle fino alla foce.

Bilancio sedimentologico 1970-2012: ulteriori valutazioni

E' stata effettuata una verifica per valutare l'influenza degli eventi di piena significativi registrati nel periodo 2000-2012, sul bilancio sedimentologico relativo all'intero periodo 1970-2012. La verifica si è limitata alla determinazione del volume di materiale solido medio annuo, espresso in tonnellate/anno, prodotto nel sottotratto 1. E' stato suddiviso il periodo

temporale 1970-2012 in due sottoperiodi e sono stati utilizzati i dati come di seguito specificato:

1970-1999

- curva di durata delle portate al colmo calcolata per il periodo 1970-1999 in corrispondenza di Sasso d'Ombrone (Figura 54)
- geometria da rilievo topografico del 1999
- granulometria da rilievi sedimentologici del 1998

2000-2012

- curva di durata delle portate al colmo calcolata per il periodo 2000-2012 in corrispondenza di Sasso d'Ombrone (Figura 55)
- geometria da rilievo topografico del 1999
- granulometria da rilievi sedimentologici del 2013

I dati utilizzati per i diversi scenari sono riepilogati nello schema seguente:

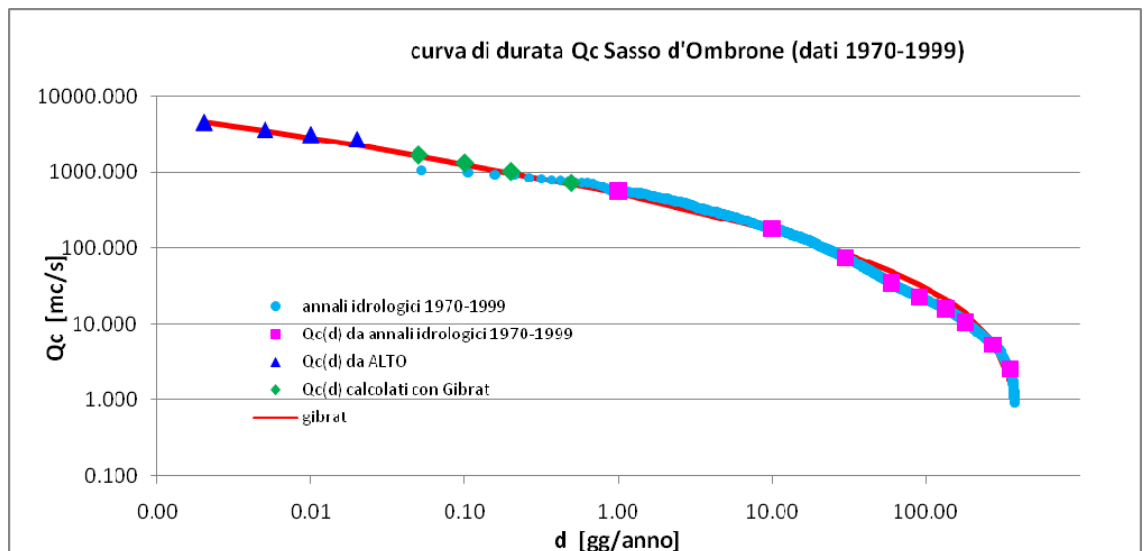
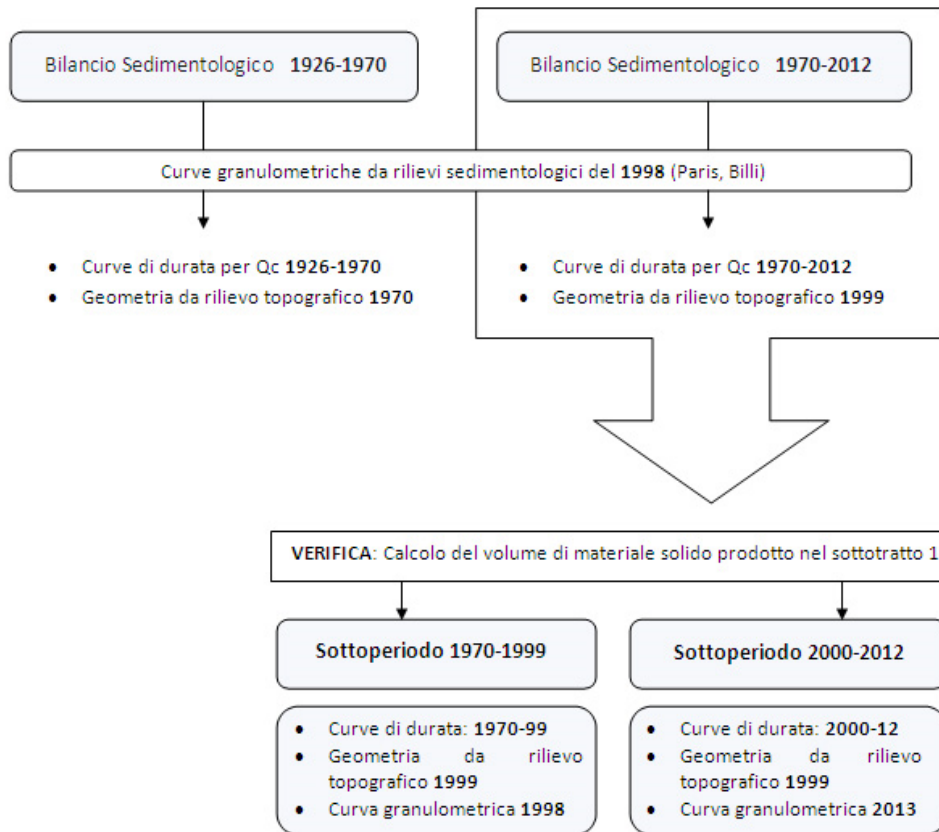


Figura 54 Curva di durata delle portate al colmo per il periodo 1970-1999, calcolata in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombrone

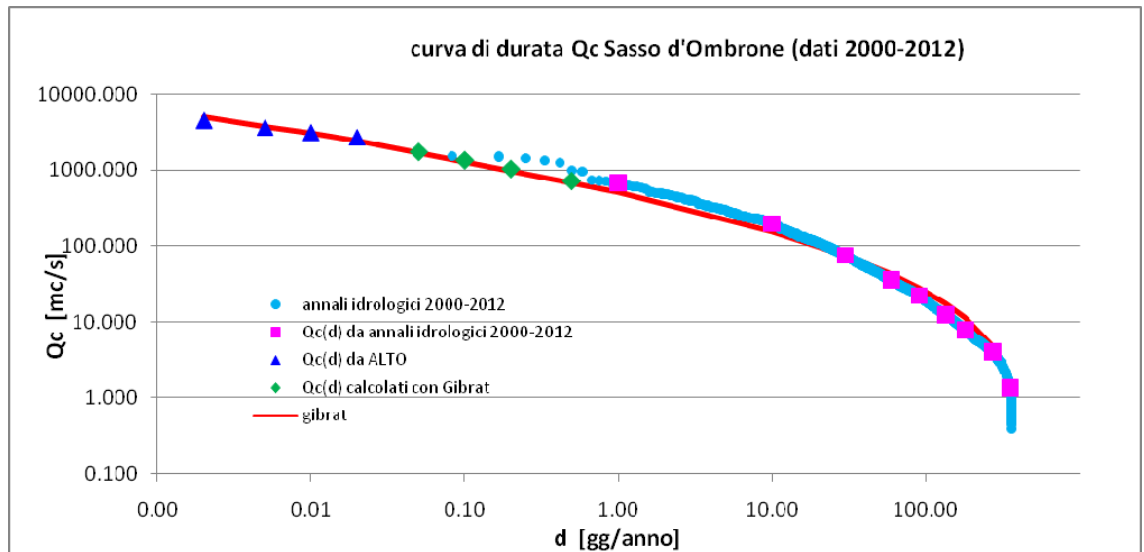


Figura 55 Curva di durata delle portate al colmo per il periodo 2000-2012, calcolata in corrispondenza della stazione idrologica di Sasso d'Ombone

Nella Tabella 19 si riportano i valori delle portate al colmo per diverse durate nei due sottoperiodi e il corrispondente grafico (Figura 56) con i valori sovrapposti.

I risultati non indicano una variazione sensibile delle portate al colmo, almeno fino a durate corrispondenti al tempo di ritorno pari a 20 anni.

Tabella 19 Curve di durata per le portate al colmo calcolate in corrispondenza della stazione di Sasso d'Ombone.

	Curva di durata 1970-1999	Curva di durata 2000-2012
d [gg/yr]	Qc [mc/s]	Qc [mc/s]
0.002	4511.99	4511.99
0.005	3673.42	3673.42
0.01	3133.23	3133.23
0.02	2704.00	2704.00
0.05	1666.57	1748.27
0.1	1308.58	1353.25
0.2	1015.46	1034.52
0.5	711.07	709.33
1	566.25	677.62
10	181.20	193.41
30	75.05	73.93
60	34.73	35.01
91	22.91	21.84
135	15.86	12.28
182	10.66	7.71
274	5.42	3.97

	Curva di durata 1970-1999	Curva di durata 2000-2012
355	2.55	1.32

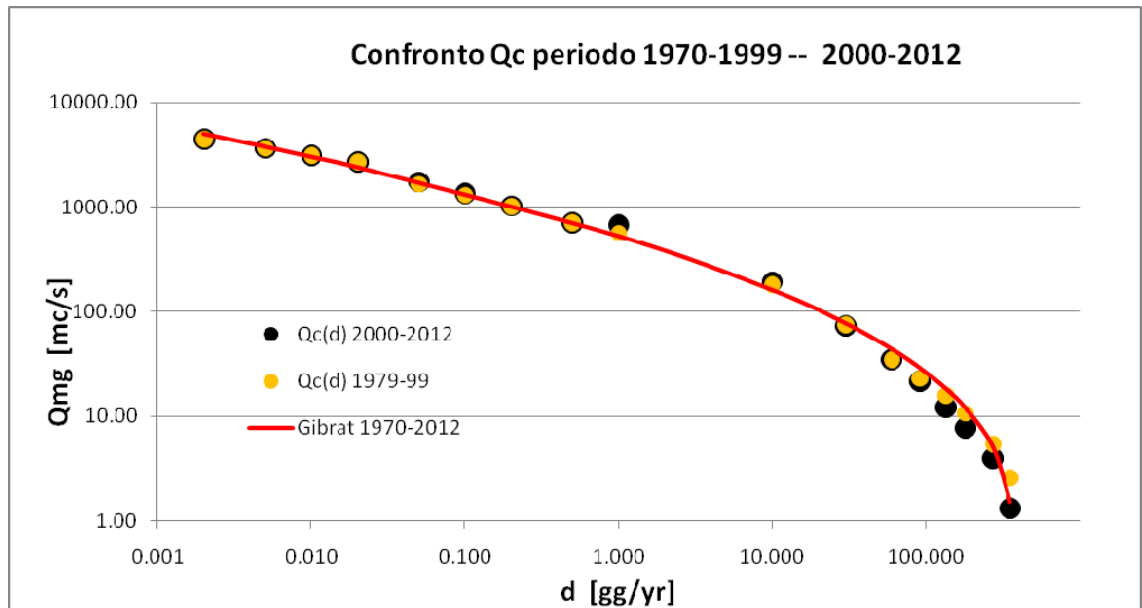


Figura 56 Confronto tra le curve di durata al colmo calcolate in corrispondenza della stazione di Sasso d'Ombrone relative ai sottoperiodi 1970-99 e 2000-2012.

Ciò si riflette ovviamente sul calcolo del volume solido medio annuo, riportato nella Tabella 20, che non mostra apprezzabili differenze per i diversi periodi considerati.

Tabella 20 Volume solido medio annuo per i diversi periodi considerati

periodo di riferimento	1970-2012	1970-1999	2000-2012
Volume medio annuo prodotto nel sottotratto 1 [ton/y]	25600	24966	20500

In conclusione, i risultati ottenuti evidenziano la modesta influenza degli eventi di piena relativi all'ultimo decennio sulla determinazione del bilancio sedimentologico relativo invece ad un periodo temporale maggiore che va dal 1970 al 2012, e quindi sulle tendenze evolutive dell'alveo.

ACCORDO DI COLLABORAZIONE SCIENTIFICA TRA REGIONE TOSCANA

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

**ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA**

Attività " C "

Relazione Intermedia

Modellazione idraulica a fondo mobile

Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano

MODELLISTICA A FONDO MOBILE

Gruppo di Lavoro:

Lorenzo Minatti (Referente CERAFRI), Enio Paris (referente UNIFI),

Luca Solari, Pina De Cicco, Laura Boschi (UNIFI),

Beatrice Mengoni, Sofia Morandi (RT)

Firenze, agosto 2013

4. MODELLAZIONE MORFODINAMICA

4.1 Concetti generali

Le verifiche in moto vario a fondo mobile sono state effettuate utilizzando il modello morfodinamico REMo, realizzato presso il Cerafri srl. Il modello si basa sulle equazioni Shallow Water per quanto riguarda la dinamica della fase liquida, mentre utilizza l'equazione di Exner, unitamente ad un modello capacitivo per la descrizione della dinamica dei sedimenti in alveo. Le equazioni che descrivono il modello vengono risolte per via numerica attraverso uno schema numerico ai volumi finiti con un'accuratezza del primo ordine nel tempo e nello spazio, ritenuta sufficiente per le applicazioni pratiche in alvei naturali. Per una descrizione più dettagliata, sia delle equazioni del modello che dello schema numerico utilizzato si rimanda ai paragrafi successivi.

Le equazioni di base che descrivono la dinamica della fase liquida sono le equazioni Shallow Water per alvei naturali (non prismatici), che descrivono il comportamento delle correnti a pelo liquido sotto le seguenti ipotesi:

- Caratteristiche geometriche d'alveo gradualmente variabili.
- Componenti verticali della velocità trascurabili.
- Distribuzione idrostatica delle pressioni.

Tali equazioni, di seguito riportate, descrivono rispettivamente la conservazione della massa e della quantità di moto della corrente liquida in movimento:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad 20$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta(x, \Omega) \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^{h(x, \Omega)} g (h(x, \Omega) - z) \sigma dz \right) = -g \Omega \frac{db}{dx} - g \Omega j + \int_0^{h(x, \Omega)} g (h(x, \Omega) - z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz \quad 21$$

Ove:

- x rappresenta l'ascissa lungo l'alveo.
- t rappresenta il tempo.
- $\Omega(x,t)$ rappresenta l'area bagnata nella sezione d'alveo.
- $Q(x,t)$ rappresenta la portata liquida nella sezione d'alveo.
- $\beta(x,\Omega)$ rappresenta un coefficiente di ragguglio della quantità di moto, che tiene conto della distribuzione di velocità non uniforme all'interno della sezione.
- g rappresenta l'accelerazione di gravità.
- j rappresenta la perdita di carico totale della corrente su unità di lunghezza.
- ∂ rappresenta l'operatore di derivata parziale.
- d rappresenta l'operatore di derivata totale.
- Il significato della ulteriore notazione è riportato nella figura seguente:

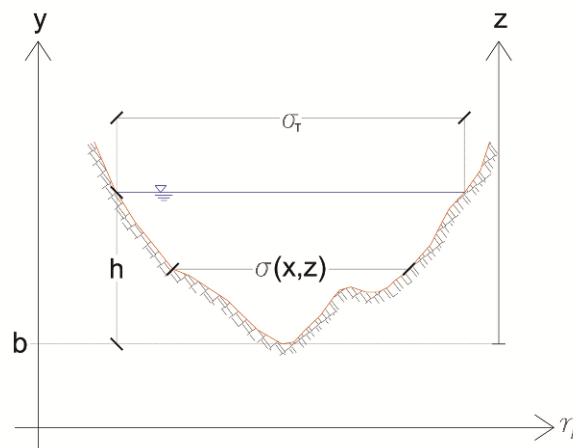


Figura 57 Notazione utilizzata nelle equazioni Shallow Water

In alvei naturali, le variabili h e σ_T sono funzioni della ascissa d'alveo, oltre che della sezione bagnata Ω . Per questo motivo è necessario l'uso della derivata totale nella parte sinistra dell'equazione:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta(x, \Omega) \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^{h(x, \Omega)} g (h(x, \Omega) - z) \sigma dz \right) = -g\Omega \frac{db}{dx} - g\Omega j + \int_0^{h(x, \Omega)} g (h(x, \Omega) - z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz$$
22

intesa nel senso di seguito specificato:

$$\frac{dh(x, \Omega(x, t))}{dx} = \frac{\partial h}{\partial \Omega} \Big|_{x=\text{cost.}} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \Big|_{\Omega=\text{cost.}}$$
23

Nel corso del presente studio, le perdite di carico sono state stimate attraverso la formula di Gaucker-Strickler:

$$j = \frac{Q^2}{\Omega^2 k_s^2 R^{4/3}}$$
24

Ove:

- k_s rappresenta il coefficiente di resistenza di Gaucker-Strickler.
- R rappresenta il raggio idraulico della sezione.

Per quanto riguarda la descrizione della dinamica del materiale d'alveo, viene utilizzata l'equazione di Exner per la conservazione della massa dei sedimenti trasportati dalla corrente:

$$\frac{\partial \Omega_s}{\partial t} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dQ_s}{dx} = 0$$
25

Ove:

- $\Omega_s(x, t)$ rappresenta la superficie erosa o depositata nella sezione.
- $Q_s(x, t)$ rappresenta la portata solida volumetrica in transito attraverso la sezione,
- e rappresenta l'indice dei vuoti caratteristico del materiale d'alveo nella sezione.

La descrizione della dinamica dei sedimenti viene infine completata attraverso un modello capacitivo per la stima della portata solida trasportata, ipotizzando che essa coincida con la capacità di trasporto solido della corrente

nella sezione considerata. Nel modello è implementato un certo numero di equazioni di trasporto solido di uso corrente nella pratica ingegneristica. In generale, esse possono essere espresse attraverso la seguente forma funzionale:

$$Q_s(x,t) = c(x, \Omega(x,t), Q(x,t)) \cdot \sigma_T(x, \Omega(x,t)) \quad 26$$

Ove:

- c è la capacità di trasporto volumetrica su unità di larghezza espressa dalla formula di trasporto solido utilizzata.

L'equazione di trasporto solido ha la funzione di un'equazione della conservazione della quantità di moto dei sedimenti.

4.2 Modellazione di canali compositi

Le sezioni d'alveo di notevoli dimensioni, quali quelle del tratto vallivo del fiume Ombrone, sono in genere costituite da aree golenali, interessate dal passaggio della corrente soltanto in occasione di eventi di piena e da un'area centrale di alveo inciso. Le aree golenali sono generalmente caratterizzate da una scabrezza maggiore di quella tipica dell'alveo inciso, in quanto spesso occupate da vegetazione arborea o arbustiva. La stessa vegetazione fa sì che la corrente scorra con velocità più moderata in tali aree ed eserciti nel contempo un'azione protettiva verso i sedimenti presenti sul fondo. La riduzione della velocità può inoltre essere accentuata nel caso in cui l'ampiezza delle aree golenali sia rilevante. Attraverso la combinazione di questi effetti, le aree golenali creano fenomeni di invaso con una conseguente laminazione dell'onda di piena. Inoltre, in esse i fenomeni di trasporto solido sono di gran lunga attenuati rispetto all'alveo inciso, la cui evoluzione morfologica avviene su scale temporali molto più brevi.

Per tener conto di come le aree golenali interagiscano con la corrente e la influenzino in maniera diversa rispetto all'alveo inciso, le equazioni descritte nel paragrafo 4.1 possono essere opportunamente modificate in maniera tale che:

- Il modello definisca differenti velocità per le aree golenali e per l'alveo inciso e che il coefficiente β di ragguglio della quantità di moto sia stimato in funzione di ciò.
- I fenomeni di trasporto solido siano ristretti soltanto all'interno dell'alveo inciso, il quale può pertanto modificare la sua morfologia, al contrario della aree golenali che vengono considerate a fondo fisso.

Per la stima delle velocità di pertinenza delle aree golenali e dell'alveo inciso è stato utilizzato il "Divided Channel Method" (DCM), implementato anche in altri software di uso comune come MIKE11 o HEC-RAS. L'ipotesi alla base del metodo è che la perdita di carico su unità di lunghezza che si realizza sulla sezione (la quale viene calcolata attraverso l'equazione

$$j = \frac{Q^2}{\Omega^2 k_s^2 R^{4/3}} \quad 27$$

nel caso in cui si utilizzi la formula di Gauckler-Strickler), sia la stessa nelle aree golenali e all'interno dell'alveo inciso.

Tale ipotesi porta a scrivere la seguente relazione:

$$Q_i = \sqrt{j} \cdot \Omega_i k_{s_i} R_i^{2/3} \quad i = 1, 2, 3 \quad 28$$

Ove:

- Il pedice i indica il valore della grandezza idraulica riferito, nell'ordine alla golena sx, alveo inciso, golena dx

Attraverso l'utilizzo dell'equazione $Q_i = \sqrt{j} \cdot \Omega_i k_{s_i} R_i^{2/3} \quad i = 1, 2, 3 \quad 28$ è quindi possibile suddividere la portata che transita su tutta la sezione nelle tre aree di riferimento. È possibile scrivere l'equazione in maniera più diretta, definendo la conduttanza K_i di un'area della sezione nella maniera seguente:

$$K_i := \frac{Q_i}{\sqrt{j}} = k_{s_i} \Omega R^{2/3} \quad 29$$

Il coefficiente di ragguglio della quantità di moto β è invece definito dalla:

$$\beta = \frac{\int u^2 dA}{\Omega U^2} \quad 30$$

Ove:

- u rappresenta la distribuzione delle velocità sulla sezione.
- U rappresenta la velocità media sulla sezione.

Utilizzando la definizione $\beta = \frac{\int u^2 dA}{\Omega U^2}$ assieme alla distribuzione delle velocità nelle aree in cui la sezione è stata suddivisa, data dalla $Q_i = \sqrt{j} \cdot \Omega_i k_{s_i} R_i^{2/3}$ $i = 1, 2, 3$ 28 è possibile ottenere la seguente stima per il coefficiente di ragguglio della quantità di moto:

$$\beta(x, \Omega(x, t)) = \frac{\Omega \cdot \sum_{i=1}^3 K_i^2(x, \Omega) / \Omega_i}{\left(\sum_{i=1}^3 K_i(x, \Omega) \right)^2} \quad 31$$

Infine, per quanto riguarda la modellazione del trasporto solido, è sufficiente calcolare le grandezze idrauliche riferite all'alveo inciso a partire dalla $Q_i = \sqrt{j} \cdot \Omega_i k_{s_i} R_i^{2/3}$ $i = 1, 2, 3$ 28 ed utilizzarle all'interno della

$$Q_s(x, t) = c(x, \Omega(x, t), Q(x, t)) \cdot \sigma_T(x, \Omega(x, t)) \quad 26 \text{ e } \frac{\partial \Omega_s}{\partial t} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dQ_s}{dx} = 0 \quad 25.$$

4.3 Modello di erosione/deposito

Per poter realizzare un modello accoppiato è necessario definire un criterio sulla base del quale una sezione d'alveo viene modificata in funzione dell'area solida Ω_s che vi è erosa o depositata. Una volta definito un criterio, è possibile esprimere la quota b del thalweg in funzione di Ω_s , in modo tale da poter esprimere tutta la parte destra dell'equazione

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta(x, \Omega) \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \sigma dz \right) = -g\Omega \frac{db}{dx} - g\Omega j + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz$$

funzione

22

delle variabili di stato ed accoppiare il modello.

In generale, è possibile esprimere la quota del thalweg di una sezione d'alveo attraverso la seguente relazione:

$$b = b_u(x) + \eta(x, \Omega_s(x, t), t)$$

32

Ove:

- b_u rappresenta la quota indisturbata del fondo alveo.
- η rappresenta la variazione della quota del fondo alveo rispetto alla situazione indisturbata. Essa è funzione della posizione x , dello stato Ω_s , ma anche del tempo t in maniera diretta: quest'ultima dipendenza tiene conto di effetti di "memoria" del sistema, ossia di come variabili rilevanti per il fenomeno (la larghezza d'alveo ad esempio) si siano evolute fino all'istante di tempo attuale.

Differenziando la $b = b_u(x) + \eta(x, \Omega_s(x, t), t)$ 32 rispetto alla variabile x si ottiene:

$$\frac{db}{dx} = \frac{\partial b_u}{\partial x}(x) + \left. \frac{\partial \eta(x, \Omega_s(x, t), t)}{\partial x} \right|_{\Omega_s, t = \text{cost.}} + \left. \frac{\partial \eta(x, \Omega_s(x, t), t)}{\partial \Omega_s} \right|_{x, t = \text{cost.}} \cdot \frac{\partial \Omega_s}{\partial x}$$

33

Per poter esprimere le derivate del termine η è necessario definire un modello di erosione/deposito.

Considerato che la portata solida sulla sezione viene ottenuta moltiplicando il suo valore per unità di larghezza, fornito dalle comuni formule di trasporto solido, per la larghezza del pelo libero σ_T (cfr. Eq. $Q_s(x, t) = c(x, \Omega(x, t), Q(x, t)) \cdot \sigma_T(x, \Omega(x, t))$ 26).

Un modello molto semplice si ottiene partendo dall'ipotesi che tutta la parte di sezione sommersa si eroda o si depositi in maniera uniforme, traslando lungo la verticale in maniera rigida. Tale ipotesi è esatta nel caso di sezioni caratterizzate da profondità e tensioni sul fondo uniformi.

La conservazione della massa solida, porta pertanto a scrivere la seguente relazione tra le variazioni infinitesimali di quota e di area solida nella sezione:

$$d\Omega_s = \sigma_T \cdot d\eta \tag{34}$$

Integrando nel tempo la relazione precedente è possibile scrivere l'espressione della variazione della quota del fondo alveo secondo il modello di erosione di cui sopra:

$$\eta(x, \Omega_s, t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma_T(x, t)} \cdot \frac{\partial \Omega_s}{\partial t} dt \tag{35}$$

Ipotizzando di conoscere la variazione del fondo η_0 e la larghezza del pelo libero σ_{T0} in un istante di tempo t_0 , precedente e sufficientemente vicino a t , è possibile effettuare un'approssimazione al primo ordine dell'equazione

$$\eta(x, \Omega_s, t) = \int_0^t \frac{1}{\sigma_T(x, t)} \cdot \frac{\partial \Omega_s}{\partial t} dt \tag{35}$$

$$\eta(x, \Omega_s, t) = \eta_0(x) + \frac{\Omega_s(x, t) - \Omega_s(x, t_0)}{\sigma_{T0}(x)} \tag{36}$$

Utilizzando l'equazione precedente all'interno della

$$\frac{db}{dx} = \frac{\partial b_u}{\partial x}(x) + \frac{\partial \eta(x, \Omega_s(x, t), t)}{\partial x} \Big|_{\Omega_s, t = cost.} + \frac{\partial \eta(x, \Omega_s(x, t), t)}{\partial \Omega_s} \Big|_{x, t = cost.} \cdot \frac{\partial \Omega_s}{\partial x} \tag{33}$$
dopo

alcune semplificazioni si ottiene l'espressione:

$$\frac{db}{dx} = \frac{\partial b_u}{\partial x} + \frac{1}{\sigma_T} \cdot \frac{\partial \Omega_s(x, t)}{\partial x} - \frac{b - b_0}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\partial \sigma_{T0}}{\partial x} \tag{37}$$

Ove:

- b_0 rappresenta la quota del fondo alveo della sezione al tempo t_0 .

Una volta sostituita l'equazione $\frac{db}{dx} = \frac{\partial b_u}{\partial x} + \frac{1}{\sigma_T} \cdot \frac{\partial \Omega_s(x,t)}{\partial x} - \frac{b-b_0}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\partial \sigma_{T0}}{\partial x}$

37

all'interno

della

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta(x, \Omega) \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \sigma dz \right) = -g\Omega \frac{db}{dx} - g\Omega j + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz$$

è

22

possibile accoppiare la dinamica della fase liquida con quella della fase solida.

Nonostante il fatto che il modello di erosione utilizzato sia piuttosto semplice, è importante osservare che esso viene inserito nel quadro della modellazione dei canali compositi di cui al paragrafo 4.2: l'alveo inciso è nella maggior parte dei casi completamente sommerso e caratterizzato da profondità d'acqua con basse variazioni percentuali sulla sezione, per lo meno per le portate in grado di generare un trasporto solido significativo; ciò rende gli errori indotti dalle approssimazioni insite nel modello di erosione di un ordine di grandezza comparabile a quello degli errori tipici delle formule di trasporto solido.

4.4 Schema numerico

Le equazioni che descrivono il modello sono risolte per via numerica attraverso uno schema esplicito a volumi finiti. L'integrazione numerica permette di ricavare un'approssimazione dei valori delle medie integrali delle variabili di stato sulla cella che, nel caso in questione, corrisponde ad un tronco d'alveo compreso tra due sezioni adiacenti.

L'insieme delle equazioni di base viene scritto nella forma seguente:

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + \frac{dF(x,W)}{dx} = B(x,W) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} + S(x,W)$$

38

Ove:

- W rappresenta il vettore delle variabili di stato.

- F rappresenta il vettore di flusso.
- B rappresenta la matrice di accoppiamento del sistema.
- S rappresenta il termine sorgente.

Le equazioni utilizzate sono le equazioni $\frac{\partial \Omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$ 20,

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{d}{dx} \left(\beta(x, \Omega) \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \sigma dz \right) = -g\Omega \frac{db}{dx} - g\Omega j + \int_0^{h(x, \Omega)} g(h(x, \Omega) - z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz$$

21 e

$$\frac{\partial \Omega_s}{\partial t} + \frac{1}{e} \cdot \frac{dQ_s}{dx} = 0$$

25 implementate secondo quanto descritto nei paragrafi 4.2

e 4.3. Pertanto i termini dell'equazione

$$\frac{\partial W(x, t)}{\partial t} + \frac{dF(x, W)}{dx} = B(x, W) \cdot \frac{\partial W(x, t)}{\partial x} + S(x, W)$$

38 risultano essere i

seguenti:

$$W = \begin{pmatrix} \Omega \\ Q \\ \Omega_s \end{pmatrix} \quad 39$$

$$F = \begin{pmatrix} Q \\ \beta \frac{Q^2}{\Omega} + \int_0^h g (h-z) \sigma dz \\ \frac{Q_s}{e} \end{pmatrix} \quad 40$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{g\Omega}{\sigma_T} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad 41$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 \\ -g\Omega \left(\frac{\partial b_0}{\partial x} - \frac{b-b_0}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\partial \sigma_{T0}}{\partial x} + \frac{Q^2}{\Omega^2 k_s^2 R^{4/3}} \right) + \int_0^h g (h-z) \frac{\partial \sigma}{\partial x} dz \\ 0 \end{pmatrix} \quad 42$$

La prima e la terza componente del vettore di flusso F , rappresentano i flussi di massa (liquida e solida rispettivamente) attraverso la sezione. La seconda componente invece, nota anche come spinta dinamica della corrente, corrisponde al flusso di quantità di moto.

Per quanto riguarda il termine sorgente S , soltanto la seconda componente è non nulla. La prima parte di essa, rappresenta la "produzione" o la "distruzione" di quantità di moto sulla sezione dovuta alla pendenza dell'alveo, ad altri termini legati a fenomeni locali di erosione/deposito ed all'attrito. La seconda parte rappresenta il contributo dovuto alle pareti laterali della sezione ed è non nulla soltanto nel caso in cui essa non sia di forma costante, ma presenti allargamenti o restringimenti.

Il significato del termine di accoppiamento B viene discusso più avanti nel paragrafo.

Lo schema numerico utilizzato per la soluzione delle equazioni di cui sopra è basato sulla soluzione del problema di Riemann, ossia nella soluzione del sistema a partire da una condizione iniziale costituita da variabili di stato che presentano una discontinuità all'interfaccia tra celle adiacenti. Per questo motivo esso è in grado di risolvere con una bassa diffusione numerica le onde di shock, tipiche dei problemi di tipo iperbolico. Le equazioni utilizzate (Shallow water ed equazione di continuità dei sedimenti), appartengono a questa classe di problemi e le onde di shock da esse prodotte sono rappresentate dal noto fenomeno del risalto idraulico, che è pertanto risolto correttamente dallo schema utilizzato. Per maggiori dettagli sul problema di Riemann si rimanda a [35].

Quando, come in questo caso, le equazioni Shallow water vengono accoppiate con l'equazione di continuità dei sedimenti, il problema diventa di tipo non conservativo: non è più possibile descrivere il sistema unicamente in termini di flussi numerici F ed eventuali termini sorgente S , ma è necessario aggiungere un termine di accoppiamento, rappresentato dalla matrice B .

Problemi di tipo conservativo (es. equazioni Shallow water a fondo fisso) non hanno termini di accoppiamento ed in presenza di discontinuità sulle variabili di stato valgono le relazioni di Rankine-Hugoniot che legano tra di loro la velocità di propagazione della discontinuità, i flussi ed i valori dello stato sui due lati di essa:

$$F_R - F_L = \zeta \cdot (W_R - W_L) \quad 43$$

Ove:

- I pedici L ed R indicano, rispettivamente, i lati sinistro e destro della discontinuità.
- ζ rappresenta la velocità di propagazione della discontinuità.

Nel caso di un risalto idraulico in condizioni stazionarie $\xi=0$ la $F_R - F_L = \zeta \cdot (W_R - W_L)$ 43 si traduce nella relazione di uguaglianza delle spinte a monte ed a valle di esso per la determinazione delle altezze d'acqua coniugate.

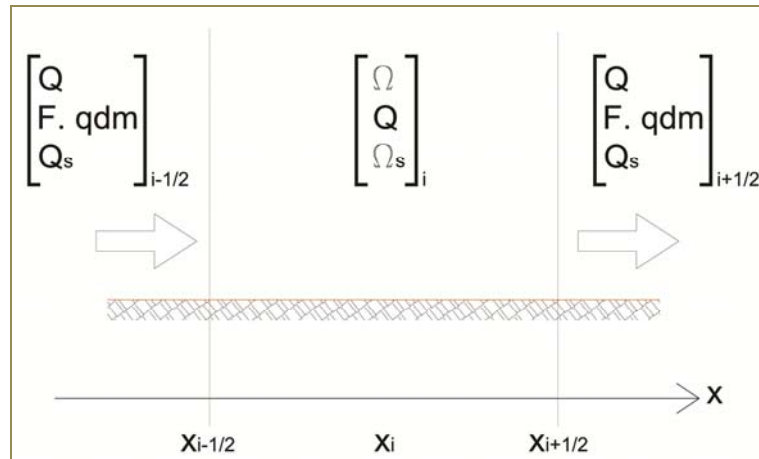


Figura 58 Notazione per schemi numerici ai volumi finiti per la risoluzione delle equazioni Shallow Water a fondo mobile .

Con riferimento alla Figura 58, uno schema numerico esplicito di tipo conservativo (valido quindi per sistemi conservativi) può essere scritto nella forma seguente, trascurando per il momento la presenza di termini sorgente:

$$W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \cdot (F_{i+1/2} - F_{i-1/2}) \quad 44$$

Ove:

- W_i^n rappresenta l'approssimazione numerica della media integrale della variabile di stato W , nella cella x_i al tempo t^n .
- Δt rappresenta il passo temporale dello schema numerico.
- Δx_i rappresenta l'ampiezza della cella x_i .
- $F_{i+1/2}$ rappresenta un'approssimazione numerica del flusso attraverso l'interfaccia $i+1/2$ della cella. Tale approssimazione dipende dal tipo di solutore di Riemann utilizzato.

Per maggiori dettagli sugli schemi numerici conservativi si rimanda [35].

Nel caso di problemi non conservativi, come quello in questione, le relazioni classiche di Rankine-Hugoniot non valgono più ma valgono altre relazioni, dette relazioni generalizzate di Rankine-Hugoniot, per le quali è necessaria la definizione di un percorso nello spazio delle variabili di stato che unisca i vettori W_L e W_R . Se si indica con J la matrice Jacobiana del flusso F e con V il vettore che descrive la variazione del flusso dovuta unicamente a variazioni della geometria (e non dello stato) del sistema, ossia:

$$J = \left. \frac{\partial F}{\partial W} \right|_{x=\text{cost.}} \quad 45$$

$$V = \left. \frac{\partial F}{\partial x} \right|_{W=\text{cost.}} \quad 46$$

è possibile scrivere la $\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + \frac{dF(x,W)}{dx} = B(x,W) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} + S(x,W)$

38 nella forma seguente:

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + (J(x,W) - B(x,W)) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} = S(x,W) - V(x,W) \quad 47$$

Definendo infine

$$A(x,W) = J(x,W) - B(x,W) \quad 48$$

$$S^*(x,W) = S(x,W) - V(x,W) \quad 49$$

La $\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + (J(x,W) - B(x,W)) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} = S(x,W) - V(x,W)$ 47 prende la

forma:

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + A(x,W) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} = S^*(x,W) \quad 50$$

Nel modello, il percorso utilizzato per unire i vettori di stato ai due lati dell'interfaccia è un percorso lineare nello spazio degli stati, ossia:

$$\Psi(s, W_L, W_R) = W_L + s \cdot (W_R - W_L) \quad s \in [0,1] \quad 51$$

e, sulla base di esso, le condizioni generalizzate di Rankine-Hugoniot si scrivono nella forma seguente:

$$\int_0^1 A(x_L + s \cdot (x_R - x_L), \Psi(s, W_L, W_R)) \cdot \frac{\partial \Psi(s, W_L, W_R)}{\partial s} ds = \zeta \cdot (W_R - W_L) \quad 52$$

In questa maniera, la celerità calcolata per le onde di shock dipende dal percorso scelto per collegare gli stati ai due lati dell'interfaccia e non dipende più, al contrario di quanto accade per i sistemi conservativi, unicamente dai valori degli stati. In ogni caso, la scelta del percorso lineare, oltre ad essere semplice dal punto di vista computazionale, permette un'accuratezza sufficiente per le applicazioni pratiche [7].

Gli schemi basati sulla scelta di un percorso tra gli stati ai lati delle interfacce permettono la risoluzione numerica dei sistemi non conservativi e sono detti path-conservativi, dipendendo appunto dalla scelta del percorso. Per maggiori dettagli su questa tipologia di schemi si rimanda a [7].

Il modello REMo utilizza uno schema path-conservativo con percorso lineare ed il solutore approssimato di Roe [34].

Per il problema di Riemann all'interfaccia, esso può essere sempre scritto nella forma $W_i^{n+1} = W_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \cdot (F_{i+1/2} - F_{i-1/2})$ ove però i termini $F_{i\pm 1/2}$ rappresentano dei flussi numerici generalizzati che tengono conto, oltre che del flusso F , anche del termine di accoppiamento B e del termine sorgente S .

Con riferimento alla Figura 58, essi vengono scritti nella forma seguente:

$$F_{i+1/2} = F_i + A_{i+1/2}^- \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) - P_{i+1/2}^- \cdot S_{i+1/2}^* \cdot (x_{i+1} - x_i) \quad 53$$

$$F_{i-1/2} = F_i - A_{i+1/2}^+ \cdot (W_i^n - W_{i-1}^n) + P_{i-1/2}^+ \cdot S_{i-1/2}^* \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad 54$$

Le modalità con le quali i tre termini che compongono il flusso numerico $F_{i+1/2}$ vengono calcolati sono indicate in Appendice A.

Il primo termine rappresenta un approssimazione del flusso F centrata sulla cella, il secondo rappresenta il termine di upwinding del flusso, che utilizza le informazioni relative alla direzione di propagazione delle onde, mentre il terzo termine rappresenta la discretizzazione numerica del termine sorgente S^* . Le matrici P^+ e P^- hanno una funzione di upwinding del termine sorgente: il loro utilizzo è necessario per fare in modo che lo schema numerico sia well-balanced, ossia in grado di riprodurre le soluzioni stazionarie del sistema.

4.5 Implementazione del modello

Il modello REMo è stato utilizzato per la modellazione a fondo mobile del fiume Ombrone grossetano.

Il tratto di interesse, riportato in planimetria nelle Tavole OMB 1.1 - OMB 1.6, si estende per circa 70 Km a partire dall'abitato di Sasso d'Ombrone (GR) fino alla foce nel Mar Tirreno, situata poco a sud dell'abitato di Principina a Mare (GR).

La modellazione a fondo mobile ha come fine ultimo quello di ottenere utili indicazioni sul comportamento del fiume, permettendo:

- L'analisi delle dinamiche del fiume su brevi archi temporali, in relazione al passaggio di onde di piena significative.
- La valutazione degli effetti sul rischio idraulico dovuti alla mobilità del fondo, con particolare riferimento ad i fenomeni di sovralluvionamento ed alla determinazione dei livelli idraulici in alveo.
- L'effettuazione di confronti tra l'evoluzione morfologica dell'alveo a lungo termine, desunta dai bilanci sedimentologici di cui al par. 3.1 e l'evoluzione a scala di evento.

Ai fini delle modellazioni numeriche effettuate, il tratto di interesse è stato suddiviso in due sottotratti, separati dalla traversa della Steccaia, ubicata in prossimità della città di Grosseto.

Le caratteristiche principali dei sottotratti sono elencate nella tabella seguente:

Tabella 21 Definizione dei sottotratti utilizzati per la modellazione numerica a fondo mobile.

	Estensione	Sezione iniziale	Sezione finale	Lunghezza [Km]
Tratto di monte (M)	Da: Sasso d'Ombrone (GR) A: Traversa della Steccaia	OM0216	OM0080	40
Tratto di valle (V)	Da: Traversa della Steccaia A: Foce	OM0080	OM00009	30

4.5.1 Geometria

La geometria delle sezioni utilizzate nella modellazione è stata desunta a partire dai rilievi topografici del 1999 e dai rilievi LIDAR 2012 forniti dagli Uffici del Genio Civile della Regione Toscana.

In particolare, i rilievi topografici sono stati utilizzati per la definizione della geometria delle sezioni dell'alveo inciso, mentre i profili delle aree golenali sono stati desunti dai dati LIDAR.

Le tracce planimetriche delle sezioni utilizzate nelle varie simulazioni sono riportate nelle Tavole OMB 1.1 - OMB 1.6.

L'estensione delle tracce di sezione nelle aree golenali deve essere sufficientemente ampia, in modo tale da comprendere le aree allagate in occasione degli eventi di piena che si desidera riprodurre o simulare. Per la definizione dell'estensione delle aree golenali, oltre a prendere in considerazione la topografia della zona, è stata consultata la Carta di Tutela del Territorio del Piano di Assetto Idrogeologico del Bacino Regionale Ombrone, che riporta sia le perimetrazioni delle aree allagate da eventi con tempo di ritorno fino a 200 anni che quelle delle aree allagate dagli eventi di piena verificatisi nel bacino in data 29/10/2004 e 04/12/2004.

Nelle simulazioni condotte, per poter ottenere un sufficiente livello di dettaglio nei risultati, è risultato necessario interpolare delle sezioni intermedie a quelle rilevate. Il passo di risoluzione spaziale utilizzato è stato pari a circa 200 m.

4.5.2 Calibrazione del modello

La fase di calibrazione ha lo scopo di determinare i parametri di scabrezza dell'alveo e delle golene, ai fini della corretta simulazione dei livelli idrici in concomitanza delle portate osservate.

A tal fine, è necessario disporre di rilevazioni congiunte di portate e livelli idraulici in alveo in occasione di eventi di piena pregressi, attraverso dati idrometrici (scale di deflusso) o rilievi delle tracce di piena.

Sebbene sia possibile ottenere a priori dei valori di scabrezza in funzione delle caratteristiche dell'alveo (granulometria, tipologia d'alveo, geometria ecc.), la possibilità di effettuare una taratura ad hoc di tali valori, qualora siano disponibili registrazioni congiunte di portate e di livelli, permette di ottenere una maggiore affidabilità nei risultati.

La fase di calibrazione del modello ha permesso di ottenere i valori più appropriati per le scabrezze delle aree golenali e dell'alveo inciso.

Essa è avvenuta secondo due modalità differenti per le basse e le alte portate, come meglio specificato di seguito.

Calibrazione per le basse portate

La taratura è avvenuta utilizzando le scale di deflusso di Berrettino, Ponte d'Istia e Sasso d'Ombrone, la cui ubicazione in planimetria è riportata nelle Tavole OMB 1.1, 1-4 e 1-5. Le portate scelte per la taratura sono pari a 300 m³/s e 600 m³/s. Le simulazioni sono state eseguite utilizzando il software Hec-Ras v. 4.1.0.

Le portate utilizzate non determinano livelli idraulici che interessano le aree golenali dell'alveo e di conseguenza i fenomeni di laminazione che si verificano sono del tutto trascurabili: ciò permette di effettuare delle simulazioni in moto permanente piuttosto che in moto vario.

Per quanto riguarda le scale di deflusso di Berrettino e Ponte d'Istia, sono disponibili delle scale di deflusso ricostruite, calcolate nello studio [29].

I loro andamenti sono riportati nelle figure seguenti:

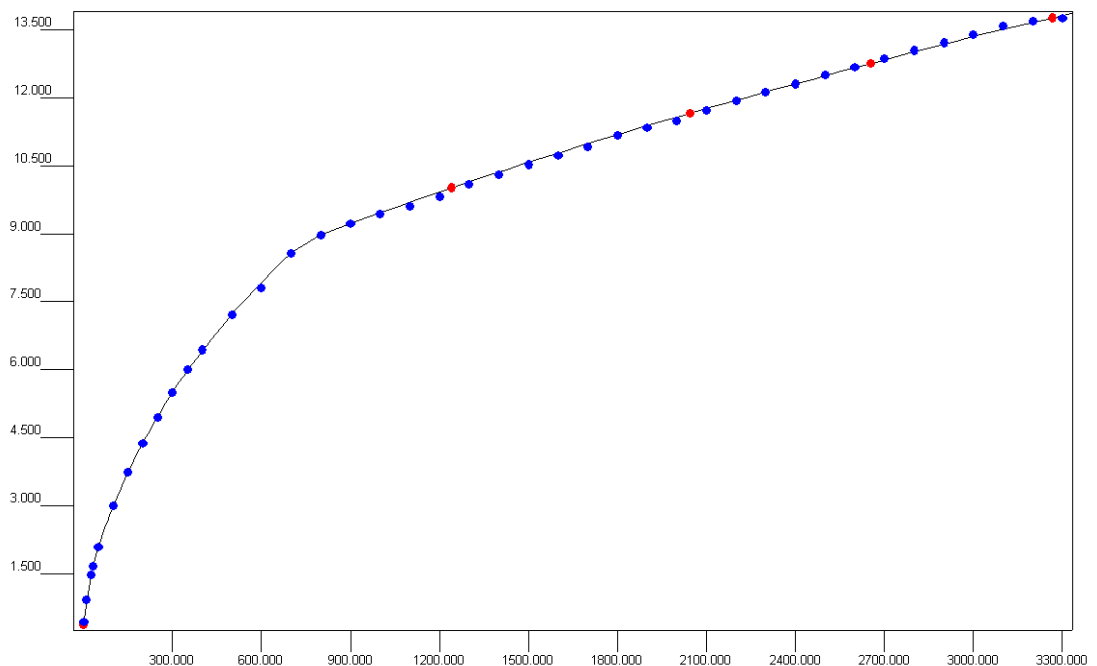


Figura 59 Scala di deflusso a Berrettino. In ascissa sono riportate le portate [m³/s], mentre in ordinata le altezze sopra lo zero idrometrico [m]. La quota dello zero idrometrico per la stazione è pari 1.98 m slm. Grafico tratto dallo studio [29].

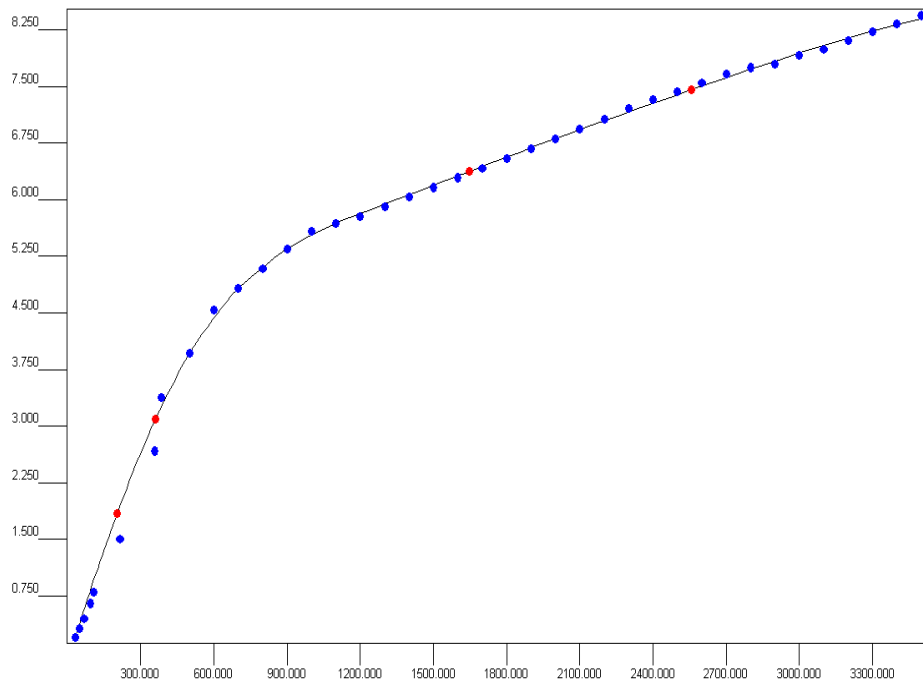


Figura 60 Scala di deflusso a Ponte d'Istia. In ascissa sono riportate le portate [m^3/s], mentre in ordinata le altezze sopra lo zero idrometrico [m]. La quota dello zero idrometrico per la stazione è pari 12.07 m s.l.m. Grafico tratto dallo studio [29].

La scala di deflusso della stazione di Sasso d'Ombrone può essere invece reperita sul database del Servizio Idrologico Regionale della Regione Toscana (www.sir.toscana.it). Il suo andamento è riportato nella figura seguente:

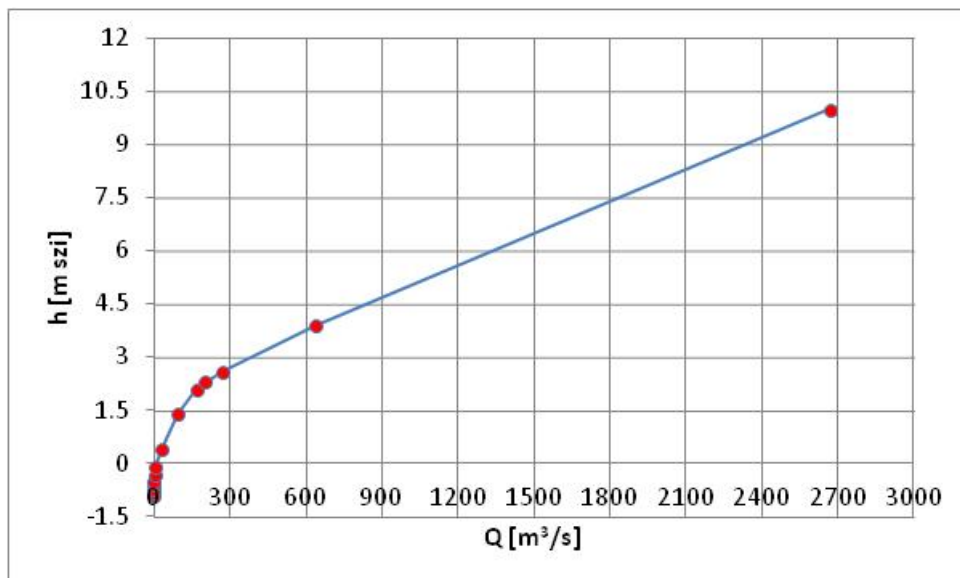


Figura 61 Scala di deflusso a Sasso d'Ombrone. La quota dello zero idrometrico per la stazione è pari a 54.68 m s.l.m.

Si riporta infine una tabella riassuntiva con i principali dati relativi alla stazione:

Tabella 22 Caratteristiche principali delle stazioni idrometriche utilizzate per la taratura del modello alle basse portate.

Stazione	Sezione di riferimento (cfr. Tavole OMB 1.1- 1.6)	Quota zero idrometrico [m slm]
Berrettino	OM0046	1.98
Ponte d'Istia	OM0090	12.07
Sasso d'Ombrone	OM0212	54.68

Sono state effettuate simulazioni per i due valori di portata considerati, utilizzando valori di scabrezza per l'alveo inciso pari, nell'ordine, a $k_s=25 m^{1/3}/s$ e $k_s=30 m^{1/3}/s$.

Come condizione al contorno di valle per il tratto di valle è stato utilizzato un valore di 0.70 m per il livello idraulico, al fine di imporre la quota del mare in condizioni di alta marea. Nonostante la condizione sia di incerta determinazione, essa non ha avuto influenza sui livelli simulati per la stazione idrometrica più a monte (Berrettino), che si trova a circa 20 Km dalla foce.

Come condizione al contorno di valle per il tratto di monte è stata utilizzata l'altezza di corrente critica in corrispondenza della sezione della traversa della Steccaia. Tale condizione è invece piuttosto rappresentativa delle condizioni reali, tenuto conto che la traversa realizza un salto di fondo pari a circa 5 m. In ogni caso, la stazione idrometrica più a monte (Ponte d'Istia), si trova a circa 3 Km dalla traversa della Steccaia.

In tutte le simulazioni, la corrente è risultata di tipo subcritico e la condizione al contorno imposta a monte (altezza di moto uniforme) è risultata ininfluente ai fini della determinazione dei livelli.

I risultati sintetici delle simulazioni condotte sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 23 Risultati sintetici della simulazioni condotte in moto permanente per la calibrazione del modello alle basse portate.

Stazione	Livelli per $Q = 300 - 600 \text{ m}^3/\text{s}$ [m slm]	Livelli simulati (k_s $= 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) [m slm]	Livelli simulati (k_s $= 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) [m slm]	Errore medio (k_s $= 25$ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$) [m]	Errore medio (k_s $= 30$ $\text{m}^{1/3}/\text{s}$) [m]
Berrettino	7.48	7.75	7.20	+ 0.23	-0.34
	9.88	10.06	9.49		
Ponte d'Istia	14.68	14.75	14.43	+ 0.06	-0.32
	16.47	16.52	16.08		
Sasso d'Ombrone	57.37	57.40	57.05	+ 0.23	-0.17
	58.41	58.83	58.39		

Come si vede dai risultati di Tabella 23, le simulazioni con coefficiente di scabrezza $k_s=25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, tendono ad una sovrastima dei livelli idraulici, mentre quelle con coefficiente di scabrezza $k_s=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, tendono ad una sottostima, di carattere leggermente più marcato.

Viene assunto come coefficiente di scabrezza per la basse portate il valore di $k_s=25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Esso potrebbe essere sicuramente più affinato effettuando delle simulazioni con un coefficiente intermedio tra $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$: in ogni caso ciò esula dalle finalità del presente lavoro e viene presa in considerazione l'indicazione di massima di cui sopra.

Calibrazione per le alte portate

Per la taratura del modello, sono stati presi in considerazione gli eventi di piena verificatisi nel bacino in data 29/10/2004 e 04/12/2004, dal momento che per essi sono disponibili delle registrazioni congiunte di portate e livelli. Entrambi gli eventi hanno interessato le aree golenali del fiume e permettono quindi anche la taratura del coefficiente di scabrezza loro associato. Nelle figure

seguenti sono riportati gli idrogrammi di portata relativi alle stazioni idrometriche di Ponte d'Istia e Sasso d'Ombrone in occasione dei due eventi piena considerati.

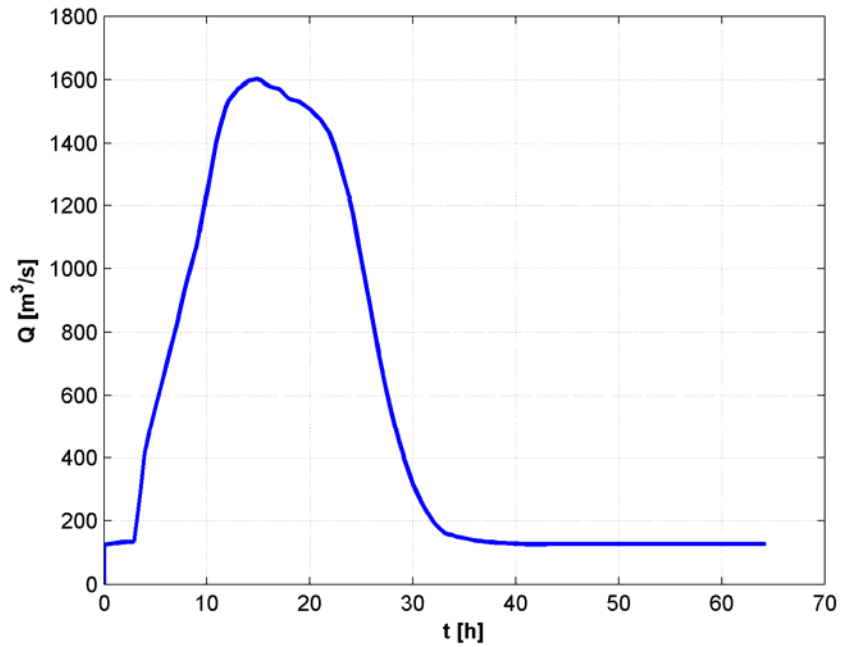


Figura 62 Idrogramma delle portate relativo alla stazione idrometrica di Ponte d'Istia in occasione dell'evento di piena del 29/10/2004.

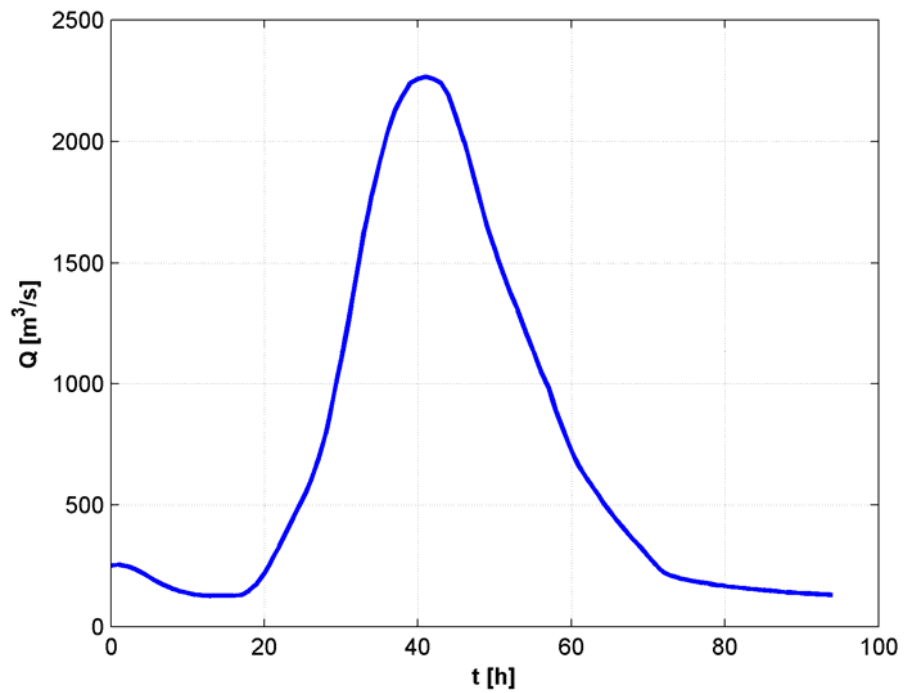


Figura 63 Idrogramma delle portate relativo alla stazione idrometrica di Ponte d'Istia in occasione dell'evento di piena del 04/12/2004.

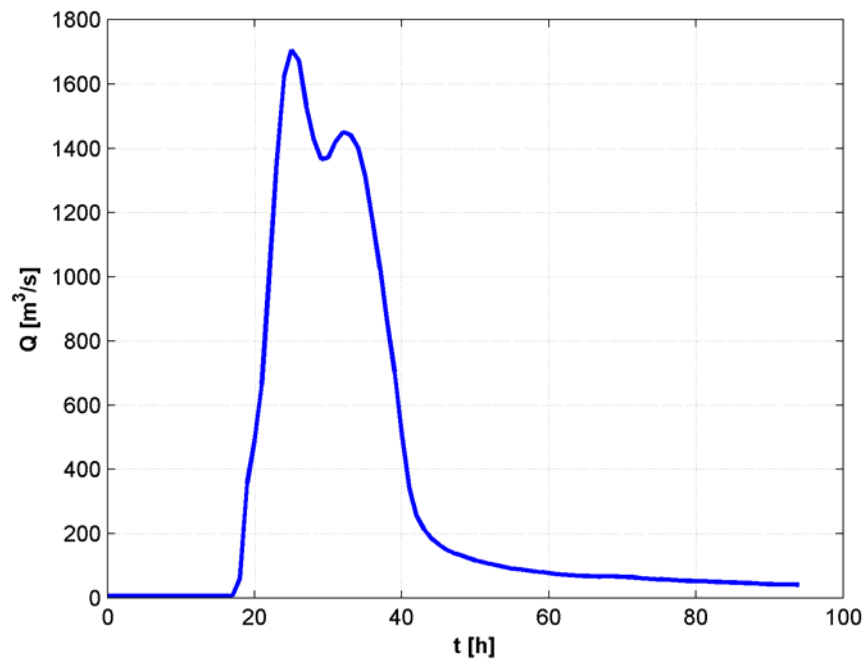


Figura 64 Idrogramma delle portate relativo alla stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone in occasione dell'evento di piena del 29/10/2004.

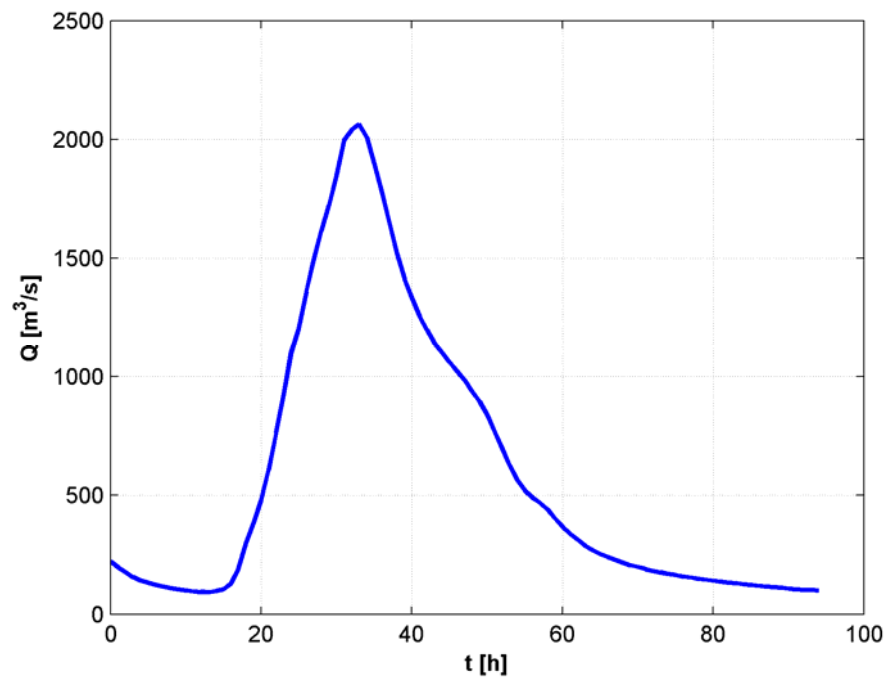


Figura 65 idrogramma delle portate relative alla stazione idrometrica di Sasso d'Ombrone in occasione dell'evento di piena del 04/12/2004.

La tabella seguente riporta alcuni parametri sintetici relativi ai due idrogrammi:

Tabella 24 Parametri sintetici degli idrogrammi relativi agli eventi del 2004

Evento	Stazione	Portata al colmo [m³/s]	Tempo di picco [h]	Durata evento [ore]
29/10/2004	Ponte d'Istia	1602	15	≈30
04/12/2004	Ponte d'Istia	2266	41	≈50
29/10/2004	Sasso d'Ombrone	1706	25	≈30
04/12/2004	Sasso d'Ombrone	2065	33	≈50

Relativamente a questi due eventi, sono disponibili i rilievi delle tracce di piena effettuati dagli Uffici della Regione Toscana, riportate nello studio [33].

Con riferimento alla planimetria di cui alle Tavole OMB 1.1 - OMB 1.6, i valori delle tracce rilevate sono elencate nella tabella seguente:

Tabella 25 Tracce di piena relative agli eventi del 29/10/2004 e 04/12/2004.

Sezione	Descrizione	Traccia evento del 29/10/2004 [m slm]	Traccia evento del 04/12/2004 [m slm]
OM0005	Sezione a circa 7 Km dalla foce	4.52	
OM0032	Ponte Ferrovia Grosseto-Roma	9.84	
OM0039	Ponte SS Aurelia	9.90	
OM0046	Idrometro Berrettino	10.20	10.59
OM0090	Idrometro Ponte d'Istia	18.39	19.19
OM0140	Passerella Acquedotto del Fiora	29.90	
OM0157	Ponte per Campagnatico	34.50	
OM0212	Idrometro Sasso d'Ombro	61.58	62.21

Tra gli ulteriori dati disponibili che sono stati utilizzati per la taratura, vi sono le registrazioni dei livelli idraulici effettuate alla stazione di Ponte d'Istia per i due eventi. Essi sono riportati nelle figure Figura 66 e Figura 67.

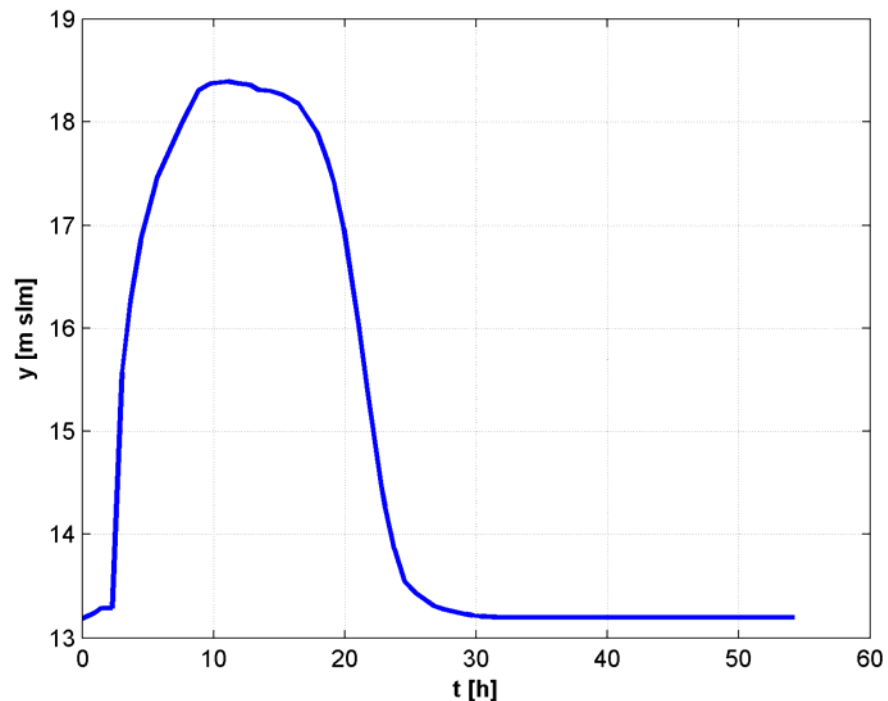


Figura 66 Registrazione dei livelli alla stazione idrometrica di Ponte d'Istia in occasione dell'evento di piena del 29/10/2004.

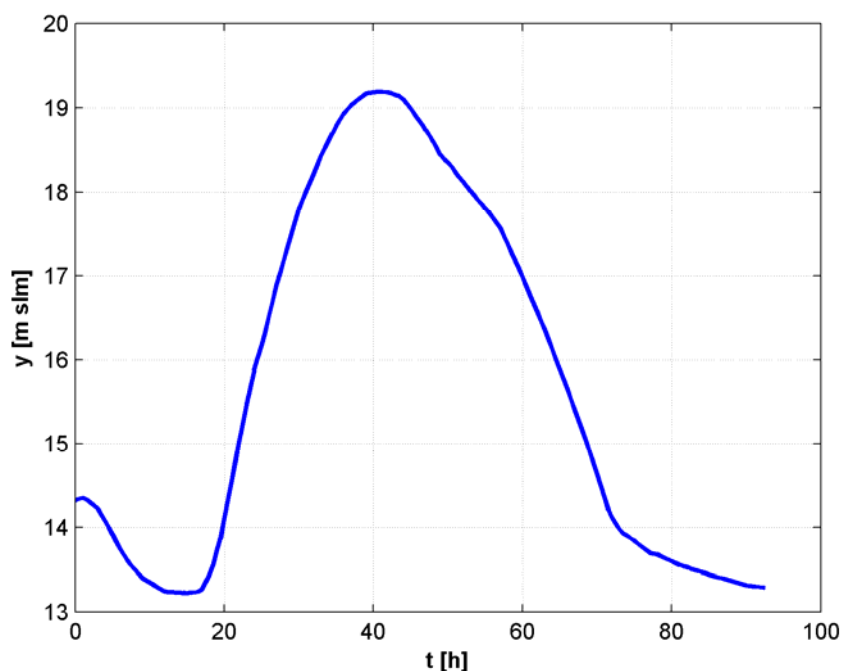


Figura 67 Registrazione dei livelli alla stazione idrometrica di Ponte d'Istia in occasione dell'evento di piena del 04/12/2004

Considerata la maggiore consistenza dei dati relativi all'evento del 29/10/2004, la taratura dei coefficienti di scabrezza è stata effettuata basandosi su di essi. I dati relativi all'evento del 04/12/2004 sono stati utilizzati per una ulteriore verifica dei valori ottenuti.

Sono state eseguite varie simulazioni a fondo fisso, variando i coefficienti di scabrezza dell'alveo inciso e delle aree golenali, relativamente ai due sottotratti di cui al paragrafo 4.5 I parametri delle simulazioni sono indicati nella tabella seguente:

Tabella 26 Parametri utilizzati nelle simulazioni per la taratura dei coefficienti di scabrezza del modello.

Codice simulazione	Tratto di riferimento	k_s alveo inciso [$m^{1/3}/s$]	k_s golene [$m^{1/3}/s$]	Idrogramma portate	Condizione di valle (livelli idraulici)
10M	Monte (fino a sezione OM0090 compresa)	25	10	Evento 29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	Evento 29/10/2004 registrato Ponte d'Istia
11M	Monte (fino	25	14	Evento	Evento

Codice simulazione	Tratto di riferimento	k_s alveo inciso [$m^{1/3}/s$]	k_s golene [$m^{1/3}/s$]	Idrogramma portate	Condizione di valle (livelli idraulici)
	a sezione OM0090 compresa)			29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	29/10/2004 registrato Ponte d'Istia
12M	Monte (fino a sezione OM0090 compresa)	25	18	Evento 29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	Evento 29/10/2004 registrato Ponte d'Istia
16M	Monte (fino a sezione OM0090 compresa)	30	18	Evento 29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	Evento 29/10/2004 registrato Ponte d'Istia
04V	Valle	25	18	Evento 29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	Livello del mare (0.70 m slm costante)
05V	Valle	30	18	Evento 29/10/2004 registrato a Ponte d'Istia	Livello del mare (0.70 m slm costante)

Da un confronto tra gli idrogrammi dell'evento relativi alle stazioni di Ponte d'Istia e Sasso d'Ombrone (Figura 63 e Figura 65) possibile notare come essi siano molto simili, in quanto a durata e valori di picco: durante l'evento del 29/10/2004, la capacità di laminazione dell'alveo, che tende ad abbassare i valori di portata al colmo, si è sostanzialmente bilanciata con gli afflussi di portata liquida provenienti dagli affluenti compresi tra le due stazioni, con il risultato che non si sono verificati significativi cambi tra i due idrogrammi.

Alla luce di queste considerazioni, le portate dell'idrogramma registrato a Ponte d'Istia sono state utilizzate come ingressi per il tratto di monte.

È stato necessario ripristinare nelle simulazioni numeriche, l'accoppiamento portate-livelli registrato a Ponte d'Istia durante l'evento, che viene perso utilizzando l'idrogramma di tale stazione in ingresso alla sezione di monte del tratto, da essa distante circa 37 Km. A tal fine, la scala temporale dell'idrogramma di portata è stata traslata, anticipandola rispetto a quella dei

livelli, in modo da tener conto dei tempi di propagazione dell'onda tra Sasso d'Ombrone e Ponte d'Istia.

Utilizzando i dati di Tabella 24, l'idrogramma di portata è stato anticipato di 10 ore rispetto a quello dei livelli, ossia di una quantità pari al ritardo di fase dei picchi di piena misurato tra le due stazioni. L'approssimazione è ragionevole dal momento che durante l'evento, i picchi di piena e di livello si sono verificati con uno sfasamento trascurabile alla stazione di Ponte d'Istia (cfr. Figura 62).

In considerazione del fatto che non vi sono più affluenti significativi a valle della stazione di Ponte d'Istia, lo stesso idrogramma è stato utilizzato per le simulazioni relative al tratto di valle.

Per quanto riguarda le simulazioni del tratto di valle, è stato utilizzato come condizione al contorno di valle un valore costante pari a 0.70 m per riprodurre il livello del mare (condizioni di alta marea). Occorre tuttavia specificare che il valore di tale condizione al contorno, seppur incerto, non influenza la simulazione delle tracce di piena, dal momento che la prima traccia disponibile si trova alla sezione OM0005, situata circa 7 Km più a monte.

I risultati relativi alle simulazioni effettuate nel tratto di monte, per quanto riguarda i livelli riprodotti delle tracce di piena sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 27 Livelli di piena simulati nel tratto di monte (evento del 29/10/2004).

		Livelli [m slm]				
		10M	11M	12M	16M	Traccia
Sezi oni	OM0140	30.89	30.70	30.58	30.42	29.90
	OM0157	35.33	35.14	35.02	34.84	34.50
	OM0212	62.36	62.12	61.91	61.33	61.58
Errore medio [m]		+0.87	+0.66	+0.51	+0.20	

La simulazione che meglio riproduce i livelli delle tracce di piena è la simulazione 16M con una sovrastima media dei livelli pari a 0.20 m, nella quale i coefficienti di scabrezza erano stati impostati a $k_s=30 m^{1/3}/s$ per l'alveo inciso, ed a $k_s=18 m^{1/3}/s$ per le aree golenali.

I risultati relativi alle simulazioni effettuate nel tratto di valle, per quanto riguarda i livelli riprodotti delle tracce di piena sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 28 Livelli di piena simulati nel tratto di valle (evento del 29/10/2004).

		Livelli [m slm]		
		04V	05V	Traccia
Sezioni	OM0005	4.80	4.75	4.52
	OM0032	9.66	9.58	9.84
	OM0039	10.59	10.37	9.90
	OM0046	11.99	11.90	10.20
Errore medio [m]		+0.26	+0.15	

Gli errori medi calcolati nell'ultima riga della Tabella 28 non considerano la traccia di piena dell'idrometro di Berrettino (sezione OM0046) che risulta decisamente sovrastimata in ognuna delle simulazioni effettuate.

Tale traccia di piena è stata considerata non affidabile in quanto, come riportato nello studio [33], si tratta di una traccia di piena ricostruita: la massima lettura dello strumento ha dovuto subire una correzione pari a 4.50 m per essere resa congruente con i rilievi delle altre tracce.

A supporto della bontà delle simulazioni effettuate, occorre far notare che i livelli risultanti delle simulazioni condotte nello stesso studio, attraverso un modello a fondo fisso simile al presente, sono del tutto simili a quelli ottenuti in questa sede, anche per quanto riguarda i livelli idrometrici in corrispondenza dell'idrometro di Berrettino.

La simulazione che meglio riproduce i livelli delle tracce di piena è la simulazione 05V con una sovrastima media dei livelli pari a 0.15 m, nella quale i coefficienti di scabrezza erano stati impostati a $k_s=30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per l'alveo inciso, ed a $k_s=18 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per le aree golenali.

Alla luce di quanto emerso dalle simulazioni dei due tratti, i due coefficienti di scabrezza di cui sopra sono stati utilizzati per simulare in condizioni di fondo fisso l'evento di piena del 04/12/2004, al fine di ottenere un'ulteriore conferma

per i valori ottenuti. I parametri relativi alla simulazione sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 29 Parametri utilizzati nella simulazioni dell'evento di piena del 04/12/2004 (tratto di monte).

Codice Simulazione	Tratto di riferimento	k_s alveo inciso [$m^{1/3}/s$]	k_s golene [$m^{1/3}/s$]	Idrogramma portate	Condizione di valle (livelli idraulici)
15M	Monte (fino a sezione OM0090 compresa)	30	18	Evento 04/12/2004 registrato a Ponte d'Istia	Evento 04/12/2004 registrato Ponte d'Istia

Analogamente a quanto effettuato per le simulazioni dell'evento del 29/10/2004, la scala temporale dell'idrogramma di portata è stata traslata, anticipandola rispetto a quella dei livelli, in modo da tener conto dei tempi di propagazione dell'onda tra Sasso d'Ombro e Ponte d'Istia.

Utilizzando i dati di Tabella 24, l'idrogramma di portata è stato anticipato di 8 ore rispetto a quello dei livelli, ossia di una quantità pari al ritardo di fase dei picchi di piena misurato tra le due stazioni. L'approssimazione è ragionevole dal momento che durante l'evento, i picchi di piena e di livello si sono verificati con uno sfasamento trascurabile alla stazione di Ponte d'Istia (cfr. Figura 63 e Figura 67).

Tabella 30 Livelli di piena simulati nel tratto di monte (evento del 04/12/2004).

		Livelli [m slm]	
		15M	Traccia
Sezioni	OM0212	62.53	62.21
Errore [m]		+0.32	

L'errore commesso sulla traccia di piena all'idrometro di Sasso d'Ombro risulta pari a 0.32 m (sovrastima). Si tratta di un errore accettabile e pertanto è possibile ritenere che i coefficienti di scabrezza utilizzati consentono di simulare con buona approssimazione le tracce di piena dei due eventi del 2004.

I valori di scabrezza così tarati saranno utilizzati nelle analisi e nelle simulazioni di cui ai paragrafi successivi. Essi sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 31 Valori dei coefficienti di scabrezza risultanti dalla taratura del modello.

	Alveo inciso	Aree golenali
$k_s [m^{1/3}/s]$	30	18

4.6 Simulazione morfodinamica a scala di evento

L'evento di piena scelto come riferimento per la modellazione a fondo mobile è quello caratterizzato dall'idrogramma di piena con tempo di ritorno **100 anni** a Sasso d'Ombrone.

Si ritiene che l'evoluzione morfologica dell'alveo in occasione di eventi con tempo di ritorno superiore non differisca significativamente da quella che si verifica in occasione dell'evento centennale.

I livelli idrici associati all'evento centennale non sono infatti contenuti in alveo, mentre le aree golenali sono ampiamente inondate. Il trasporto di ulteriori portate, associate ad eventi con tempo di ritorno maggiore, sarebbe in buona parte affidato alle aree golenali, con la conseguenza che l'incremento percentuale di portata liquida trasportata dall'alveo inciso sarebbe inferiore a quello della portata totale associata all'idrogramma. L'entità delle portate solide in gioco, che sono trasportate all'interno dell'alveo inciso, non subirebbe pertanto variazioni significative.

Inoltre, le variazioni percentuali di portata solida si riflettono in maniera ridotta sulle variazioni delle entità dei sovralluvionamenti o delle erosioni dato che questi ultimi non dipendono dall'entità delle portate solide ma dalle differenze relative tra queste nelle sezioni d'alveo.

Le caratteristiche principali dell'idrogramma sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 32 Parametri sintetici dell'idrogramma centennale utilizzato per la simulazione a fondo mobile.

Evento	Stazione	Portata al colmo [m ³ /s]	Tempo di picco [h]	Durata evento [ore]	Volume liquido [Mmc]
T=100 anni (ALTO)	Sasso d'Ombrone	3131	20	≈48	250.2

L'idrogramma con tempo di ritorno 100 anni è stato calcolato alla stazione di Sasso d'Ombrone utilizzando il software ALTO. Esso viene riportato nella Figura 68.

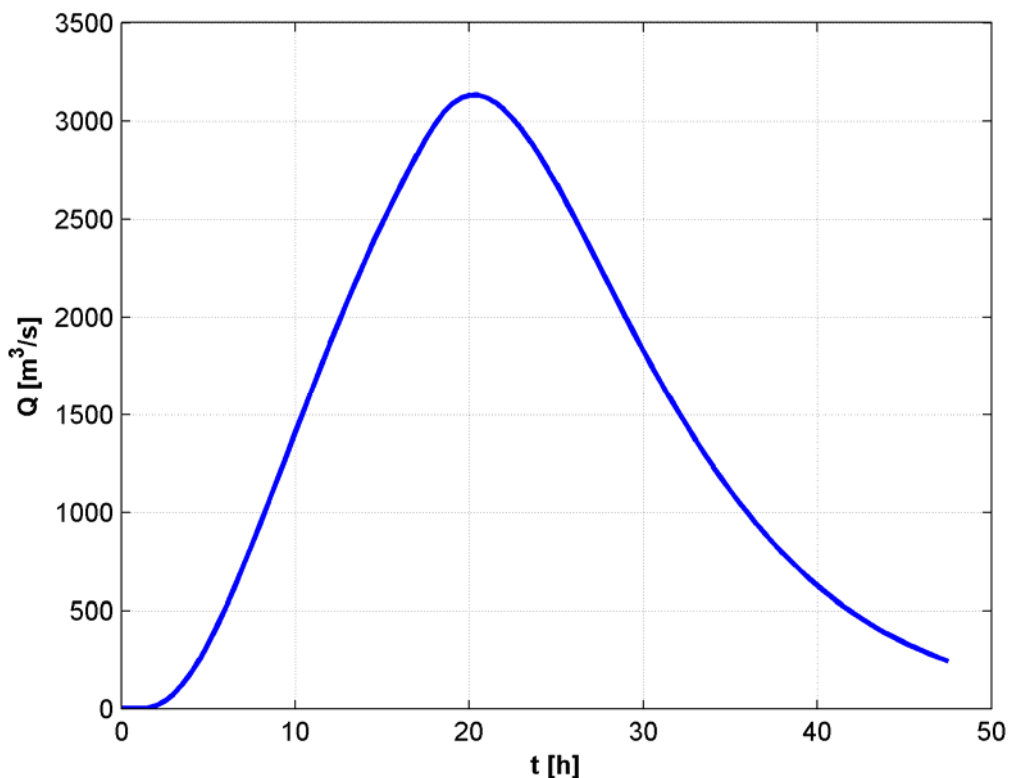


Figura 68 Idrogramma con tempo di ritorno 100 anni a Sasso d'Ombrone.

La portata di picco dell'idrogramma è molto prossima a quella registrata all'idrometro di Sasso d'Ombrone (GR) durante l'evento di piena del 04/11/1966, pari a 3110 m³/s.

4.6.1 Granulometrie e trasporto solido.

Le caratteristiche granulometriche dell'alveo, necessarie per la modellazione a fondo mobile, sono state desunte a partire dai rilievi dei materiali d'alveo effettuati nell'anno 2013, effettuati in seno alle attività dell'accordo di cui il presente studio è parte integrante. Pertanto, per maggiori dettagli riguardo alle misurazioni effettuate si rimanda alla relazione specifica.

Il modello REMo è in grado di implementare più formule di trasporto solido per l'analisi a fondo mobile. Per le simulazioni a fondo mobile, così come per i

bilanci sedimentologici di cui al paragrafo 3.1 è stata utilizzata la formula di Ackers-White: essa è adeguata per la tipologia dell'alveo del fiume Ombrone, caratterizzato da basse pendenze e dalla presenza di grosse percentuali di materiale sabbioso sul fondo. Per maggiori dettagli sulla formula si rimanda a quanto descritto nel paragrafo 2.2.

In questa fase, contrariamente a quanto effettuato in occasione del bilancio sedimentologico, la formula è stata applicata senza utilizzare il fattore di hiding che permette di considerare gli effetti della granulometria d'alveo variabile.

Pertanto, la formula di Ackers-White, nella sua versione classica prevede l'utilizzo del diametro D_{35} della mistura. Nella tabella seguente, sono riportati i valori del diametro D_{35} utilizzati nelle simulazioni con l'indicazione delle sezioni d'alveo corrispondenti all'ubicazione del rilievo.

Tabella 33 Parametri sedimentologici utilizzati per le simulazioni a fondo mobile.

Sezione	Codice Rilievo	D_{35} [mm]
OM0212	13-1	20.00
OM0198	13-2	9.20
OM0156	13-3	2.50
OM0136	13-4	6.30
OM0117	13-5	13.30
OM0088	13-6	5.90
OM0019	13-7	0.28
OM0003	13-8	0.23
OM00009	13-9	0.19

Ai fini della modellazione, i diametri indicati in tabella sono stati assegnati alle corrispondenti sezioni. I valori dei diametri assegnati alle sezioni intermedie sono stati ricavati attraverso interpolazione lineare sui diametri rilevati.

La densità del materiale solido è stata assunta pari a 2400 Kg/m³.

4.6.2 Le simulazioni effettuate.

A partire dall'idrogramma centennale di cui al paragrafo precedente, sono state condotte simulazioni a fondo mobile del tratto del Fiume Ombrone a monte e a valle della traversa della Steccaia.

Per effettuare simulazioni a fondo mobile è necessario fornire al modello una condizione al contorno per la sezione di valle e due condizioni al contorno per quella di monte.

Ciò dipende dalla struttura delle equazioni *Shallow Water* accoppiate che, nel caso di fondo mobile, hanno sempre due onde caratteristiche che si propagano verso valle ed una che si propaga verso monte, indipendentemente dal fatto che la corrente sia di tipo subcritico o supercritico. La differenza sostanziale tra i due stati della corrente, in condizioni di fondo mobile, sta nelle modalità con le quali le variabili di stato del sistema vengono trasportate dalle caratteristiche, ossia:

- in condizioni subcritiche, le due caratteristiche che si propagano verso valle trasportano con maggiore intensità i valori di portata e delle perturbazioni del fondo, mentre quella che si propaga verso monte trasporta con maggiore intensità i livelli idraulici.
- in condizioni supercritiche, le due caratteristiche che si propagano verso valle trasportano con maggiore intensità i valori di portata e dei livelli idraulici, mentre quella che si propaga verso monte trasporta con maggiore intensità le perturbazioni del fondo.
- in condizioni prossime a quelle critiche non vi è generalmente, un'intensità diversa con la quale i valori dei livelli idraulici e delle perturbazioni del fondo vengono trasportati dalle caratteristiche verso valle o verso monte: questo è uno dei principali motivi per i quali i modelli non accoppiati non sono in grado di simulare l'interazione tra corrente e fondo in condizioni prossime alle critiche.

Il comportamento del sistema in condizioni di fondo mobile è pertanto leggermente diverso da quello che si verifica in condizioni di fondo fisso ove esistono soltanto due caratteristiche che si propagano entrambe verso valle, nel caso di corrente supercritica ed una verso valle e l'altra verso monte, nel caso di corrente subcritica.

Le condizioni al contorno che sono state utilizzate nelle simulazioni a fondo mobile sono indicati nella Tabella 34.

Per quanto riguarda la sezione OM0080 relativa al tratto di monte, è stata utilizzata la sezione in corrispondenza della soglia della traversa della Steccaia, mentre per quella relativa al tratto di valle è stata utilizzata la sezione al piede della traversa. Le due sezioni hanno la stessa geometria, ma tra di esse vi è un salto di fondo pari a circa 5 m.

La condizione al contorno di valle utilizzata per il tratto di monte, permette di simulare il rigurgito della traversa della Steccaia, che si verifica in occasione del transito dell'idrogramma centennale.

Tabella 34 Condizioni al contorno utilizzate nelle simulazioni a fondo mobile.

Tratto di riferimento	Codice simulazione	Condizione al contorno di monte (1)	Condizione al contorno di monte (2)	Condizione al contorno di valle
Monte	18M	Idrogramma T=100 anni	Quota costante del thalweg (55.70 m slm)	Massimo valore tra altezza critica e livello idraulico alla sezione OM0080 nella simulazione 10V
Valle	10V	Idrogramma in uscita dalla sezione OM0080, simulazione 18M	Portata solida in uscita dalla sezione OM0080, simulazione 18M	Livello idraulico costante (0.70 m slm)

L'idrogramma utilizzato come ingresso per il tratto di valle è l'idrogramma centennale in ingresso al tratto di monte, dopo che questo è stato laminato nel transito attraverso i primi 40 Km di fiume.

La quota 0.70 m utilizzata a valle per il tratto di valle rappresenta un livello medio del mare in condizioni di alta marea.

I risultati delle simulazioni sono riportati in Appendice B. I risultati sintetici e la relativa analisi sono riportati nel paragrafo seguente.

4.7 Analisi dei risultati

I due tratti del fiume Ombrone presentano dei comportamenti diversi per quanto riguarda l'evoluzione morfologica dell'alveo. Mentre il primo tratto appare piuttosto stabile, fatta eccezione per alcuni fenomeni di tipo localizzato, il tratto di valle presenta situazioni in più rapida evoluzione, soprattutto per quanto riguarda la parte finale.

Tratto di monte

Nella figura seguente viene riportato l'idrogramma delle portate liquide in uscita dal tratto di monte, il quale è stato poi utilizzato come condizione in ingresso per il tratto di valle:

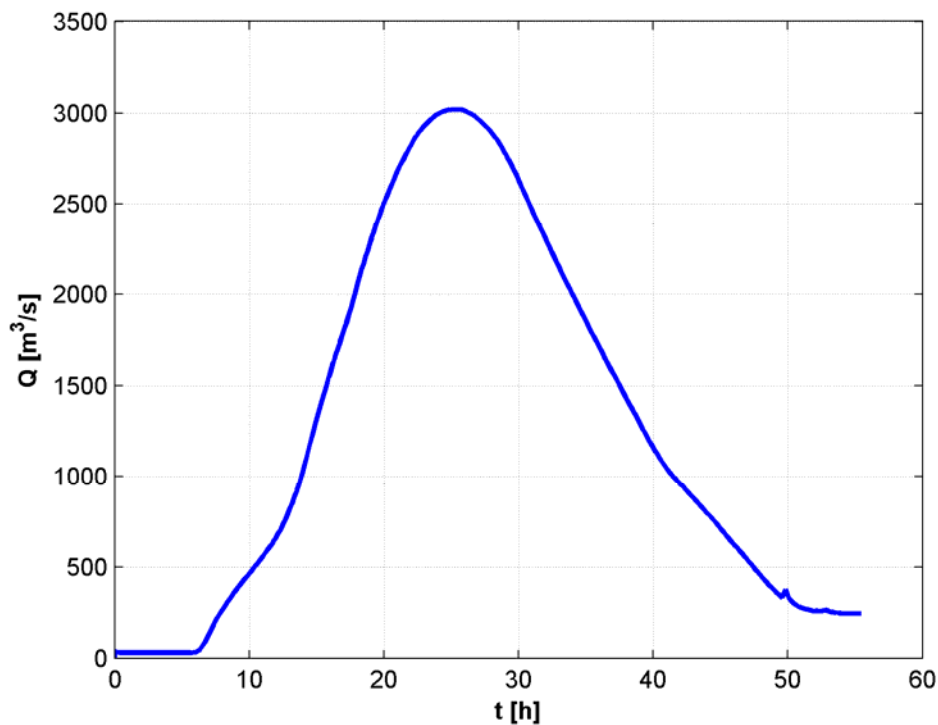


Figura 69 Simulazione a fondo mobile. Idrogramma centennale in uscita dal tratto di monte.

L'idrogramma presenta una portata di picco pari a 3019 m³/s, mentre l'idrogramma in ingresso al tratto (Figura 68) presenta una portata di picco pari a 3131 m³/s (Tabella 32): i picchi subiscono una laminazione modesta pari soltanto a circa il 4%.

L'idrogramma delle portate solide, uscente dal tratto di monte è invece riportato nella figura seguente:

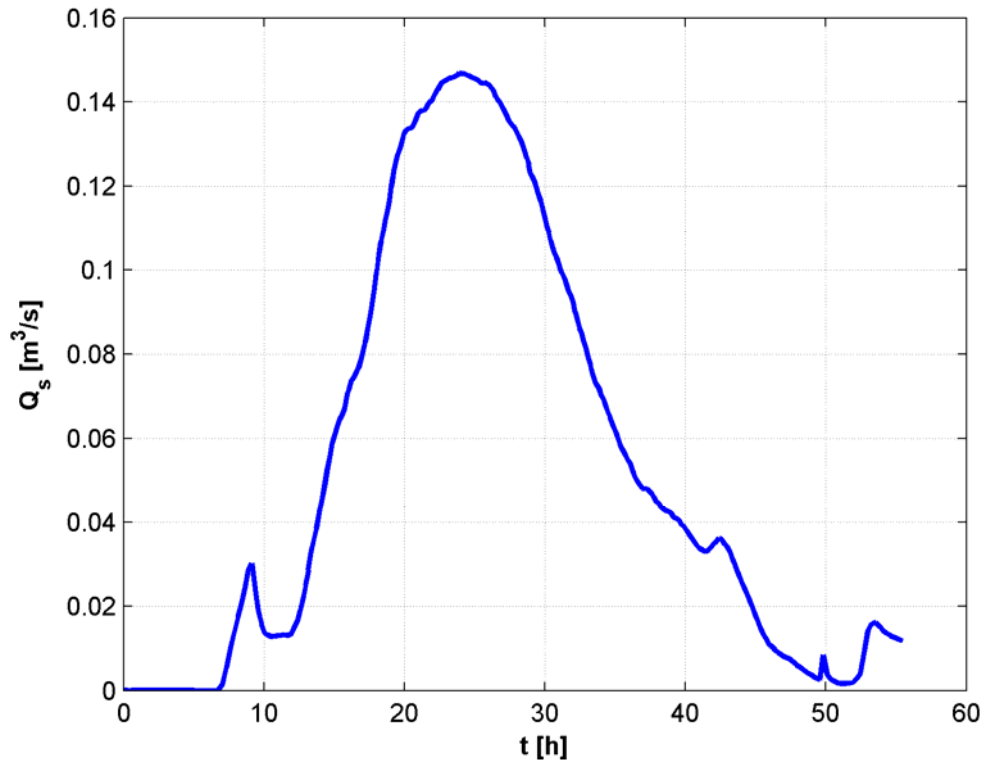


Figura 70 Simulazione a fondo mobile. Idrogramma delle portate solide in uscita dal tratto di monte.

Il primo picco che è possibile notare nell'idrogramma, prima delle 10 ore dall'inizio dell'evento, corrisponde all'istante in cui la traversa della Steccaia comincia ad essere rigurgitata dai livelli a valle: questo crea un rallentamento della corrente che passa dallo stato critico allo stato subcritico con una conseguente diminuzione della capacità di trasporto. L'idrogramma di Figura 70 è stato utilizzato come ingresso per la simulazione del tratto di valle. Alcune principali caratteristiche dell'idrogramma di portata solida sono indicate nella tabella seguente:

Tabella 35 Simulazione a fondo mobile. Caratteristiche principali dell'Idrogramma delle portate solide in uscita dal tratto di monte.

Evento	Stazione	Portata al colmo [m³/s]	Concentrazione solida media [mg/l]	Massa solida trasportata

				[t]
T=100 anni (ALTO)	Traversa della Steccaia (OM0080)	0.147	80	25350

La figura seguente riporta invece l'involuppo dei massimi livelli idraulici che si verificano nella simulazione a fondo mobile:

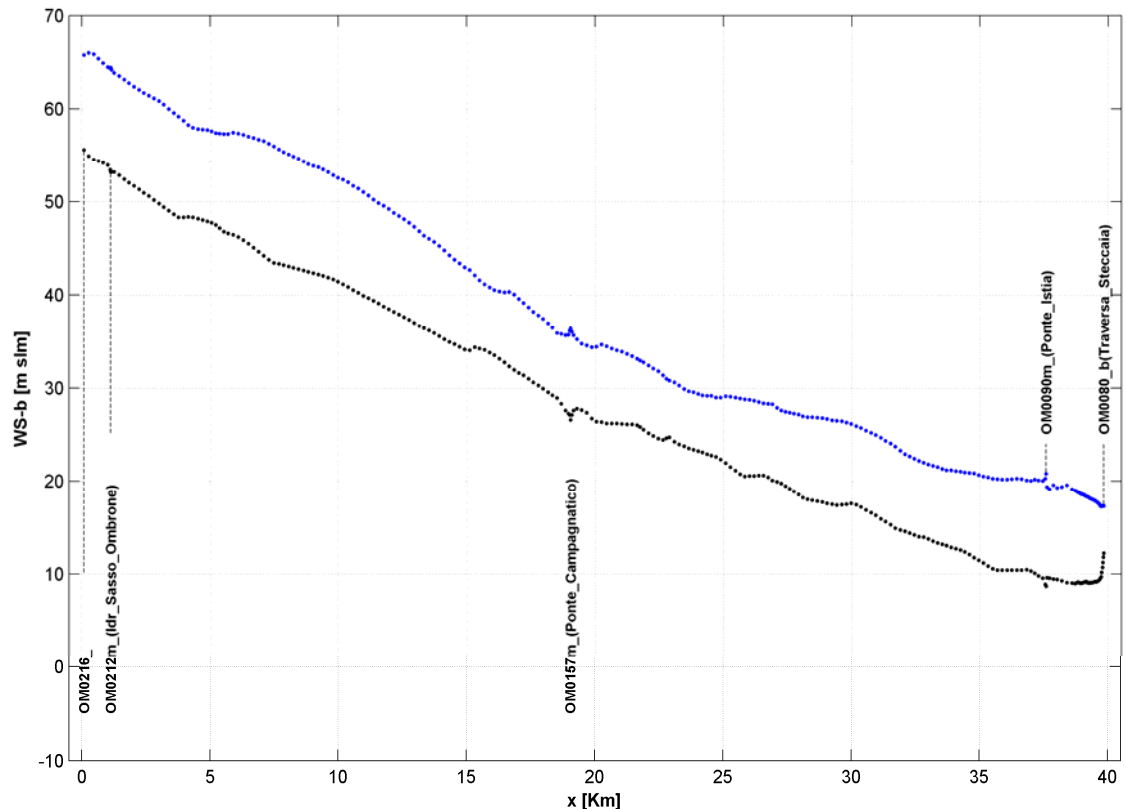


Figura 71 Simulazione a fondo mobile. Involuppo dei massimi livelli idraulici nel tratto di monte. I livelli idraulici sono rappresentati in blu, mentre la quota del fondo alveo è rappresentata in nero.

Il profilo che si instaura è un profilo di corrente lenta. Sono evidenti i disturbi sulla superficie libera presenti in corrispondenza del Ponte di Campagnatico (OM0157) e del Ponte d'Istia (OM0090), ove si verificano delle erosioni localizzate. Le Figura 72 e Figura 73 riportano, rispettivamente, gli andamenti dei profili di massimo scavo/deposito e dei profili di scavo/deposito alla fine della simulazione, dopo il passaggio dell'onda di piena:

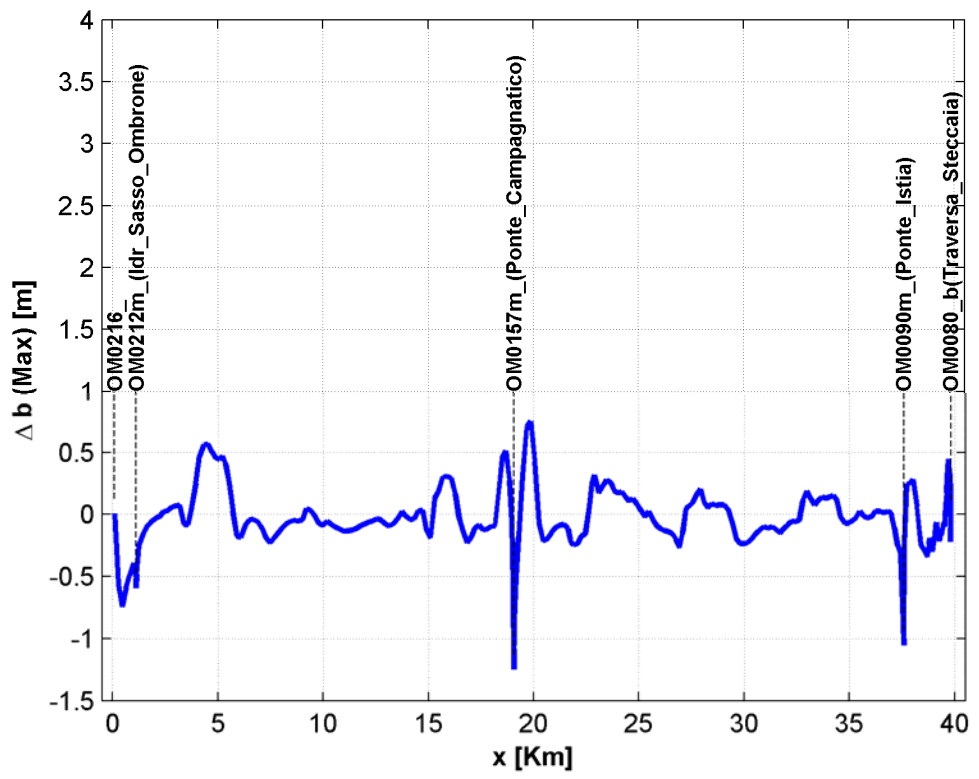


Figura 72 Profilo degli scavi\depositi massimi nel tratto di monte.

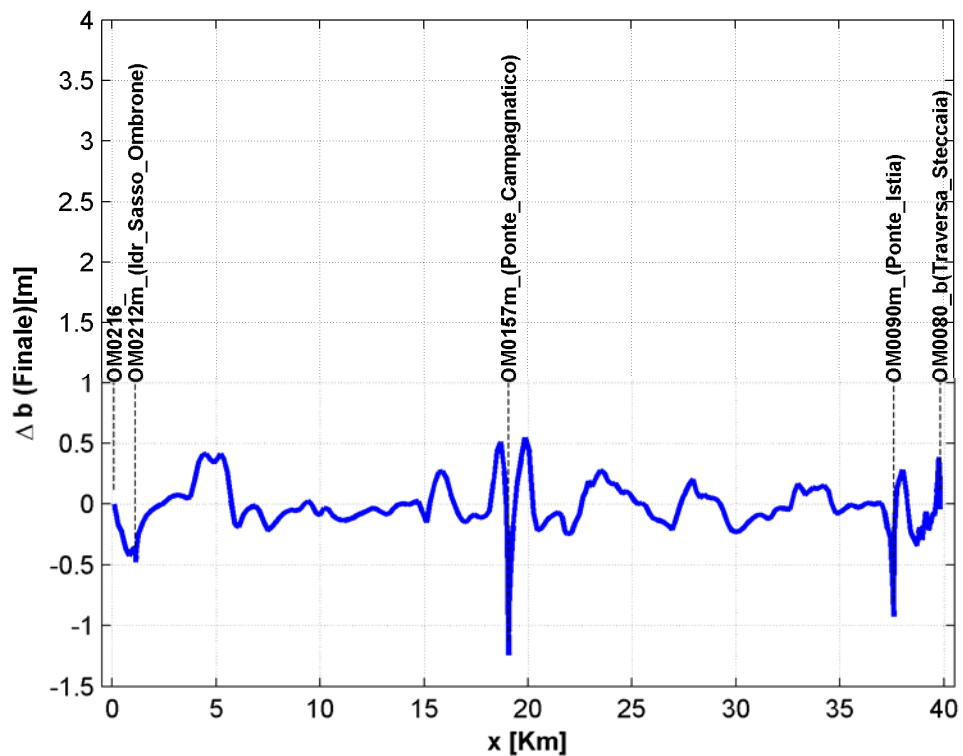


Figura 73 Profilo finale degli scavi\depositi nel tratto di monte.

Da un'analisi delle figure Figura 72 Figura 73 è possibile concludere che il tratto di monte del fiume Ombrone è piuttosto stabile, anche in corrispondenza di eventi di piena molto intensi. Le entità delle erosioni e dei depositi risultano sempre contenute entro i 0.50 m, fatta eccezione per i seguenti casi:

- In corrispondenza del Ponte di Campagnatico si verifica un'erosione massima pari a circa 1.30 m, che non viene praticamente recuperata al passaggio della coda dell'onda di piena.
- Una situazione del tutto analoga a quella indicata al punto precedente viene riscontrata in corrispondenza di Ponte d'Istia, ove però l'erosione massima si attesta su 1.00 m.

Il tratto è stato simulato anche in condizioni di fondo fisso, utilizzando le stesse condizioni al contorno (su portate e livelli) di cui alla Tabella 34. In questo modo è possibile effettuare un confronto tra i livelli idraulici in condizioni di fondo fisso e mobile con lo scopo di valutare gli effetti del trasporto solido su di essi. La figura seguente riporta il confronto effettuato tra i livelli:

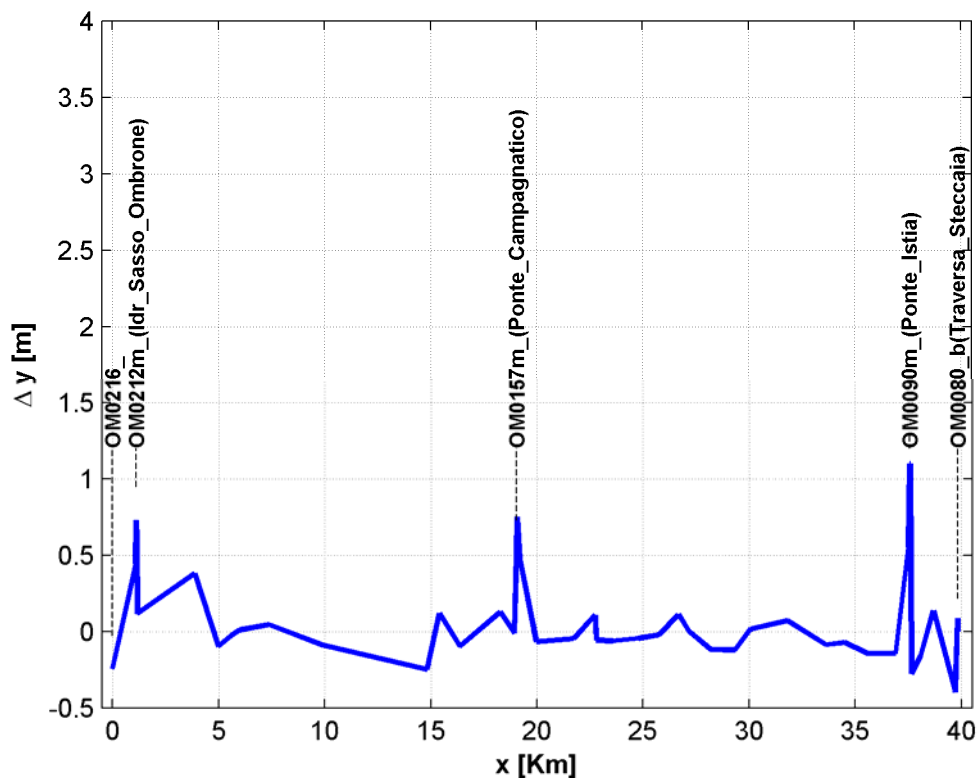


Figura 74 Confronto tra livelli idraulici a fondo mobile e fisso nel tratto di monte. In ordinata è riportata la differenza tra livelli a fondo mobile e livelli a fondo fisso.

Escludendo dall'analisi i primi 5 Km, ove è possibile che nella simulazione a fondo mobile le variabili idrauliche siano state influenzate dalla condizione al contorno utilizzata sulla quota del fondo alveo, si registra una sostanziale equivalenza tra i livelli idraulici, fatta eccezione per le sezioni in corrispondenza del Ponte di Campagnatico e di Ponte d'Istia, ove si registrano le maggiori erosioni. In prossimità di queste sezioni, il livello idraulico risente della mobilità del fondo e la simulazione a fondo fisso sottostima i livelli idraulici con errori attorno ad 1.00 m.

Tratto di valle

L'idrogramma di portata uscente alla sezione di chiusura del tratto di valle è riportato nella figura seguente:

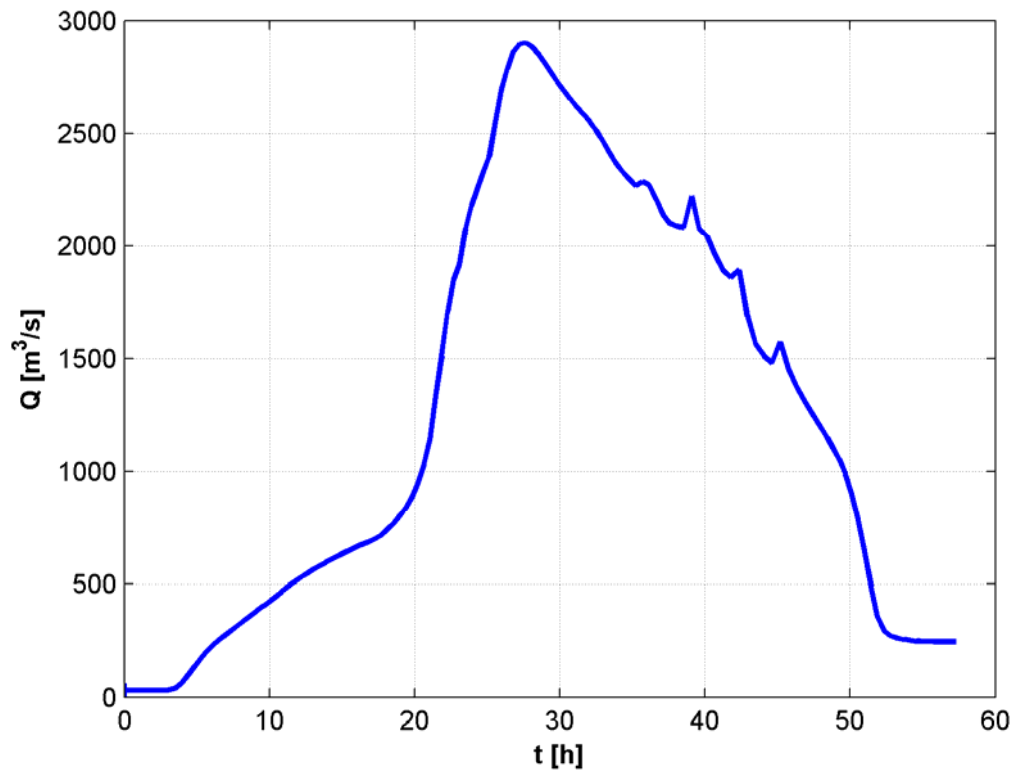


Figura 75 Simulazione a fondo mobile. Idrogramma centennale in uscita alla sezione di chiusura del tratto di valle.

L'idrogramma presenta una portata di picco pari a 2901 m^3/s , mentre l'idrogramma in ingresso al tratto (Figura 69) presenta una portata di picco pari a 3019 m^3/s : anche nel tratto di valle, i picchi subiscono una laminazione modesta, pari soltanto a circa il 4%.

L'idrogramma delle portate solide, in uscita alla sezione di chiusura del tratto di valle, è riportato nella figura seguente:

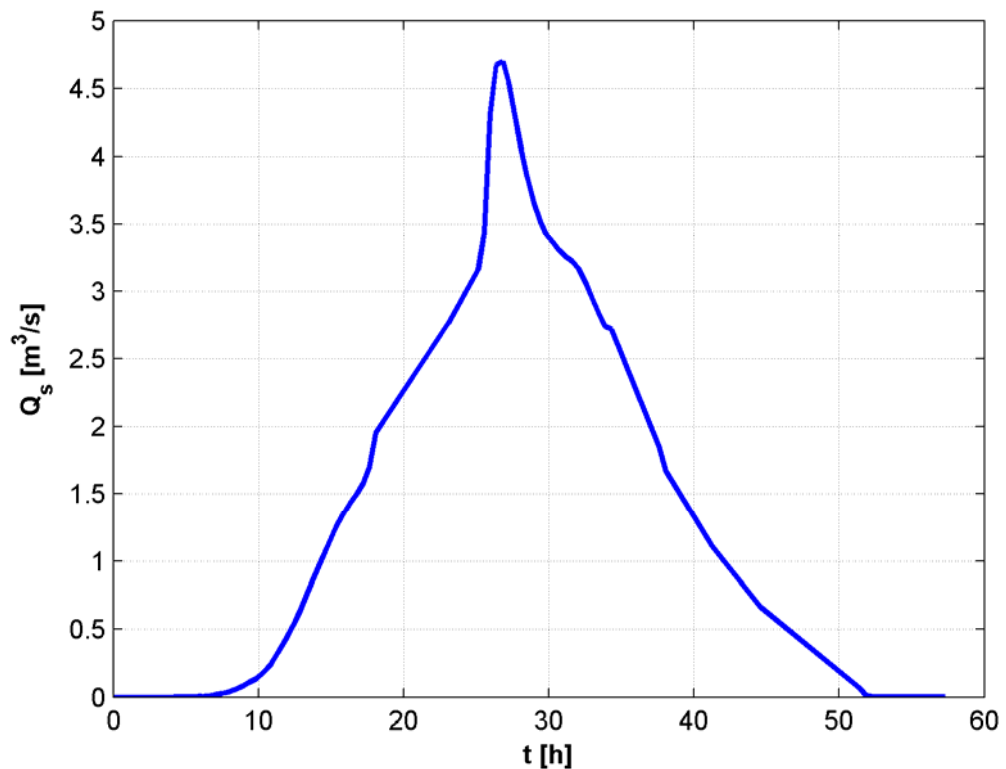


Figura 76 Simulazione a fondo mobile. Idrogramma delle portate solide in uscita alla sezione di chiusura del tratto di valle.

Alcune principali caratteristiche dell'idrogramma di portata solida sono indicate nella tabella seguente:

Tabella 36 Simulazione a fondo mobile. Caratteristiche principali dell'Idrogramma delle portate solide in uscita dal tratto di valle.

Evento	Stazione	Portata al colmo [m ³ /s]	Concentrazione solida media [mg/l]	Massa solida trasportata [t]
T=100 anni (ALTO)	Foce (OM00009)	4.676	3000	661000

La Figura 77 riporta l'involuppo dei massimi livelli idraulici che si verificano nella simulazione a fondo mobile. Anche in questo caso il profilo di corrente che si instaura è un profilo di corrente lenta.

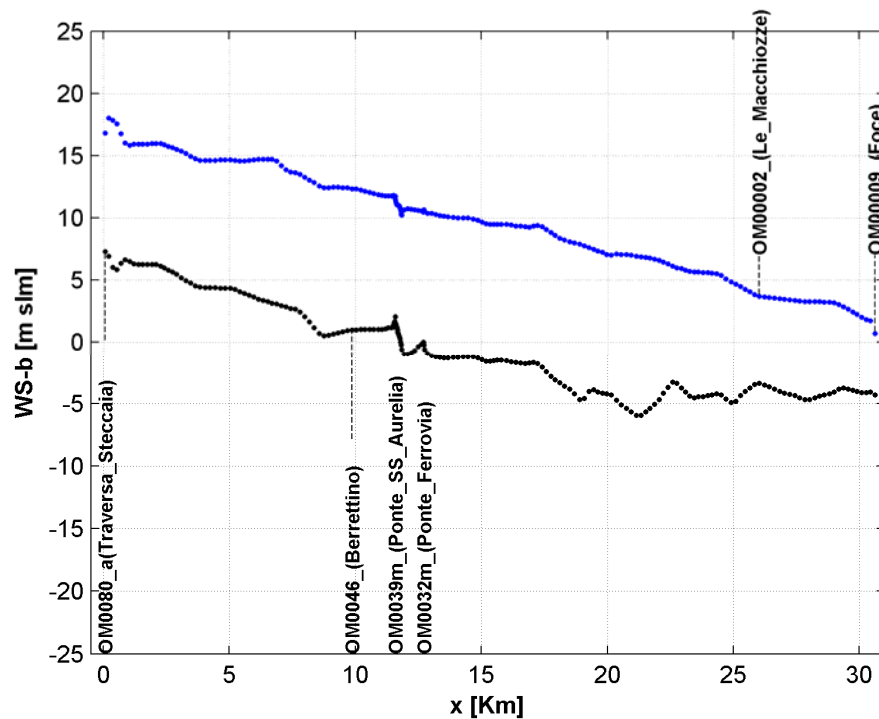


Figura 77 Simulazione a fondo mobile. Involuppo dei massimi livelli idraulici nel tratto di valle. I livelli idraulici sono rappresentati in blu, mentre la quota del fondoalveo è rappresentata in nero.

Le figure seguenti riportano, rispettivamente, gli andamenti dei profili di massimo scavo/deposito e dei profili di scavo/deposito alla fine della simulazione, dopo il passaggio dell'onda di piena:

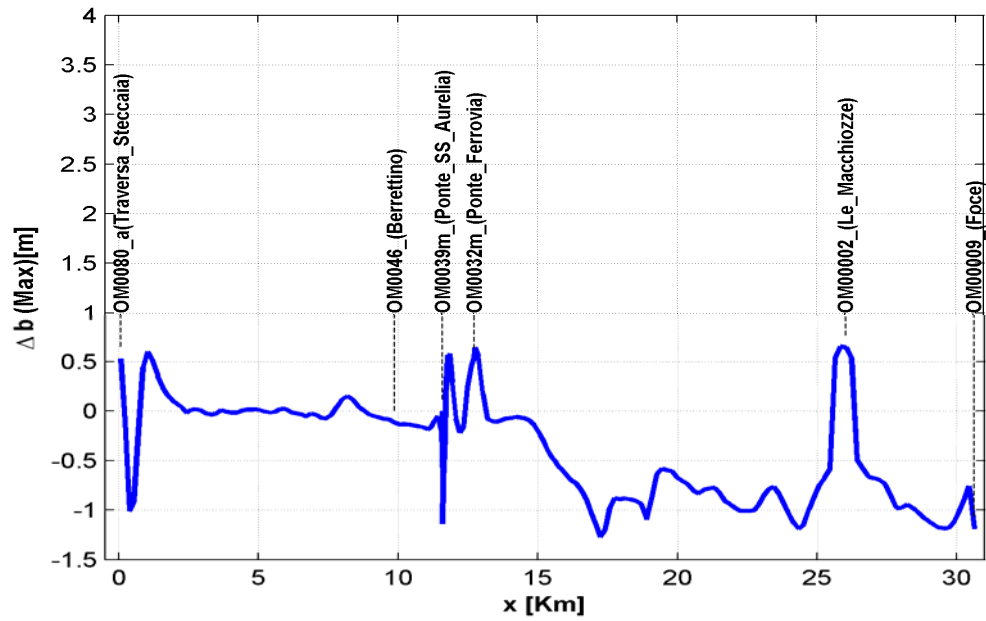


Figura 78 Profilo degli scavi\depositi massimi nel tratto di valle.

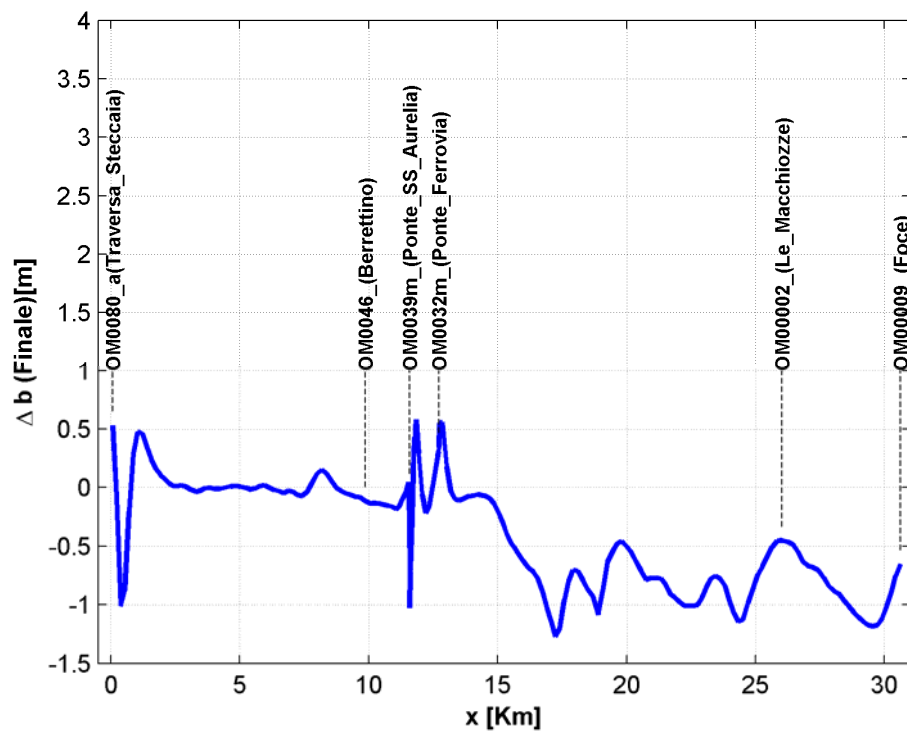


Figura 79 Profilo finale degli scavi\depositi nel tratto di valle.

Le FigureFigura 78Figura 79 mostrano due fenomeni erosivi localizzati, di entità prossima ad 1.00 m: il primo si verifica immediatamente a valle della traversa della Steccaia ed il secondo a valle del ponte della SS Aurelia (per un'estensione pari a circa 150 m), ove è presente una struttura in linea con un salto di fondo che si attesta sui 3 m.

Dal punto di vista dei fenomeni generalizzati, il tratto di valle del fiume Ombrone presenta un comportamento non omogeneo: più stabile nei primi 15 Km, ove sostanzialmente si manifestano unicamente fenomeni localizzati e con una tendenza all'erosione negli ultimi 15 Km. Gli ultimi 15 Km del tratto, all'incirca a partire dalla sezione OM0025, presentano un fenomeno erosivo generalizzato che persiste fino alla foce, di entità massima attorno ad 1.00 m.

Tale risultato è in accordo con quanto desumibile dal confronto tra i profili d'alveo negli anni 1970 e 1998, ove è possibile notare come il tratto in questione abbia subito un'erosione generalizzata di entità media prossima ai 3.00 m.

Anche questo tratto è stato simulato in condizioni di fondo fisso utilizzando le stesse condizioni al contorno (su portate e livelli) di cui alla Tabella 34. Il confronto tra livelli idraulici a fondo fisso e mobile è riportato nella figura seguente:

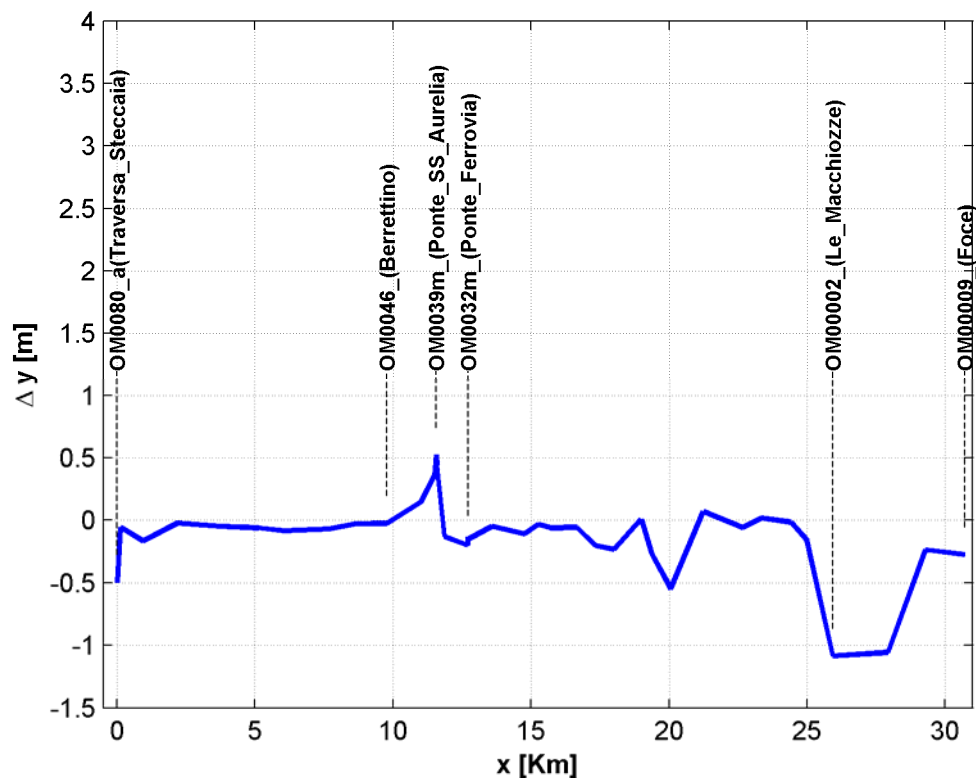


Figura 80 Confronto tra livelli idraulici a fondo mobile e fisso nel tratto di valle del fiume Ombrone. In ordinata è riportata la differenza tra livelli a fondo mobile e livelli a fondo fisso.

Dall'analisi di Figura 80 è possibile notare che nei primi 25 Km del tratto di valle non si presentano grandi differenze tra i livelli idraulici stimati con la simulazione a fondo fisso e a fondo mobile. Gli unici punti in cui queste sono evidenti sono quelli caratterizzati da fenomeni di erosione localizzata (cfr. Figura 78).

A partire dal Km 25 (che corrisponde approssimativamente alla sezione OM0002) è possibile notare come i livelli idraulici a fondo mobile siano inferiori a quelli a fondo fisso di circa 1.00 m.

Ciò è presumibilmente dovuto al fatto che la parte finale, a partire dal Km 15 (cfr. Figura 78) presenta un'erosione generalizzata della stessa entità media: i livelli idraulici cominciano a risentire dell'abbassamento generalizzato del fondo soltanto più a valle, quando il tratto eroso è sufficientemente esteso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ackers, P., Whitte, W.R., 1973, Sediment transport: new approach and analysis, Proc. ASCE, Vol. 99, HY 11, pp. 2041-2060.
- [2] ADAMS, J., 1979. Gravel size analysis from photographs. Proc. ASCE, J. Hydr. Div., 105, 1247-1285.
- [3] ANDREWS, E.D., PARKER, G., 1985. The coarse surface layer as a response to gravel mobility. In: C.R. Thorne, S.C. Bathurst, R.D. Hey (eds.), "Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers", Wiley, New York, 269-325.
- [4] BILLI, P., 1993, Streambed dynamics and grain-size characteristics of two gravel rivers of the Northern Apennines, Italy, Lecture Notes in Earth Science, 52, 197-212.
- [5] BILLI, P., TACCONI, P., 1987. Bedload transport processes monitored at Virginio Creek measuring station, Italy. In: V. Gardiner (ed.), "International Geomorphology 1986 Part I", Wiley, New York, 549-559.
- [6] BILLI, P., 1989. Sediment survey of alluvial channels. Proceedings of the International Congress on Geoengineering, Torino, 27-30 Settembre, 3: 1525-1530.
- [7] Carlos Parés and Manuel Castro (2004). On the well-balance property of Roe's method for nonconservative hyperbolic systems. applications to shallow-water systems. ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 38, pp 821-852. doi:10.1051/m2an:2004041.
- [8] CHURCH, M.A., McLEAN, D.G., WOLCOTT, J.F., 1987. River bed gravels: sampling and analysis. In: C.R. Thorne, J.C. Bathurst, R.D. Hey (eds.), "Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers", Wiley, New York, 43-88.
- [9] Coastal Erosion Monitoring - A network of regional observatories, Results from RESMAR Project, Ed. By Luigi Cipriani, Regione Toscana, 2013
- [10] Corridori Andrea (2007), Studio della dinamica fluviale del Fiume Ombrone Grossetano, tesi di Laurea, facoltà di Ingegneria, Università di Firenze
- [11] DIETRICH, W. E., KINERSON, D., COLLINS, L., 1993, Interpretation of relative sediment supply from bed texture in gravel bed rivers, Eos Trans. AGU, 74 (16), Spring Meeting suppl., 151.
- [12] FEDERAL INTER-AGENCY SEDIMENTATION PROJECT OF THE INTER-AGENCY COMMITTEE ON WATER RESOURCES, 1966, Instruments and reports for fluvial sediments investigations, Inter-Agency Report Catalog, S, Minneapolis, Minn., St. Anthony Falls Hydraulics Lab., 67pp.

[13] Frangipane A., Paris E., " LONG TERM VARIABILITY IN SEDIMENT TRANSPORT RELATED TO MAN ACTIVITY", Proc. of IAHS International Symposium on Variability in Stream Erosion and Sediment Transport, Canberra, 1994.

[14] KELLER, E.A., 1971. Areal sorting of bed-load material: the hypothesis of velocity reversal. Geol. Soc. Am. Bull., 82: 753-756.

[15] KELLERHALS, R., BRAY, D.L., 1971. Sampling procedures for coarse fluvial sediments. Proc. ASCE, J. Hydr. Div., 97: 1165-1179.

[16] La Monica G.B., "IL LITORALE TOSCANO FRA PUNTA ALA ED IL PROMONTORIO DI ANSEDONIA", Atti del XII Forum Rotary International su l'Erosione delle Coste, Viterbo, 1980.

[17] LEOPOLD, L.B., 1970. An improved method for size distribution of stream bed gravel. Water Resour. Res., 6(5): 1357-1366.

[18] Milano V., " STUDIO SUI PROCESSI EVOLUTIVI IN ATTO LUNGO IL LITORALE GROSSETANO TRA T.RE ROCCHETTE E CALA DI FORNO", Relazione Tecnica, Comune di Grosseto, 1986.

[19] Ministero dei Lavori Pubblici – Servizio Idrografico, RILIEVI DELL'ALVEO DEI CORSI D'ACQUA – Pubblicazione n. 23 del Servizio – Fasc. XI – OMBRONE DALLA FOCE A CAMPAGNATICO, Ufficio speciale del Genio Civile per il Servizio Idrografico , Pisa, Roma, 1976

[20] Ministero dei Lavori Pubblici – Servizio Idrografico, RILIEVI DELL'ALVEO DEI CORSI D'ACQUA – Pubblicazione n. 23 del Servizio – Fasc. XII – OMBRONE DA CAMPAGNATICO A BUONCONVENTO, Ufficio Speciale del Genio Civile per il Servizio Idrografico, Pisa, Roma, 1976.

[21] Ministero dei Lavori Pubblici, Consiglio Superiore, Servizio Idrografico, DATI CARATTERISTICI DEI CORSI D'ACQUA ITALIANI, Pubbl. n. 17 del Servizio.

[22] MOSLEY, M.P., TINDALE, D.S., 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. Earth Surf. Proces. and Landforms, 10: 465-482.

[23] Pranzini,E, 1994, The erosion of the Ombrone River delta (Italy), Littoral 94, Lisbona, Portugal

[24] Rabai A., Moscatelli A., Paris E., EVOLUZIONE STORICA DELL'USO DEL SUOLO NEL BACINO DEL FIUME OMBRONE GROSSETANO ED EFFETTI SULLA PRODUZIONE DELL'APPORTO SOLIDO ALLA FOCE, L'Acqua, 2010.

[25] Regione Toscana, "REGIONALIZZAZIONE DELLE PORTATE DI PIENA IN TOSCANA", Firenze, 1998

[26] Regione Toscana, Direzione Generale Politiche Ambientali e Territoriali, Settore Servizio Idrologico Regionale, PROGETTO GENERALE DI MONITORAGGIO DEL TRASPORTO SOLIDO NEI CORSI D'ACQUA TOSCANI, Relazione Tecnica Generale, Firenze, novembre 2005.

[27] Regione Toscana, "STUDI PRELIMINARI PER IL PIANO DI BACINO DEL F. OMBRONE", RELAZIONE FINALE, DINAMICA FLUVIALE E ASPETTI PROGETTUALI, Firenze, marzo 1991.

[28] Regione Toscana, Dipartimento Ambiente, " COSTE TOSCANE: STUDI SULLA EROSIONE SUI VENTI SUL MOTO ONDOSI", Convegno su Coste Toscane: erosione o tutela, Alberese, 2 giugno 1989.

[29] Regione Toscana, Ufficio del Genio Civile di Grosseto, "REALIZZAZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO DELLE PORTATE LIQUIDE E SOLIDE DEL F. OMBRONE GROSSETANO", a cura di E.Paris e P. Billi, Firenze, 2001.

[30] Regione Toscana, Ufficio del Genio Civile di Grosseto, LAVORI PER L'ESECUZIONE DELLE SEZIONI PLANO – ALTIMETRICHE SULL'ASSE PRINCIPALE DEL FIUME OMBRONE E DEI SUOI AFFLUENTI, IRTEF, Firenze, 1999.

[31] Regione Toscana, Ufficio del Genio Civile di Grosseto, PROGETTO DELL'IMPIANTO DI MONITORAGGIO DELLE PORTATE LIQUIDE E SOLIDE NEL BACINO DEL FIUME OMBRONE GROSSETANO, Relazione Tecnica sui Rilievi d'Alveo, Firenze, agosto 1995.

[32] Regione Toscana, Ufficio del Genio Civile di Grosseto, PROGETTO DELL'IMPIANTO DI MONITORAGGIO DELLE PORTATE LIQUIDE E SOLIDE NEL BACINO DEL FIUME OMBRONE GROSSETANO, Relazione Tecnica sulle Misure di Portata Liquida e Solida, Firenze, aprile 2001.

[33] Regione Toscana, Verifica idrologica e idraulica del bacino del fiume Ombrone, ricostruzione degli eventi di piena del 29 ottobre e 4 dicembre 2004, individuazione dei tratti critici e degli interventi prioritari, Relazione Tecnica a cura di E.Paris, Settesoldi D., Bacci L., Ferri I., Angelini S., Firenze, aprile 2005.

[34] Roe P.L., "Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and DifferenceSchemes". *Journal of Computational. Physics*, 43:357–372, 1981)

[35] Toro E., Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics A Practical Introduction 3rd Ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

[36] White W.R., Paris E., Bettess R., "THE FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF ALLUVIAL STREAMS: A NEW APPROACH", Proc. of Inst. of Civil Engineering, Part 2, Vol. 69. Sept. 1980.

[37] WILCOCK, P.R., 1992, Experimental investigation on the effect of mixture properties on transport dynamics,. In P. Billi, R.D. Hey, C.R. Thorne and P. Tacconi (eds.) "Dynamics of Gravel-Bed Rivers", Wiley, New York, 109-132.

[38] WOLCOTT, J., CHURCH, M.A., 1991. Strategies for sampling spatially heterogeneous phenomena: the example of river gravels. Jour. Sedim. Petrology, 61(4): 534-543.

[39] WOLMAN, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. Am. Geophys. Union. Trans, 35: 951-956.

E

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE
DELL'UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FIRENZE

PER

**ATTIVITA' DI RICERCA PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO
IDRAULICO NELLA REGIONE TOSCANA**

Attività “ C “

Relazione Intermedia

Modellazione idraulica a fondo mobile

Parte 1: Fiume Ombrone Grossetano

APPENDICE

Gruppo di Lavoro:

Lorenzo Minatti (Referente CERAFRI), Enio Paris (referente UNIFI),

Luca Solari, Pina De Cicco, Laura Boschi (UNIFI),

Beatrice Mengoni, Sofia Morandi (RT)

Firenze, agosto 2013

Appendice A – Schema numerico

Nella presente appendice vengono indicate le modalità di calcolo dei termini dello schema numerico di cui alle equazioni

$$F_{i+1/2} = F_i + A_{i+1/2}^- \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) - P_{i+1/2}^- \cdot S_{i+1/2}^* \cdot (x_{i+1} - x_i)$$

$$53 \quad F_{i-1/2} = F_i - A_{i+1/2}^+ \cdot (W_i^n - W_{i-1}^n) + P_{i-1/2}^+ \cdot S_{i-1/2}^* \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad 54, \text{ utilizzato dal}$$

modello REMo. I termini delle equazioni sono basati sul solutore di Riemann proposto da Roe [34]: per una trattazione completa ed esaustiva si rimanda ai testi specializzati (es [35]).

Il solutore di Roe, risolve in maniera approssimata il problema di Riemann per un sistema iperbolico scritto in forma quasi-lineare:

$$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} + A(W) \cdot \frac{\partial W(x,t)}{\partial x} = 0$$

$$W(x,0) = W_L, \quad x < 0$$

A-1

$$W(x,0) = W_R, \quad x > 0$$

fornendo un'approssimazione della soluzione $W(x,t)$ in $x=0$ (interfaccia tra due celle).

Si tratta di un solutore lineare in quanto utilizza una opportuna linearizzazione della matrice A , che viene calcolata su di uno stato W_{ROE} , detto stato di Roe, intermedio tra W_L e W_R . Lo stato di Roe è ottenuto in maniera tale che la matrice A calcolata su di esso verifichi le condizioni di Rankine-Hugoniot (generalizzate e non). Nel caso di schemi path-conservativi con percorso lineare, la matrice di Roe può essere calcolata numericamente dal seguente integrale, senza che sia necessario esplicitare il valore dello stato di Roe:

$$A_{ROE} = \int_0^1 A(x_L + s \cdot (x_R - x_L), \Psi(s, W_L, W_R)) ds \quad A-2$$

La soluzione approssimata del problema di Riemann permette di ottenere un'approssimazione del flusso all'interfaccia tra le due celle adiacenti, da utilizzare nello schema numerico.

Nel caso in cui non siano presenti termini sorgente, il flusso di interfaccia è costituito da una parte centrata e da una parte di upwind:

$$\begin{aligned} F_{i+1/2} &= F_i + A_{i+1/2}^- \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) \\ F_{i-1/2} &= F_i - A_{i-1/2}^+ \cdot (W_i^n - W_{i-1}^n) \end{aligned} \quad \text{A-3}$$

La parte centrata F_i viene calcolata semplicemente calcolando il valore del flusso F sullo stato presente nella cella i .

La parte di upwind viene calcolata attraverso le matrici A^+ ed A^- . Trattandosi di un sistema iperbolico, è possibile diagonalizzare sul campo dei numeri reali la matrice A_{ROE} , la quale pertanto può essere scritta nella forma:

$$A_{ROE} = R \cdot \Lambda \cdot R^{-1} \quad \text{A-4}$$

Ove:

- Λ è una matrice diagonale contenente gli autovalori della matrice A_{ROE} .
- R è una matrice contenente gli autovettori di A_{ROE} nelle colonne.

Definendo:

$$|A_{ROE}| = R \cdot |\Lambda| \cdot R^{-1} \quad \text{A-5}$$

Ove:

- $|\Lambda|$ è una matrice diagonale contenente i valori assoluti degli autovalori della matrice A_{ROE} .

È possibile scrivere le matrici di upwind nella seguente forma:

$$\begin{aligned} A^+ &= \frac{1}{2} (A_{ROE} + |A_{ROE}|) \\ A^- &= \frac{1}{2} (A_{ROE} - |A_{ROE}|) \end{aligned} \quad \text{A-6}$$

Le matrici di upwind permettono di "correggere" l'approssimazione centrata del flusso utilizzando le informazioni sulla direzione verso la quale i valori degli stati sono propagati dal sistema.

Nel caso in cui siano presenti anche dei termini sorgente, lo schema

prende la forma delle equazioni $F_{i+1/2} = F_i + A_{i+1/2}^- \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) - P_{i+1/2}^- \cdot S_{i+1/2}^* \cdot (x_{i+1} - x_i)$

$$53, F_{i-1/2} = F_i - A_{i+1/2}^+ \cdot (W_i^n - W_{i-1}^n) + P_{i-1/2}^+ \cdot S_{i-1/2}^* \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad 54: \text{ è necessario}$$

l'utilizzo delle matrici di proiezione P^+ e P^- , per discretizzare il termine sorgente. Anche esse hanno lo scopo di utilizzare le informazioni sulla direzione di propagazione dello stato per la discretizzazione e vengono scritte nella seguente forma:

$$P^+ = \frac{1}{2} (I + R \cdot \text{sgn}(\Lambda) \cdot R^{-1}) \quad A-7$$

$$P^- = \frac{1}{2} (I - R \cdot \text{sgn}(\Lambda) \cdot R^{-1})$$

Ove:

- I è la matrice identità.
- $\text{sgn}(\Lambda)$ è una matrice diagonale il cui i -mo elemento diagonale vale 1 , se il corrispondente autovalore è positivo, 0 se esso è nullo e -1 se esso è negativo.

Infine, il termine $S_{i\pm 1/2}^*$ presente nelle equazioni

$$F_{i+1/2} = F_i + A_{i+1/2}^- \cdot (W_{i+1}^n - W_i^n) - P_{i+1/2}^- \cdot S_{i+1/2}^* \cdot (x_{i+1} - x_i)$$

$$53, F_{i-1/2} = F_i - A_{i+1/2}^+ \cdot (W_i^n - W_{i-1}^n) + P_{i-1/2}^+ \cdot S_{i-1/2}^* \cdot (x_i - x_{i-1}) \quad 54 \text{ viene calcolato}$$

similmente alla matrice di Roe, ossia dalla:

$$S_k^* = \int_0^1 S^* (x_L + s \cdot (x_R - x_L), \Psi(s, W_L, W_R)) ds \quad A-8$$

Ove:

- $L=i$ ed $R=i+1$, se $k=i+1/2$.
- $L=i-1$ ed $R=i$, se $k=i-1/2$.

Appendice B - Risultati delle simulazioni a fondo mobile

Nota: Se non diversamente specificato, i valori delle grandezze idrauliche si riferiscono all'istante temporale in cui si è verificato il massimo livello idraulico.

Legenda dei simboli utilizzati nelle tabelle:

- x : Distanza dalla sezione di monte del tratto.
- Max WS: Quota massima del livello idraulico.
- Δb (Max) : massima entità dello scavo o deposito.
- Δb (Finale): entità dello scavo o deposito dopo il passaggio dell'idrogramma.
- t_M : istante di passaggio del massimo livello idraulico.
- Q : portata.
- U : velocità media della corrente.
- Fr : numero di Froude della corrente.
- b : quota del fondo alveo.
- Δb : entità dello scavo o deposito al momento del passaggio del massimo livello idraulico.
- $\Delta \Omega_s$: area trasversale scavata o depositata.
- Q_s : portata solida uscente dal volume.

Tabella B 1 – Tratto di monte. Output sintetico.

Sezione di riferimento (cfr. Tavole OMB1.1-1.6)	x [Km]	Max WS [m sim]	Δb (Max) [m]	Δb (Finale) [m]
OM0216_	0.09	65.89	0.01	0.00
OM0213_	1.11	64.56	-0.52	-0.36
OM0212m_	1.13	64.42	-0.59	-0.47
OM0212v_	1.15	64.42	-0.48	-0.42
OM0211_	1.27	64.07	-0.25	-0.25
OM0203_	3.96	59.00	0.25	0.20
OM0200_	5.06	57.72	0.45	0.37
OM0198_	5.70	57.34	0.03	0.03

Sezione di riferimento (cfr. Tavole OMB1.1-1.6)	x [Km]	Max WS [m slm]	Δb (Max) [m]	Δb (Finale) [m]
OM0197	6.09	57.55	-0.19	-0.19
OM0193	7.48	56.06	-0.23	-0.22
OM0187	9.98	52.79	-0.09	-0.09
OM0173	14.91	43.25	-0.13	-0.07
OM0171	15.50	42.10	0.19	0.17
OM0167	16.46	40.49	-0.04	-0.01
OM0161	18.34	36.79	0.19	0.19
OM0158	18.96	35.64	-0.07	-0.04
OM0157m	19.05	36.39	-1.25	-1.24
OM0157v	19.09	36.39	-0.86	-0.86
OM0156	19.28	35.78	-0.18	-0.18
OM0153	20.06	34.45	0.43	0.43
OM0146	21.76	33.09	-0.23	-0.23
OM0144	21.88	32.89	-0.25	-0.25
OM0141	22.77	31.22	0.25	0.11
OM0139	22.89	31.16	0.32	0.19
OM0136	23.65	29.75	0.26	0.26
OM0131	24.89	29.19	0.09	0.08
OM0128	25.84	28.79	-0.09	-0.08
OM0125	26.74	28.44	-0.20	-0.18
OM0123	27.25	27.75	0.05	-0.04
OM0120	28.27	26.94	0.05	0.05
OM0117	29.42	26.50	-0.07	-0.07
OM0114	30.17	26.18	-0.23	-0.22
OM0109	31.88	23.53	-0.11	-0.05
OM0105	33.70	21.28	0.14	0.13
OM0102	34.58	21.04	-0.03	0.00
OM0099	35.67	20.21	-0.02	-0.02
OM0095	36.97	20.12	0.01	0.01
OM0092	37.54	20.29	-0.86	-0.73
OM0090m (Ponte Istia)	37.57	20.78	-1.05	-0.92
OM0090v	37.61	20.78	-0.24	-0.24
OM0088	37.71	19.29	0.25	0.11
OM0086	38.18	19.36	0.07	0.07
OM0084	38.70	19.09	-0.34	-0.34
OM0081	39.72	17.30	0.39	0.35
OM0080_c (Traversa Steccaia)	39.81	17.69	0.00	0.00
OM0080_b(Traversa Steccaia)	39.81	17.31	0.00	0.00

Tabella B 2 - Tratto di valle. Output sintetico.

Sezione di riferimento (cfr. Tavole OMB1.1-1.6)	x [Km]	Max WS [m slm]	Δb (Max) [m]	Δb (Finale) [m]
OM0080_a	0.07	16.81	0.53	0.53
OM0079	0.22	18.12	-0.10	-0.08
OM0075	1.03	15.91	0.60	0.48
OM0071	2.26	16.05	0.03	0.03
OM0068	2.91	15.63	0.01	0.01
OM0065	3.84	14.63	-0.01	0.00
OM0062	5.22	14.71	0.00	0.00
OM0059	6.14	14.76	-0.01	0.00
OM0053_b	7.79	13.73	0.04	0.04
OM0049	8.74	12.35	0.01	0.00
OM0046 (Berrettino)	9.86	12.45	-0.12	-0.12
OM0043	11.06	11.86	-0.18	-0.18
OM0041	11.50	11.78	-0.15	0.02
OM0039m (Ponte SS Aurelia)	11.57	11.86	0.00	0.00
OM0039v	11.59	11.74	-1.14	-1.03
OM0037	11.92	10.58	0.29	0.29
OM0034	12.71	10.62	0.54	0.31
OM0032m (Ponte Ferrovia)	12.72	10.64	0.51	0.35
OM0032v	12.75	10.84	0.65	0.55
OM0030	12.86	10.39	0.56	0.56
OM0028	13.68	10.13	-0.09	-0.09
OM0025	14.85	9.92	-0.14	-0.14
OM0024	15.34	9.47	-0.39	-0.39
OM0023	15.79	9.54	-0.58	-0.57
OM0020	16.74	9.32	-0.90	-0.90
OM0019	17.40	9.47	-1.20	-1.20
OM0017	18.11	8.52	-0.88	-0.71
OM0015	19.08	7.74	-0.88	-0.88
OM0014	19.45	7.78	-0.58	-0.55
OM0012	20.16	7.11	-0.70	-0.55
OM0009	21.33	6.83	-0.78	-0.78
OM0006	22.75	6.24	-1.00	-1.00
OM0005	23.44	5.59	-0.76	-0.75
OM0003	24.51	5.59	-1.15	-1.13
OM0001	25.09	4.65	-0.74	-0.74
OM00002	26.03	3.91	0.65	-0.45

Sezione di riferimento (cfr. Tavole OMB1.1-1.6)	x [Km]	Max WS [m slm]	Δb (Max) [m]	Δb (Finale) [m]
OM00005	28.02	3.26	-0.98	-0.88
OM00007	29.37	3.13	-1.18	-1.18
OM00009	30.62	0.65	-1.19	-0.65

Tabella B 3 - Tratto di monte. Output dettagliato

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t_m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	$\Delta\Omega_s$ [m ²]	Q _s [m ³ /s]
1	OM0216_	91.75	18.0	3120.2	1362.5	2.29	0.39	55.57	0.01	0.3	0.03
2		275.25	18.2	3120.6	1293.4	2.41	0.41	54.90	-0.38	-15.9	0.06
3		458.75	18.6	3118.5	1137.5	2.74	0.45	54.52	-0.48	-21.2	0.14
4		642.25	18.8	3115.2	969.0	3.21	0.50	54.40	-0.33	-15.0	0.20
5		825.75	18.8	3115.2	847.3	3.68	0.55	54.21	-0.24	-11.8	0.25
6		1009.25	18.9	3111.7	757.8	4.11	0.59	53.97	-0.20	-10.3	0.30
7	OM0213_	1112.50	18.9	3111.7	689.6	4.51	0.62	53.43	-0.42	-20.5	0.30
8	OM0212m_	1131.00	18.9	3111.7	638.6	4.87	0.65	53.20	-0.45	-20.8	0.30
9	OM0212v_	1153.50	18.9	3111.7	685.5	4.54	0.63	53.20	-0.32	-16.0	0.31
10	OM0211_	1265.43	18.6	3118.4	726.6	4.29	0.61	53.22	0.01	0.6	0.33
11		1458.29	18.6	3118.4	737.1	4.23	0.61	52.87	0.04	2.2	0.34
12		1651.15	18.6	3118.5	744.8	4.19	0.61	52.46	0.00	0.0	0.34
13		1844.01	18.6	3118.5	751.3	4.15	0.62	52.06	-0.02	-1.0	0.34
14		2036.87	18.6	3118.5	756.8	4.12	0.62	51.70	-0.01	-0.5	0.34
15		2229.73	18.6	3118.5	762.8	4.09	0.62	51.34	0.00	0.1	0.34
16		2422.59	18.6	3118.5	770.8	4.05	0.62	50.98	0.01	0.5	0.34
17		2615.45	18.6	3118.6	783.1	3.98	0.62	50.60	0.01	0.6	0.33
18		2808.31	18.6	3118.6	798.2	3.91	0.61	50.21	0.00	-0.1	0.32
19		3001.17	18.6	3118.6	811.4	3.84	0.61	49.83	-0.01	-0.5	0.30
20		3194.03	18.9	3113.1	811.4	3.84	0.59	49.43	-0.03	-1.3	0.30
21		3386.89	19.1	3109.6	800.7	3.88	0.57	49.02	-0.07	-2.9	0.31
22		3579.75	19.4	3098.0	788.7	3.93	0.57	48.65	-0.07	-2.8	0.32
23		3772.61	19.7	3083.5	784.8	3.93	0.58	48.32	-0.03	-1.0	0.32
24	OM0203_	3962.21	19.2	3104.4	835.3	3.72	0.59	48.32	0.20	7.4	0.30
25		4148.54	18.9	3112.8	942.0	3.30	0.55	48.39	0.35	13.5	0.26
26		4334.87	18.6	3117.3	1091.2	2.86	0.50	48.32	0.35	14.2	0.20
27		4521.20	18.6	3117.3	1290.1	2.42	0.44	48.17	0.28	11.9	0.15
28		4707.53	18.8	3116.1	1566.6	1.99	0.38	48.03	0.21	9.5	0.10
29		4893.86	18.8	3116.0	1948.6	1.60	0.32	47.91	0.17	7.8	0.06
30	OM0200_	5064.40	19.1	3111.2	2112.1	1.47	0.29	47.77	0.19	11.2	0.05
31		5219.15	19.2	3107.5	2092.6	1.48	0.29	47.54	0.23	17.7	0.04

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
32		5373.90	19.1	3110.9	2224.2	1.40	0.27	47.18	0.15	14.1	0.02
33		5528.65	19.2	3107.8	2350.2	1.32	0.25	46.81	0.05	5.7	0.02
34	OM0198_	5703.02	19.2	3107.8	2421.5	1.28	0.24	46.59	-0.01	-1.6	0.02
35		5897.02	19.2	3107.7	2616.8	1.19	0.22	46.47	-0.09	-8.4	0.02
36	OM0197_	6093.45	19.2	3107.6	2534.1	1.23	0.21	46.23	-0.09	-7.8	0.03
37		6292.31	19.2	3107.4	2214.0	1.40	0.23	45.89	-0.02	-1.9	0.04
38		6491.17	19.2	3107.3	1962.7	1.58	0.26	45.51	0.00	0.0	0.05
39		6690.03	19.2	3107.1	1764.8	1.76	0.28	45.08	-0.01	-0.8	0.06
40		6888.89	19.4	3105.4	1561.6	1.99	0.31	44.66	-0.03	-1.6	0.08
41		7087.75	19.4	3105.4	1364.4	2.28	0.35	44.22	-0.05	-3.1	0.09
42		7286.61	19.4	3105.3	1160.7	2.68	0.39	43.77	-0.10	-5.0	0.12
43	OM0193_	7482.20	19.5	3103.1	1033.5	3.00	0.43	43.46	-0.12	-5.6	0.14
44		7674.51	19.5	3103.1	994.2	3.12	0.44	43.35	-0.07	-3.5	0.15
45		7866.82	19.4	3105.0	969.8	3.20	0.45	43.22	-0.05	-2.3	0.16
46		8059.13	19.4	3105.0	953.3	3.26	0.46	43.08	-0.03	-1.6	0.17
47		8251.44	19.4	3104.9	944.5	3.29	0.47	42.94	-0.02	-1.1	0.18
48		8443.75	19.4	3104.9	934.6	3.32	0.47	42.79	-0.02	-0.9	0.18
49		8636.06	19.5	3103.4	924.5	3.36	0.47	42.63	-0.02	-0.8	0.19
50		8828.37	19.4	3104.7	920.7	3.37	0.47	42.48	-0.02	-0.8	0.19
51		9020.68	19.4	3104.8	932.3	3.33	0.45	42.34	0.00	0.2	0.18
52		9212.99	19.2	3104.6	956.5	3.25	0.43	42.21	0.02	1.2	0.17
53		9405.30	19.2	3104.6	970.1	3.20	0.43	42.04	0.01	0.7	0.17
54		9597.61	19.4	3104.9	973.3	3.19	0.43	41.87	-0.01	-0.2	0.16
55		9789.92	19.4	3105.0	971.0	3.20	0.43	41.69	-0.03	-0.8	0.16
56	OM0187_	9984.67	19.4	3105.0	970.3	3.20	0.43	41.45	-0.04	-1.3	0.16
57		10181.87	19.4	3104.9	973.5	3.19	0.43	41.17	-0.02	-1.4	0.17
58		10379.07	19.5	3104.6	953.4	3.26	0.44	40.86	-0.04	-2.0	0.18
59		10576.27	19.5	3104.6	925.4	3.35	0.46	40.55	-0.05	-2.6	0.20
60		10773.47	19.7	3103.3	897.1	3.46	0.47	40.24	-0.06	-3.1	0.22
61		10970.67	19.7	3103.2	864.4	3.59	0.49	39.94	-0.07	-3.6	0.24
62		11167.87	19.8	3101.2	822.3	3.77	0.52	39.66	-0.05	-2.6	0.26
63		11365.07	19.5	3104.0	798.6	3.89	0.55	39.39	-0.03	-1.3	0.26
64		11562.27	19.5	3104.0	799.0	3.88	0.55	39.08	-0.04	-2.0	0.26
65		11759.47	19.5	3103.9	808.9	3.84	0.57	38.79	-0.04	-2.1	0.26
66		11956.67	19.7	3103.5	811.7	3.82	0.58	38.49	-0.04	-2.0	0.26
67		12153.87	19.7	3103.5	807.0	3.85	0.58	38.20	-0.03	-1.7	0.27
68		12351.07	19.7	3103.5	809.4	3.83	0.59	37.92	-0.02	-0.9	0.28
69		12548.27	19.7	3103.5	816.4	3.80	0.60	37.63	-0.01	-0.3	0.28
70		12745.47	19.7	3103.5	827.7	3.75	0.60	37.32	-0.02	-0.9	0.29
71		12942.67	19.7	3103.6	836.7	3.71	0.60	37.00	-0.04	-2.6	0.29

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
72		13139.87	19.7	3103.5	834.8	3.72	0.60	36.69	-0.06	-3.8	0.30
73		13337.07	19.8	3102.6	830.0	3.74	0.62	36.41	-0.04	-2.1	0.31
74		13534.27	19.7	3103.4	845.1	3.67	0.64	36.18	0.03	1.6	0.31
75		13731.47	19.5	3103.0	872.8	3.56	0.62	35.88	0.02	1.3	0.30
76		13928.67	19.5	3102.9	892.0	3.48	0.61	35.56	-0.01	-0.6	0.30
77		14125.87	19.8	3103.0	887.9	3.49	0.62	35.24	-0.03	-1.9	0.32
78		14323.07	20.0	3101.7	879.6	3.53	0.64	34.95	-0.02	-1.4	0.33
79		14520.27	19.8	3103.0	882.3	3.52	0.68	34.70	0.03	1.4	0.33
80		14717.47	19.7	3103.2	901.6	3.44	0.72	34.41	0.03	1.9	0.33
81	OM0173_	14914.07	20.0	3102.0	891.5	3.48	0.69	34.11	-0.12	-8.1	0.34
82		15110.07	20.5	3087.3	889.4	3.47	0.63	34.06	-0.19	-11.7	0.34
83		15306.07	20.3	3097.1	1044.0	2.97	0.67	34.36	0.10	6.4	0.32
84	OM0171_	15500.37	20.0	3102.3	1180.2	2.63	0.61	34.25	0.12	8.2	0.29
85		15692.97	20.1	3100.4	1257.2	2.47	0.59	34.06	0.19	15.7	0.26
86		15885.57	19.5	3100.1	1448.8	2.14	0.50	33.78	0.18	16.7	0.20
87		16078.17	19.5	3099.9	1688.0	1.84	0.45	33.49	0.15	17.0	0.15
88		16270.77	19.5	3099.8	1973.1	1.57	0.38	33.14	0.06	9.0	0.10
89	OM0167_	16461.47	19.8	3103.6	2031.7	1.53	0.37	32.74	-0.03	-1.3	0.10
90		16650.27	20.0	3103.7	1815.4	1.71	0.42	32.32	-0.10	-11.3	0.12
91		16839.07	20.1	3103.0	1495.2	2.08	0.46	31.93	-0.14	-16.7	0.17
92		17027.87	20.4	3099.2	1236.2	2.51	0.53	31.61	-0.10	-11.9	0.22
93		17216.67	20.3	3101.5	1146.7	2.70	0.57	31.37	0.01	0.2	0.24
94		17405.46	20.3	3101.5	1132.5	2.74	0.57	30.99	-0.03	-2.5	0.25
95		17594.26	20.3	3101.5	1139.8	2.72	0.58	30.59	-0.08	-6.1	0.26
96		17783.06	20.4	3099.7	1170.9	2.65	0.59	30.25	-0.06	-4.5	0.26
97		17971.86	20.4	3099.9	1220.8	2.54	0.59	29.91	-0.05	-2.4	0.26
98		18160.66	20.3	3101.7	1354.4	2.29	0.55	29.56	-0.05	-1.3	0.24
99	OM0161_	18339.18	20.5	3097.7	1385.6	2.24	0.52	29.19	0.03	4.0	0.24
100		18507.43	20.4	3100.0	1295.2	2.39	0.50	28.93	0.32	33.0	0.24
101		18675.67	19.7	3094.1	1506.5	2.05	0.41	28.30	0.23	35.8	0.14
102		18843.92	20.0	3100.1	1694.9	1.83	0.34	27.60	0.07	13.3	0.08
103	OM0158_	18956.79	20.5	3099.1	1660.5	1.87	0.36	27.27	-0.06	-11.6	0.09
104		19014.29	21.1	3081.8	1616.8	1.91	0.38	27.09	-0.41	-53.5	0.12
105	OM0157m_	19050.04	21.3	3075.0	1623.6	1.89	0.39	26.58	-1.00	-102.4	0.13
106	OM0157v_	19089.79	21.5	3059.1	1430.9	2.14	0.45	27.10	-0.59	-64.5	0.17
107		19155.29	22.0	3029.9	1312.3	2.31	0.50	27.60	-0.31	-34.3	0.20
108	OM0156_	19284.29	21.3	3074.7	1365.8	2.25	0.53	27.76	-0.05	-4.4	0.23
109		19476.79	20.0	3097.2	1709.3	1.81	0.49	27.65	0.23	25.4	0.17

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
110		19669.29	18.9	3047.4	2526.2	1.21	0.35	27.36	0.34	32.9	0.05
111		19861.79	19.8	3095.0	3655.6	0.85	0.24	26.74	0.12	10.6	0.01
112	OM0153_	20056.37	20.3	3102.2	4046.2	0.77	0.22	26.41	0.01	0.8	0.01
113		20253.03	20.4	3102.3	3643.7	0.85	0.24	26.33	-0.03	-2.5	0.02
114		20449.69	20.7	3100.1	2940.7	1.05	0.28	26.22	-0.10	-7.8	0.04
115		20646.35	20.8	3097.8	2517.1	1.23	0.32	26.18	-0.10	-7.6	0.06
116		20843.01	20.7	3099.8	2381.5	1.30	0.36	26.18	-0.05	-3.8	0.08
117		21039.67	20.5	3100.9	2417.5	1.28	0.39	26.16	-0.03	-2.2	0.08
118		21236.33	20.5	3100.8	2468.9	1.26	0.40	26.12	-0.03	-1.8	0.08
119		21432.99	20.4	3100.1	2505.2	1.24	0.42	26.09	-0.02	-1.5	0.09
120		21629.65	20.5	3100.8	2478.2	1.25	0.41	26.02	-0.05	-3.2	0.09
121	OM0146_	21756.98	20.5	3101.0	2457.3	1.26	0.43	25.83	-0.07	-3.8	0.10
122	OM0144_	21881.58	20.7	3100.7	2390.5	1.30	0.45	25.52	-0.07	-3.6	0.11
123		22072.78	21.0	3098.1	2309.5	1.34	0.45	25.14	-0.15	-7.8	0.12
124		22263.98	21.1	3095.7	2230.9	1.39	0.47	24.86	-0.12	-6.7	0.14
125		22455.18	21.3	3092.7	2200.9	1.41	0.47	24.56	-0.12	-6.6	0.15
126		22646.38	21.3	3093.5	2280.8	1.36	0.47	24.43	0.05	2.7	0.14
127	OM0141_	22767.48	21.3	3093.3	2162.2	1.43	0.46	24.64	0.23	10.2	0.14
128	OM0139_	22889.48	21.0	3098.8	2176.0	1.42	0.48	24.70	0.24	8.7	0.12
129		23082.48	21.0	3098.8	2346.9	1.32	0.46	24.25	0.06	2.5	0.11
130		23275.48	21.1	3097.2	2510.5	1.23	0.43	23.97	0.06	2.9	0.09
131		23468.48	21.1	3097.3	2624.4	1.18	0.39	23.76	0.12	6.5	0.08
132	OM0136_	23652.83	21.3	3095.5	2782.0	1.11	0.39	23.54	0.11	6.1	0.07
133		23828.54	21.3	3095.4	2916.8	1.06	0.37	23.37	0.08	4.6	0.06
134		24004.24	21.4	3093.4	2994.8	1.03	0.34	23.22	0.07	4.2	0.05
135		24179.94	21.4	3093.7	3167.8	0.98	0.33	23.10	0.10	5.8	0.03
136		24355.65	21.4	3093.7	3488.3	0.89	0.32	22.93	0.07	4.1	0.02
137		24531.35	21.5	3092.3	3837.4	0.81	0.29	22.75	0.03	2.3	0.01
138		24707.06	21.7	3089.2	4111.7	0.75	0.25	22.62	0.04	3.1	0.01
139	OM0131_	24890.01	21.7	3089.2	4188.1	0.74	0.26	22.34	0.03	1.8	0.01
140		25080.21	21.8	3086.1	4061.9	0.76	0.24	21.92	0.00	0.0	0.01
141		25270.41	21.8	3086.2	3946.8	0.78	0.25	21.53	0.00	-0.2	0.01
142		25460.61	21.8	3086.2	3839.1	0.80	0.26	21.14	0.01	0.2	0.01
143		25650.81	21.8	3086.2	3783.5	0.82	0.23	20.74	-0.01	-0.4	0.01
144	OM0128_	25836.61	21.8	3086.0	3639.0	0.85	0.23	20.52	-0.04	-1.7	0.01
145		26018.01	22.0	3083.8	3397.3	0.91	0.27	20.55	-0.04	-1.8	0.02
146		26199.41	22.0	3083.9	3193.2	0.97	0.30	20.58	-0.04	-1.6	0.02
147		26380.81	22.0	3084.0	3026.2	1.02	0.32	20.60	-0.04	-1.8	0.02
148		26562.21	22.0	3083.9	2880.4	1.07	0.33	20.60	-0.07	-3.1	0.03
149	OM0125_	26737.74	22.2	3079.6	2631.1	1.17	0.34	20.40	-0.14	-6.3	0.04

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
150		26907.40	22.5	3072.1	2358.2	1.30	0.35	20.08	-0.18	-7.9	0.05
151		27077.06	22.5	3072.1	2123.7	1.45	0.38	19.92	-0.05	-2.2	0.06
152	OM0123_	27245.89	22.4	3076.2	2087.4	1.47	0.39	19.73	0.05	2.3	0.07
153		27413.90	22.1	3080.8	2158.1	1.43	0.39	19.44	0.06	2.6	0.06
154		27581.91	22.1	3080.9	2255.1	1.37	0.37	19.16	0.07	3.1	0.05
155		27749.91	22.1	3081.0	2375.3	1.30	0.35	18.88	0.09	4.1	0.04
156		27917.92	22.1	3081.0	2491.2	1.24	0.33	18.57	0.08	3.7	0.04
157		28085.93	22.1	3081.0	2644.4	1.17	0.30	18.23	0.03	1.3	0.03
158	OM0120_	28266.10	22.1	3080.9	2803.4	1.10	0.28	18.02	0.03	1.3	0.03
159		28458.43	22.2	3080.3	2912.5	1.06	0.28	17.93	0.04	1.8	0.03
160		28650.76	22.2	3080.4	2972.5	1.04	0.28	17.82	0.03	1.3	0.03
161		28843.09	22.1	3080.4	3030.9	1.02	0.27	17.72	0.03	1.4	0.02
162		29035.42	22.2	3080.7	3085.2	1.00	0.28	17.61	0.03	1.3	0.02
163		29227.75	22.1	3080.1	3237.1	0.95	0.25	17.49	0.02	0.6	0.02
164	OM0117_	29417.54	22.2	3080.8	3074.4	1.00	0.25	17.42	-0.04	-1.4	0.02
165		29604.79	22.5	3080.0	2720.1	1.13	0.28	17.44	-0.10	-4.4	0.03
166		29792.04	22.5	3079.8	2511.1	1.23	0.29	17.50	-0.12	-5.6	0.05
167		29979.29	22.5	3079.8	2412.8	1.28	0.29	17.59	-0.10	-5.3	0.06
168	OM0114_	30168.47	22.7	3078.9	2281.0	1.35	0.31	17.47	-0.10	-5.3	0.07
169		30359.58	22.5	3079.6	2214.8	1.39	0.31	17.20	-0.06	-2.9	0.07
170		30550.69	22.7	3079.0	2040.4	1.51	0.35	16.88	-0.06	-3.2	0.09
171		30741.80	22.7	3079.0	1919.0	1.60	0.36	16.59	-0.03	-1.7	0.10
172		30932.91	22.5	3078.9	1817.6	1.69	0.37	16.30	-0.01	-0.3	0.10
173		31124.02	22.7	3079.1	1710.3	1.80	0.37	15.92	-0.07	-3.2	0.11
174		31315.13	22.8	3078.7	1563.4	1.97	0.40	15.63	-0.04	-1.7	0.13
175		31506.24	22.7	3078.8	1491.0	2.06	0.42	15.29	-0.06	-2.5	0.13
176		31697.35	23.1	3075.8	1388.3	2.22	0.44	14.94	-0.10	-3.8	0.16
177	OM0109_	31883.65	23.2	3073.1	1359.5	2.26	0.46	14.74	-0.05	-2.1	0.17
178		32065.15	23.3	3070.0	1415.4	2.17	0.45	14.57	-0.03	-1.7	0.19
179		32246.65	23.3	3070.0	1492.8	2.06	0.45	14.40	-0.02	-1.3	0.19
180		32428.15	23.3	3070.1	1572.1	1.95	0.44	14.21	-0.03	-2.0	0.19
181		32609.65	23.3	3070.2	1652.7	1.86	0.45	14.04	-0.02	-1.8	0.19
182		32791.15	23.3	3070.3	1745.5	1.76	0.46	13.95	0.07	6.0	0.17
183		32972.65	23.3	3070.4	1875.0	1.64	0.45	13.79	0.10	9.2	0.15
184		33154.15	23.6	3062.8	2040.8	1.50	0.41	13.55	0.04	4.2	0.13
185		33335.65	23.8	3058.1	2210.8	1.38	0.37	13.35	0.03	2.7	0.12
186		33517.15	23.8	3058.2	2416.4	1.27	0.33	13.20	0.06	7.2	0.09
187	OM0105_	33696.20	23.9	3053.2	2649.7	1.15	0.30	13.04	0.07	7.9	0.06
188		33872.80	24.0	3047.5	2896.8	1.05	0.28	12.87	0.06	6.0	0.04
189		34049.40	24.2	3041.7	3204.2	0.95	0.25	12.72	0.07	7.3	0.03

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _m [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
190		34225.99	24.2	3041.7	3714.2	0.82	0.21	12.57	0.08	7.3	0.01
191		34402.59	24.3	3035.8	4266.0	0.71	0.18	12.38	0.05	4.5	0.00
192	OM0102_	34580.97	24.4	3029.6	4204.6	0.72	0.18	12.08	-0.02	0.2	0.00
193		34761.13	24.6	3023.5	3770.3	0.80	0.20	11.75	-0.04	-3.0	0.01
194		34941.30	24.6	3023.6	3598.3	0.84	0.21	11.46	-0.03	-2.4	0.01
195		35121.46	24.6	3023.7	3706.7	0.82	0.21	11.17	-0.01	-1.0	0.01
196		35301.62	24.6	3023.8	3909.3	0.77	0.22	10.88	0.00	0.1	0.01
197		35481.78	24.6	3023.8	4094.6	0.74	0.21	10.58	0.01	0.4	0.01
198	OM0099_	35666.57	24.7	3019.2	4206.0	0.72	0.20	10.42	0.00	-0.1	0.01
199		35855.99	24.7	3019.3	4201.5	0.72	0.21	10.41	-0.01	-0.6	0.01
200		36045.41	24.7	3019.5	4217.1	0.72	0.21	10.43	0.00	-0.1	0.01
201		36234.83	24.7	3019.6	4309.7	0.70	0.22	10.45	0.01	0.6	0.01
202		36424.25	24.7	3019.6	4458.9	0.68	0.22	10.45	0.01	0.6	0.01
203		36613.67	24.7	3019.6	4633.9	0.65	0.21	10.45	0.01	0.3	0.01
204		36803.09	24.7	3019.6	4718.1	0.64	0.19	10.47	0.02	0.7	0.00
205	OM0095_	36974.05	24.7	3019.3	4364.0	0.69	0.20	10.35	0.00	0.1	0.01
206		37126.54	24.8	3018.3	3674.3	0.82	0.22	10.10	-0.06	-2.9	0.01
207		37279.04	25.0	3017.6	2763.7	1.09	0.27	9.82	-0.14	-7.2	0.03
208		37431.53	25.4	3012.3	1959.5	1.54	0.34	9.56	-0.20	-10.6	0.05
209	OM0092_	37536.78	26.1	2992.7	1434.6	2.09	0.41	8.92	-0.70	-37.4	0.08
210	OM0090m_	37572.78	26.2	2986.9	1296.1	2.30	0.42	8.72	-0.87	-45.2	0.08
211	OM0090v_	37607.28	25.7	3006.1	1523.3	1.97	0.42	9.63	0.14	8.2	0.09
212	OM0088_	37708.95	24.3	3012.9	1918.9	1.57	0.38	9.58	0.20	12.8	0.07
213		37857.28	24.2	3009.6	2242.4	1.34	0.35	9.46	0.12	7.7	0.05
214		38005.61	24.3	3012.9	2632.0	1.14	0.32	9.42	0.11	7.4	0.03
215	OM0086_	38179.27	24.7	3018.0	2671.3	1.13	0.30	9.27	0.00	-0.3	0.03
216		38378.27	25.3	3018.1	2100.5	1.44	0.32	9.09	-0.15	-9.3	0.05
217		38577.27	25.4	3016.8	1620.3	1.86	0.41	9.04	-0.16	-9.8	0.09
218	OM0084_	38696.60	25.3	3018.1	1530.7	1.97	0.43	9.01	-0.18	-10.3	0.10
219		38736.26	25.3	3018.1	1511.4	2.00	0.44	9.05	-0.14	-8.2	0.10
220		38775.92	25.3	3018.1	1492.2	2.02	0.44	9.11	-0.08	-4.6	0.11
221		38815.58	25.3	3018.1	1475.9	2.04	0.44	9.12	-0.07	-3.8	0.11
222		38855.23	25.1	3018.2	1461.0	2.07	0.44	9.10	-0.09	-5.2	0.11
223		38894.89	25.1	3018.2	1452.9	2.08	0.44	9.06	-0.13	-7.5	0.12
224		38934.55	25.1	3018.3	1451.3	2.08	0.44	9.04	-0.14	-8.1	0.12
225		38974.21	25.1	3018.3	1451.5	2.08	0.45	9.06	-0.12	-6.5	0.12
226		39013.87	25.1	3018.3	1445.2	2.09	0.46	9.10	-0.08	-4.2	0.12
227		39053.52	25.1	3018.3	1436.2	2.10	0.46	9.15	-0.03	-1.8	0.12
228		39093.18	25.3	3018.2	1424.4	2.12	0.46	9.18	0.00	-0.1	0.13
229		39132.84	25.3	3018.2	1415.4	2.13	0.46	9.17	-0.01	-0.7	0.13

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
230		39172.50	25.1	3018.3	1416.0	2.13	0.46	9.12	-0.06	-3.5	0.13
231		39212.16	25.1	3018.3	1424.8	2.12	0.46	9.07	-0.11	-5.7	0.13
232		39251.81	25.1	3018.3	1423.0	2.12	0.46	9.06	-0.12	-6.3	0.13
233		39291.47	25.1	3018.3	1421.4	2.12	0.46	9.09	-0.09	-4.9	0.14
234		39331.13	25.1	3018.4	1428.7	2.11	0.46	9.09	-0.09	-4.7	0.14
235		39370.79	25.0	3017.5	1441.7	2.09	0.46	9.09	-0.09	-4.6	0.14
236		39410.45	25.1	3018.4	1447.6	2.09	0.46	9.13	-0.05	-2.6	0.14
237		39450.10	25.0	3017.4	1452.3	2.08	0.47	9.19	0.01	0.7	0.14
238		39489.76	24.7	3015.4	1466.7	2.06	0.48	9.18	0.01	0.6	0.14
239		39529.42	24.6	3012.9	1490.4	2.02	0.47	9.18	0.01	0.6	0.13
240		39569.08	24.7	3015.4	1509.9	2.00	0.47	9.22	0.05	2.8	0.13
241		39608.74	24.6	3012.9	1537.7	1.96	0.47	9.31	0.14	7.4	0.13
242		39648.39	24.4	3009.4	1566.1	1.92	0.47	9.44	0.27	13.5	0.13
243		39688.05	24.4	3009.4	1590.9	1.89	0.47	9.55	0.38	18.9	0.12
244	OM0081_	39718.28	24.4	3009.3	1600.1	1.88	0.46	9.69	0.21	13.8	0.12
245		39739.08	25.0	3017.6	1544.7	1.95	0.46	10.17	0.07	6.4	0.12
246		39759.89	25.4	3018.7	1453.4	2.08	0.47	10.70	-0.02	-2.1	0.13
247		39780.69	25.5	3018.1	1360.4	2.22	0.49	11.26	-0.08	-11.6	0.14
248		39801.49	25.5	3018.1	1271.3	2.37	0.49	11.80	-0.16	-28.7	0.14
249	OM0080_c (traversa steccaia)	39814.39	25.0	3017.9	1158.1	2.61	0.55	12.27	0.00	0.0	0.15

Tabella B 4 - Tratto di valle. Output dettagliato

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
1	OM0080_a	68.50	18.1	2978.9	1987.3	1.50	0.23	7.26	0.14	16.8	0.02
2	OM0079_	217.70	19.4	3019.1	2069.0	1.46	0.38	6.93	-0.09	-4.7	0.02
3		379.10	20.6	3005.0	1769.6	1.70	0.40	6.02	-0.80	-39.2	0.04
4		540.50	22.7	2865.1	1626.8	1.76	0.38	5.84	-0.78	-38.2	0.10
5		701.90	22.7	2865.9	1434.3	2.00	0.48	6.36	-0.05	-2.6	0.13
6		863.30	21.9	2934.3	1486.5	1.97	0.52	6.65	0.44	21.1	0.14
7	OM0075_	1032.57	19.0	3005.3	1792.0	1.68	0.47	6.49	0.38	17.9	0.10
8		1209.71	19.4	3012.8	2213.6	1.36	0.40	6.32	0.19	8.6	0.06
9		1386.85	19.8	3015.2	2604.9	1.16	0.35	6.25	0.10	4.6	0.04
10		1563.99	20.2	3012.0	3007.6	1.00	0.32	6.25	0.09	4.0	0.03
11		1741.13	20.6	3004.8	3473.7	0.86	0.30	6.25	0.07	3.2	0.02
12		1918.27	20.6	3004.8	4040.8	0.74	0.26	6.24	0.05	2.3	0.01

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
13		2095.41	20.6	3004.7	4603.3	0.65	0.24	6.24	0.04	1.6	0.00
14	OM0071_	2262.61	21.1	2989.2	5017.6	0.60	0.22	6.13	0.00	0.3	0.00
15		2419.86	21.5	2968.5	5110.9	0.58	0.22	5.96	-0.01	-0.3	0.00
16		2577.11	21.5	2968.6	5146.8	0.58	0.22	5.81	0.01	0.3	0.00
17		2734.36	21.5	2968.7	5190.0	0.57	0.22	5.65	0.01	0.5	0.00
18	OM0068_	2905.58	21.5	2968.7	5159.9	0.58	0.22	5.44	0.00	0.2	0.00
19		3090.78	21.9	2946.4	4989.2	0.59	0.23	5.20	-0.01	-0.5	0.00
20		3275.98	21.9	2946.8	4828.2	0.61	0.23	4.96	-0.02	-0.9	0.01
21		3461.18	21.9	2946.9	4731.1	0.62	0.24	4.75	-0.01	-0.5	0.01
22		3646.38	21.9	2947.0	4688.5	0.63	0.25	4.54	0.00	0.2	0.01
23	OM0065_	3838.20	21.9	2946.7	4720.0	0.62	0.25	4.41	0.00	-0.1	0.01
24		4036.63	21.9	2946.2	4783.8	0.62	0.24	4.39	-0.01	-0.4	0.01
25		4235.06	22.3	2925.3	4871.8	0.60	0.24	4.38	-0.01	-0.3	0.01
26		4433.49	22.3	2925.8	5027.1	0.58	0.23	4.37	0.00	0.1	0.01
27		4631.92	22.3	2926.2	5236.4	0.56	0.23	4.36	0.01	0.4	0.00
28		4830.35	22.3	2926.3	5459.3	0.54	0.22	4.35	0.01	0.4	0.00
29		5028.78	22.3	2926.3	5648.3	0.52	0.21	4.33	0.01	0.3	0.00
30	OM0062_	5220.49	22.3	2926.2	5721.3	0.51	0.20	4.24	0.00	0.0	0.00
31		5405.49	22.3	2925.9	5743.4	0.51	0.20	4.07	-0.01	-0.2	0.00
32		5590.49	22.3	2925.7	5902.0	0.50	0.19	3.92	0.00	-0.1	0.00
33		5775.49	22.3	2925.3	6196.4	0.47	0.18	3.78	0.01	0.4	0.00
34		5960.49	22.3	2924.8	6519.1	0.45	0.17	3.62	0.01	0.3	0.00
35	OM0059_	6144.49	22.7	2909.1	6762.0	0.43	0.17	3.47	-0.01	-0.3	0.00
36		6327.50	22.7	2909.5	6834.9	0.43	0.16	3.36	-0.02	-0.7	0.00
37		6510.50	22.7	2909.9	6853.9	0.42	0.16	3.26	-0.02	-0.8	0.00
38		6693.50	22.7	2910.3	6959.9	0.42	0.16	3.13	-0.05	-2.0	0.00
39		6876.51	22.7	2910.6	6701.8	0.43	0.16	3.07	-0.01	-0.3	0.00
40		7059.51	22.7	2910.8	6048.8	0.48	0.18	2.95	-0.02	-0.6	0.00
41		7242.52	22.7	2910.8	5400.1	0.54	0.20	2.84	-0.03	-1.4	0.00
42		7425.52	22.7	2910.8	5155.2	0.56	0.23	2.73	-0.04	-1.7	0.01
43		7608.52	22.7	2910.7	5207.6	0.56	0.22	2.64	-0.03	-1.2	0.01
44	OM0053_b	7794.83	22.7	2910.5	5153.6	0.56	0.21	2.42	0.02	0.7	0.01
45		7984.43	22.7	2910.3	4937.2	0.59	0.22	2.05	0.08	3.3	0.01
46		8174.03	22.7	2910.1	4795.5	0.61	0.21	1.63	0.10	4.0	0.01
47		8363.63	22.7	2909.9	4689.2	0.62	0.20	1.17	0.07	2.8	0.01
48		8553.23	22.7	2909.7	4492.8	0.65	0.10	0.70	0.04	1.4	0.01
49	OM0049_	8742.03	22.7	2909.5	4260.1	0.68	0.10	0.50	0.00	0.1	0.01
50		8930.03	22.7	2909.2	4093.3	0.71	0.19	0.58	-0.01	-0.4	0.01
51		9118.03	22.7	2908.8	3890.7	0.75	0.26	0.67	-0.02	-0.8	0.01
52		9306.03	22.7	2908.5	3710.5	0.78	0.27	0.75	-0.03	-1.1	0.02

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
53		9494.03	22.7	2908.1	3549.5	0.82	0.29	0.84	-0.04	-1.3	0.02
54		9682.03	22.7	2907.9	3402.9	0.85	0.30	0.93	-0.04	-1.4	0.02
55	OM0046_(Berrettino)	9862.88	23.1	2905.0	3167.4	0.92	0.32	0.97	-0.06	-2.0	0.03
56		10036.59	22.7	2907.5	2988.4	0.97	0.33	0.99	-0.06	-2.1	0.03
57		10210.30	23.5	2893.9	2771.8	1.04	0.35	1.01	-0.06	-2.2	0.04
58		10384.01	23.5	2893.9	2561.7	1.13	0.38	1.02	-0.06	-2.3	0.04
59		10557.72	23.9	2875.2	2399.4	1.20	0.39	1.02	-0.08	-2.9	0.05
60		10731.43	24.3	2850.2	2274.1	1.25	0.41	1.03	-0.09	-3.4	0.06
61		10905.14	24.3	2850.4	2199.3	1.30	0.42	1.04	-0.10	-4.0	0.06
62	OM0043_	11054.62	24.3	2850.3	2140.4	1.33	0.41	1.03	-0.13	-5.4	0.07
63		11179.87	24.7	2820.6	2048.0	1.38	0.39	1.07	-0.11	-4.7	0.07
64		11305.12	24.7	2820.8	1982.2	1.42	0.39	1.15	-0.07	-2.9	0.07
65		11430.37	24.7	2820.9	1872.5	1.51	0.41	1.19	-0.05	-2.2	0.07
66	OM0041_	11501.87	25.1	2783.0	1811.9	1.54	0.38	1.20	-0.15	-7.1	0.06
67		11519.62	26.0	2694.8	1807.0	1.49	0.36	1.38	-0.17	-8.7	0.06
68		11537.37	26.4	2646.0	1772.3	1.49	0.35	1.59	-0.17	-8.5	0.06
69		11555.12	26.8	2592.7	1653.6	1.57	0.36	1.70	-0.27	-12.0	0.06
70	OM0039m	11571.00	26.4	2645.8	1503.1	1.76	0.43	2.07	0.00	0.0	0.06
71	OM0039v_	11587.78	26.0	2694.6	1544.1	1.75	0.40	1.33	-0.62	-26.3	0.08
72		11607.35	25.6	2739.6	1555.9	1.76	0.41	1.46	-0.27	-6.5	0.09
73		11626.92	25.6	2739.7	1503.4	1.82	0.41	1.27	-0.24	-0.6	0.10
74		11646.49	24.7	2820.0	1474.2	1.91	0.43	1.15	-0.13	3.4	0.12
75		11666.07	23.5	2883.4	1473.1	1.96	0.44	0.99	-0.05	3.4	0.13
76		11685.64	22.3	2872.3	1509.1	1.90	0.43	0.79	-0.03	-0.9	0.12
77		11705.21	22.7	2885.9	1530.0	1.89	0.43	0.68	0.09	0.4	0.12
78		11724.78	23.1	2890.7	1529.4	1.89	0.43	0.56	0.19	3.5	0.12
79		11744.35	23.5	2883.6	1511.0	1.91	0.43	0.40	0.26	6.4	0.12
80		11763.92	23.9	2868.9	1480.7	1.94	0.40	0.28	0.36	10.2	0.12
81		11783.49	24.3	2848.1	1425.3	2.00	0.32	-0.01	0.30	16.0	0.12
82		11803.06	24.3	2848.1	1360.6	2.09	0.28	-0.20	0.34	25.7	0.13
83		11822.63	23.9	2868.7	1307.3	2.19	0.30	-0.22	0.55	42.3	0.14
84		11842.20	21.5	2801.8	1338.0	2.09	0.28	-0.60	0.40	31.0	0.12
85	OM0037_	11922.16	23.1	2890.3	1636.6	1.77	0.24	-0.97	0.07	5.3	0.09
86		12062.50	23.9	2869.5	1780.4	1.61	0.21	-0.97	-0.07	-5.1	0.10
87		12202.83	24.3	2849.5	1893.3	1.51	0.40	-0.89	-0.13	-7.9	0.10
88		12343.17	24.3	2850.2	2191.4	1.30	0.40	-0.69	-0.07	-3.0	0.09
89		12483.51	24.7	2826.4	2669.3	1.06	0.33	-0.35	0.14	7.5	0.06
90		12623.84	23.9	2869.4	3296.6	0.87	0.28	-0.13	0.22	9.5	0.03

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
91	OM0034_	12705.01	23.5	2879.9	3419.8	0.84	0.27	0.00	0.33	12.4	0.02
92	OM0032m	12723.01	23.9	2868.3	3575.5	0.80	0.25	-0.22	0.16	6.2	0.02
93	OM0032v_	12752.51	24.3	2851.7	3692.7	0.77	0.23	-0.60	0.11	4.0	0.02
94	OM0030_	12855.71	24.3	2851.6	3824.1	0.75	0.23	-0.95	0.12	4.0	0.02
95		13017.11	24.3	2851.5	3854.3	0.74	0.23	-1.10	0.01	0.4	0.02
96		13178.51	24.3	2851.0	3721.1	0.77	0.25	-1.20	-0.04	-1.5	0.03
97		13339.91	24.3	2850.4	3587.8	0.79	0.26	-1.25	-0.05	-2.1	0.03
98		13501.31	24.3	2849.7	3504.2	0.81	0.26	-1.29	-0.05	-2.0	0.03
99	OM0028_	13680.76	24.3	2848.8	3515.6	0.81	0.27	-1.29	-0.03	-1.2	0.04
100		13878.26	24.3	2847.6	3628.0	0.78	0.26	-1.26	-0.01	-0.5	0.03
101		14075.76	24.3	2846.3	3771.5	0.75	0.26	-1.24	-0.01	-0.3	0.03
102		14273.26	24.3	2844.8	3933.7	0.72	0.25	-1.21	0.00	0.0	0.03
103		14470.76	24.3	2843.3	4147.7	0.69	0.24	-1.20	0.00	0.1	0.03
104		14668.26	24.3	2841.5	4271.6	0.67	0.24	-1.20	-0.02	-0.7	0.03
105	OM0025_	14850.35	24.3	2839.6	4135.9	0.69	0.24	-1.30	-0.07	-3.0	0.03
106		15017.02	24.7	2846.4	3864.8	0.74	0.26	-1.46	-0.11	-4.9	0.04
107		15183.69	24.7	2847.6	3624.6	0.79	0.29	-1.59	-0.13	-5.3	0.05
108	OM0024_	15338.69	24.3	2834.6	3571.0	0.79	0.29	-1.61	-0.13	-5.3	0.06
109		15482.02	24.3	2833.8	3644.3	0.78	0.29	-1.53	-0.14	-5.6	0.06
110		15625.35	24.3	2833.1	3727.4	0.76	0.27	-1.47	-0.18	-6.6	0.06
111	OM0023_	15792.81	24.3	2831.9	3701.5	0.77	0.27	-1.47	-0.22	-8.5	0.07
112		15984.41	24.3	2830.9	3566.4	0.79	0.28	-1.54	-0.30	-11.9	0.09
113		16176.01	24.3	2830.8	3380.7	0.84	0.29	-1.61	-0.37	-15.5	0.12
114		16367.61	24.3	2831.4	3248.9	0.87	0.30	-1.67	-0.43	-18.9	0.16
115		16559.21	24.3	2832.6	3197.4	0.89	0.31	-1.72	-0.49	-22.6	0.19
116	OM0020_	16737.76	24.3	2834.9	3347.0	0.85	0.29	-1.76	-0.51	-22.8	0.20
117		16903.27	24.3	2837.3	3713.9	0.76	0.27	-1.73	-0.43	-18.2	0.17
118		17068.77	24.3	2838.8	4252.1	0.67	0.24	-1.70	-0.36	-14.1	0.12
119		17234.27	24.3	2838.7	4810.5	0.59	0.21	-1.78	-0.40	-14.6	0.09
120	OM0019_	17403.27	24.3	2838.0	4966.3	0.57	0.20	-2.03	-0.44	-16.1	0.09
121		17575.77	24.3	2837.1	4793.7	0.59	0.21	-2.44	-0.47	-17.2	0.12
122		17748.27	24.3	2837.0	4616.4	0.61	0.22	-2.80	-0.44	-16.2	0.17
123		17920.77	23.9	2745.1	4429.8	0.62	0.21	-3.06	-0.32	-11.8	0.19

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
124	OM0017_	18105.02	24.3	2839.7	4274.4	0.66	0.23	-3.33	-0.25	-9.0	0.27
125		18301.02	24.3	2839.2	4084.2	0.70	0.24	-3.60	-0.22	-7.7	0.35
126		18497.02	23.9	2735.7	3930.1	0.70	0.25	-3.85	-0.17	-5.8	0.36
127		18693.02	24.3	2841.1	3809.6	0.75	0.26	-4.20	-0.23	-7.4	0.49
128		18889.02	25.1	2933.9	3670.5	0.80	0.27	-4.67	-0.40	-12.1	0.68
129	OM0015_	19079.52	25.6	2927.2	3512.6	0.83	0.27	-4.57	-0.32	-11.1	0.76
130		19264.52	25.1	2934.2	3377.5	0.87	0.31	-4.02	-0.10	-4.7	0.86
131	OM0014_	19444.52	25.1	2935.7	3336.8	0.88	0.31	-3.89	-0.06	-3.1	0.91
132		19619.52	24.7	2895.8	3351.4	0.86	0.31	-4.06	-0.08	-3.6	0.88
133		19794.52	24.7	2893.8	3374.0	0.86	0.31	-4.13	0.01	0.2	0.90
134		19969.52	25.1	2937.8	3331.6	0.88	0.29	-4.18	0.12	4.2	1.03
135	OM0012_	20155.86	24.7	2890.0	3280.5	0.88	0.28	-4.31	0.16	5.7	0.99
136		20353.52	24.3	2793.1	3309.1	0.84	0.28	-4.71	-0.02	-0.8	0.86
137		20551.18	24.7	2893.0	3262.8	0.89	0.29	-5.07	-0.18	-7.0	1.03
138		20748.84	25.1	2950.7	3214.8	0.92	0.30	-5.38	-0.28	-11.4	1.20
139		20946.51	25.6	2973.0	3162.0	0.94	0.31	-5.67	-0.37	-15.5	1.35
140		21144.17	26.0	2963.3	3126.4	0.95	0.31	-5.93	-0.42	-18.5	1.41
141	OM0009_	21332.00	26.4	2939.3	3088.9	0.95	0.30	-5.93	-0.45	-20.4	1.43
142		21510.00	26.8	2887.8	3074.6	0.94	0.31	-5.66	-0.46	-20.6	1.37
143		21687.99	26.8	2888.0	3069.7	0.94	0.31	-5.37	-0.45	-19.9	1.40
144		21865.99	26.8	2887.9	3074.2	0.94	0.31	-5.04	-0.40	-17.3	1.43
145		22043.98	26.8	2888.1	3102.1	0.93	0.32	-4.65	-0.29	-12.7	1.45
146		22221.98	26.8	2887.6	3098.2	0.93	0.31	-4.17	-0.09	-3.8	1.46
147		22399.98	26.8	2889.5	3131.0	0.92	0.31	-3.71	0.09	4.0	1.43
148		22577.97	26.4	2931.1	3109.5	0.94	0.32	-3.28	0.24	10.2	1.44
149	OM0006_	22751.97	26.0	2942.2	3191.1	0.92	0.32	-3.37	0.12	5.2	1.37
150		22921.97	26.4	2931.4	3250.4	0.90	0.32	-3.74	-0.02	-0.7	1.31
151		23091.98	26.4	2932.1	3247.9	0.90	0.31	-4.06	-0.11	-5.1	1.29
152		23261.98	26.4	2932.8	3234.6	0.91	0.31	-4.39	-0.22	-10.7	1.28
153	OM0005_	23436.15	26.4	2931.6	3195.1	0.92	0.31	-4.54	-0.32	-15.6	1.34
154		23614.48	26.4	2929.8	3128.0	0.94	0.32	-4.45	-0.35	-17.0	1.45
155		23792.82	26.8	2908.3	3060.5	0.95	0.32	-4.42	-0.44	-21.5	1.57

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
156		23971.15	26.4	2927.5	3002.9	0.97	0.32	-4.34	-0.48	-23.1	1.72
157		24149.49	26.8	2911.8	2952.9	0.99	0.33	-4.31	-0.57	-27.1	1.79
158		24327.82	26.8	2912.3	2900.8	1.00	0.33	-4.20	-0.58	-27.8	1.88
159	OM0003_	24513.66	26.8	2911.3	2901.6	1.00	0.33	-4.30	-0.52	-25.4	2.01
160		24707.00	26.8	2910.5	2953.6	0.99	0.32	-4.61	-0.39	-20.0	2.17
161		24900.33	26.8	2912.3	2998.3	0.97	0.32	-4.89	-0.23	-12.7	2.24
162	OM0001_	25090.00	26.8	2911.1	3051.1	0.95	0.32	-4.80	-0.02	-1.2	2.34
163		25276.01	26.8	2910.9	2991.2	0.97	0.32	-4.35	0.23	13.4	2.41
164		25462.01	26.8	2910.2	2968.1	0.98	0.32	-4.02	0.36	21.7	2.47
165		25648.01	26.8	2909.2	2966.5	0.98	0.32	-3.73	0.46	28.6	2.53
166		25834.01	26.8	2908.1	2938.5	0.99	0.34	-3.45	0.54	34.3	2.59
167	OM00002_	26027.01	27.2	2895.2	2930.4	0.99	0.34	-3.37	0.54	34.5	2.63
168		26227.01	27.2	2895.2	2898.7	1.00	0.34	-3.48	0.45	29.5	2.72
169		26427.01	27.2	2895.6	2861.5	1.01	0.34	-3.64	0.32	21.0	2.81
170		26627.01	27.2	2896.0	2836.8	1.02	0.34	-3.83	0.16	10.6	2.89
171		26827.01	27.2	2896.8	2837.4	1.02	0.34	-4.02	0.00	-0.2	2.96
172		27027.01	26.8	2895.6	2791.4	1.04	0.34	-4.14	-0.09	-6.2	3.00
173		27227.01	26.8	2894.2	2767.2	1.05	0.34	-4.24	-0.17	-11.6	3.05
174		27427.01	26.8	2892.9	2748.5	1.05	0.34	-4.36	-0.26	-17.9	3.10
175		27627.01	27.2	2900.9	2719.5	1.07	0.34	-4.51	-0.38	-27.0	3.21
176		27827.01	26.8	2890.0	2701.3	1.07	0.33	-4.66	-0.51	-35.9	3.22
177	OM00005_	28023.44	26.8	2888.6	2671.5	1.08	0.34	-4.65	-0.57	-41.6	3.30
178		28216.30	27.2	2903.4	2647.4	1.10	0.35	-4.51	-0.61	-47.4	3.48
179		28409.17	27.2	2903.9	2629.9	1.10	0.35	-4.39	-0.68	-55.3	3.57
180		28602.03	27.7	2898.5	2604.1	1.11	0.36	-4.30	-0.77	-65.7	3.70
181		28794.89	27.7	2898.7	2586.1	1.12	0.36	-4.21	-0.86	-76.8	3.84
182		28987.75	27.2	2901.5	2509.6	1.16	0.37	-4.06	-0.89	-83.9	3.96
183		29180.61	27.2	2902.0	2341.1	1.24	0.39	-3.85	-0.87	-84.8	4.02
184	OM00007_	29366.41	27.2	2902.3	2099.1	1.38	0.43	-3.73	-0.78	-79.4	4.07
185		29545.16	27.2	2902.4	1865.9	1.56	0.48	-3.82	-0.75	-79.7	4.13

VOL	Sezione di monte	x [Km]	t _M [h]	Q [m ³ /s]	Ω [m ²]	U [m/s]	Fr []	B [m slm]	Δb [m]	ΔΩ _s [m ²]	Q _s [m ³ /s]
186		29723.91	27.2	2902.5	1647.6	1.76	0.54	-3.91	-0.72	-80.5	4.19
187		29902.66	27.2	2902.4	1457.4	1.99	0.61	-4.01	-0.70	-80.6	4.26
188		30081.41	27.7	2903.2	1312.7	2.21	0.67	-4.09	-0.66	-79.2	4.19
189		30260.16	28.1	2884.6	1217.0	2.37	0.66	-4.13	-0.58	-72.4	4.04
190		30438.91	28.1	2884.7	1201.5	2.40	0.65	-4.05	-0.38	-49.7	4.03
191		21.1	113 7.1	509.7	2.23	0.50	-4.28	-0.49	-66.2	4.02	
	OM00009_										