

# PONTE SULLO STRETTO DI MESSINA



## PROGETTO DEFINITIVO ALTERNATIVE AI SITI DI DEPOSITO

(Richieste CTVA del 22/12/2011 Prot. CTVA/2011/4534 e del 16/03/2012 Prot. CTVA/2012/1012)

### EUROLINK S.C.p.A.

IMPREGILO S.p.A.  
SOCIETÀ ITALIANA PER CONDOTTE D'ACQUA S.p.A.  
COOPERATIVA MURATORI E CEMENTISTI - C.M.C. DI RAVENNA SOC. COOP. A.R.L.  
SACYR S.A.U.  
ISHIKAWAJIMA - HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD  
A.C.I. S.C.P.A. - CONSORZIO STABILE

#### IL PROGETTISTA

 SIGMA INGEGNERIA s.r.l.  
Via della Libertà 201/A  
90143 PALERMO  
Tel. 091.8254162 Fax 091.307899  
e-mail: sgman@sigma.com

(Dott. Ing. F. Giordano)



Ing. E. Pagani  
Ordine Ing. Milano n°15408

IL CONTRAENTE GENERALE  
PROJECT MANAGER  
(Ing. P.P. Marcheselli)

STRETTO DI MESSINA  
Direttore Generale  
Ing. G. Fiammenghi

STRETTO DI MESSINA  
Amministratore Delegato  
Dott. P. Ciucci

Firmato digitalmente ai sensi dell' "Art.21 del D.Lgs. 82/2005"

CZV0928\_F0

*Unità Funzionale* COLLEGAMENTI VERSANTE SICILIA  
*Tipo di sistema* CANTIERI  
*Raggruppamento di opere/attività* RIPASCIMENTO  
*Opera - tratto d'opera - parte d'opera* ELEMENTI DI CARATTERE GENERALE  
*Titolo del documento* STUDIO RICAMBIO IDRICO

CODICE

C G 0 0 0 0 P S D V S C Z C 3 G O 0 0 0 0 0 0 0 7 F 0

REV	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
F0	31/05/2012	EMISSIONE FINALE	DICA CATANIA	E. FOTI	F. GIORDANO

NOME DEL FILE: CZV0928\_F0

revisione interna: \_\_



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE (DICA)

CONVENZIONE TRA LA SOCIETA' EUROLINK S.C.p.A. E IL  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE DELL'UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI CATANIA



*Studi propedeutici relativi alla possibilità di impiego dei materiali di scavo per il ripascimento delle coste e analisi rischio idraulico dei bacini interessati dalle opere previste nel Progetto Definitivo del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina sul versante Sicilia*

*Studio del ricambio idrico*

Il Responsabile Scientifico  
(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Il Direttore del DICA  
(Prof. Ing. Enrico FOTI)

Catania, Maggio 2012

## Indice

1	Introduzione .....	2
2	Fonti di informazione .....	6
3	Analisi idrologica .....	7
3.1	Metodologia.....	7
3.1.1	Analisi probabilistica delle piogge di breve durata e massima intensità .....	7
3.1.2	Calcolo della portata massima .....	13
3.2	Elaborazioni idrologiche .....	15
3.2.1	Curve di possibilità pluviometrica .....	15
3.2.2	Caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici ....	19
3.2.3	Stima delle portate alla foce.....	21
4	Verifica idraulica delle interferenze tra il ripascimento protetto e i corsi d'acqua .....	22
4.1	Descrizione del modello .....	22
4.2	Descrizione del dominio di calcolo .....	29
4.3	Condizioni al contorno .....	30
4.4	Analisi dei risultati.....	32
5	Sintesi dei risultati e conclusioni.....	34
	Bibliografia .....	36
	Elenco delle Figure.....	38
	Elenco delle Tabelle .....	42
	Appendice A.....	43
	Appendice B.....	65

# 1 Introduzione

Durante la fase approvativa del Progetto Definitivo del Collegamento Stabile dello Stretto di Messina sul versante Sicilia è emersa la necessità di verificare un diverso impiego di parte del materiale di scavo derivante dalla realizzazione della citata opera. In particolare, si è individuata la possibilità di utilizzare parte di tale materiale per la realizzazione di opere di riqualificazione del litorale tirrenico compreso tra la foce del Torrente Niceto e la foce del torrente Calvaruso, realizzando un ripascimento protetto.

In particolare, è prevista la realizzazione di cinque lunghi tratti di barriere soffolte, interrotte solo in corrispondenza delle foci dei torrenti Caracciolo, Senia, Pietra e Saponara, a protezione di un ripascimento artificiale a tergo di dette barriere (dalla Figura 1.1 alla Figura 1.4 si riportano una planimetria del progetto e alcune sezioni tipo).

Il progetto di riqualificazione prevede, altresì, il salpamento delle numerose scogliere, perlopiù del tipo emerso, che negli ultimi decenni sono state realizzate a protezione del litorale in oggetto e che non solo non hanno conseguito l'obiettivo desiderato ma, perlomeno in taluni casi, hanno prodotto effetti indesiderati. Infatti, sebbene le suddette scogliere fossero state realizzate al fine di salvaguardare il territorio posto immediatamente a ridosso della spiaggia e fortemente antropizzato, la probabile mancanza di un approccio con riguardo all'intera unità fisiografica ha talvolta amplificato i processi erosivi nei tratti di costa immediatamente sottoflutto, contribuendo a determinare litorali fortemente degradati.

In tale contesto, la scelta effettuata da Eurolink S.C.p.A. di realizzare una riqualificazione dei litorali in oggetto tramite un ripascimento protetto da una barriera soffolta, piuttosto che un più immediato ripascimento libero, è certamente da condividere. Tale soluzione, infatti, si rivela appropriata non solo a fronte della considerazione che il ripascimento libero non interviene sulle cause di

erosione né, pertanto, sul tasso di arretramento della linea di riva, ma altresì con riferimento alle ulteriori circostanze che un ripascimento protetto:

- richiede una minore quantità di volumi a parità di avanzamento della linea di riva;
- favorisce l'intrappolamento dei sedimenti che pertanto non tendono a disperdersi verso il largo per effetto delle correnti di ritorno;
- interviene sulle cause dell'erosione causando uno smorzamento dell'energia del moto ondoso incidente e delle correnti litoranee responsabili del trasporto solido.

Tali circostanze, in definitiva, consentono l'incremento della stabilità della spiaggia e, dunque, riducono fortemente la necessità di ulteriori ripascimenti periodici.

Appare opportuno evidenziare il fatto che, per quanto concerne il ripascimento, è previsto l'uso di sedimenti provenienti dagli scavi delle opere di collegamento al Ponte opportunamente selezionati granulometricamente. Detta selezione, essendo per lo più rivolta alla rimozione della frazione fine, unitamente alla realizzazione della protezione al piede del ripascimento che, come detto, favorisce l'intrappolamento dei sedimenti e lo smorzamento del moto ondoso incidente, consentirà di limitare al massimo, se non annullare del tutto, spiacevoli fenomeni di intorbidamento delle acque.

È importante, infine, rilevare, soprattutto nel caso in oggetto, come lo smorzamento dell'energia del moto ondoso sulle barriere soffolte abbia l'ulteriore vantaggio di ridurre drasticamente la risalita del moto ondoso sulla spiaggia e, dunque, di mitigare il rischio da mareggiate nel territorio posto immediatamente a ridosso della spiaggia, densamente antropizzato.



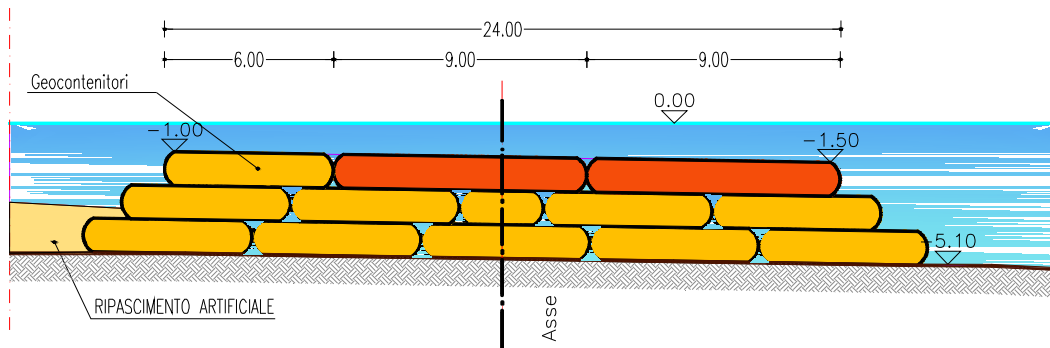


Figura 1.4 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in geocontenitori

Il presente studio riporta le analisi condotte per la valutazione delle interferenze tra le opere in progetto e le portate dei corsi d'acqua principali afferenti al tratto di costa oggetto dell'intervento.

I torrenti interessati dal presente studio sono (da Nord verso Sud): torrente Calvaruso, torrente Saponara, torrente Pietra, torrente Senia, torrente Caracciolo e torrente Niceto.

A tal fine sono stati condotti analisi idrologiche volte alla determinazione delle portate alla foce dei citati corsi d'acqua per diversi tempi di ritorno. Si precisa che, cautelativamente, tali portate non tengono conto di eventuali effetti di laminazione di opere idrauliche previste nell'ambito del presente progetto.

Tali portate sono state quindi adottate per simulare il campo di moto e il relativo trasporto solido nel tratto di costa interessato dal ripascimento protetto mediante un apposito modello bidimensionale.

In dettaglio, il presente elaborato è organizzato come segue: il capitolo 2 riporta le fonti di informazioni utilizzate nella stesura dello studio; il capitolo 3 descrive le elaborazioni idrologiche che hanno portato alla determinazione delle portate alla foce; il capitolo 4, dopo una descrizione del modello di calcolo adottato per la modellazione idraulica e delle condizioni al contorno utilizzate, descrive il campo di moto e di trasporto solido associati alle piene dei diversi corsi d'acqua; infine il capitolo 5 riporta alcune considerazioni conclusive.

## **2 Fonti di informazione**

Le elaborazioni riportate nel presente progetto sono state condotte facendo riferimento a svariate serie di dati.

Per quanto riguarda i dati pluviometrici, sono stati acquisiti i dati delle stazioni gestite dall'Osservatorio delle Acque del Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti, afferente all'Assessorato dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità della Regione Siciliana (già Servizio Idrografico). In particolare le stazioni utilizzate sono: Camaro, Calvaruso, Monforte.

Per quanto attiene ai dati batimetrici essi sono stati desunti dai rilievi topo-batrimetrici appositamente condotti per il presente studio dalla società SIGMA S.r.l. per conto di Eurolink S.c.p.A.

Si precisa che le informazioni relative l'intervento di ripascimento protetto nel tratto di litorale tirrenico compreso tra il torrente Calvaruso e il torrente Niceto sono state fornite dalla SIGMA S.r.l.. In particolare, ai fini del presente studio sono state utilizzate le informazioni relative sia al ripascimento che alla geometria delle previste barriere soffolte.

Infine la distribuzione dei sedimenti sul litorale è stata desunta dalla mappa sedimentologica eseguita dalla società SIGMA S.r.l. per conto di Eurolink S.c.p.A. nell'ambito delle indagini propedeutiche al presente studio.



## 3 Analisi idrologica

### 3.1 Metodologia

#### 3.1.1 Analisi probabilistica delle piogge di breve durata e massima intensità

L'analisi probabilistica delle piogge di breve durata è finalizzata alla valutazione indiretta delle portate di fissato tempo di ritorno  $T$  nelle sezioni oggetto di indagine. Non essendo disponibili infatti osservazioni idrometriche in stazioni nei bacini d'interesse, non è possibile determinare le portate di progetto attraverso metodi diretti.

La stima delle altezze di precipitazione di fissata durata e tempo di ritorno, è basata sull'analisi dei massimi annuali di precipitazione di breve durata (1, 3, 6, 12 e 24 ore). La metodologia utilizzata è articolata nelle seguenti fasi:

- raccolta e analisi preliminare dei dati;
- adattamento di una distribuzione di probabilità ai massimi annuali di precipitazione di breve durata;
- determinazione delle Curve di Probabilità Pluviometrica (CPP) di fissati tempi di ritorno;
- ragguglio areale delle precipitazioni in ogni bacino;

In particolare, le CPP consentono di calcolare l'altezza di precipitazione di fissata durata e tempo di ritorno. Diverse espressioni parametriche sono state proposte per le CPP. Nel presente lavoro si è fatto riferimento alla forma monomia, largamente utilizzata anche ai fini della formulazione scala-invariante, di cui si tratterà in seguito:

$$h_T = at^n$$

dove, in generale,  $a$  ed  $n$  dipendono dal tempo di ritorno  $T$ .

Ai fini della determinazione delle CPP, sono state esplorate due alternative riguardo all'adattamento di una distribuzione di probabilità ai dati di precipitazione intensa:

- adattamento di diverse distribuzioni di probabilità per ciascuna durata e stazione di misura;
- adattamento di un'unica distribuzione ai dati aggregati di una singola stazione relativi a diverse durate, opportunamente riscaldati (modello scala invariante).

L'adattamento di una distribuzione di probabilità ad un campione relativo ad una sola durata ed una stazione è l'approccio più comunemente adottato nell'analisi delle piogge intense.

Per contro, la formulazione scala-invariante presenta il vantaggio di consentire l'impiego di distribuzioni di probabilità con più di due parametri, potenzialmente in grado di adattarsi meglio ai dati, in quanto il campione aggregato è più numeroso. E' opportuno inoltre ricordare che il modello scala-invariante è di particolare rilievo ai fini della presente indagine, in quanto è quello adottato nel Piano di Assetto Idrogeologico della Regione Sicilia (PAI, 2004).

Sono state inoltre considerate due distribuzioni di probabilità:

- La distribuzione di Gumbel (a due parametri);
- La distribuzione Generalized Extreme Value (GEV a tre parametri).

La distribuzione di probabilità di Gumbel, di parametri  $\alpha$  e  $\beta$ , ha la seguente funzione di ripartizione:

$$P(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (3.1)$$

I due parametri possono essere stimati tramite il metodo dei momenti, il quale dà luogo alle seguenti espressioni:

$$\alpha = 1.283/\sigma_x \quad (3.2)$$

$$\beta = \mu_x - 0.5772/\alpha \quad (3.3)$$

essendo  $\sigma_x$  e  $\mu_x$  rispettivamente la deviazione standard e la media campionarie.

La distribuzione di probabilità GEV con parametri  $k$ ,  $\alpha$  e  $\xi$ , ha la seguente funzione di ripartizione:

$$F(x) = \exp(-\exp(-y)) \quad (3.4)$$

con

$$y = \begin{cases} -k^{-1} \log[1 - k(x - \xi) / \alpha], & k \neq 0 \\ (x - \xi) / \alpha, & k = 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Si noti come per  $k=0$  la GEV si riduca ad una distribuzione di Gumbel (detta anche Extreme Value del I tipo).

La stima dei parametri per tale distribuzione può essere effettuata con il *metodo degli L-moments* che presentano il vantaggio di ottenere stimatori più robusti rispetto ad altri metodi (*Cunnane, 1988; Greenwood et al., 1979*).

Il generico *L-moment* di ordine  $k$  adimensionale viene calcolato riscaldando opportunamente i momenti dimensionali  $\lambda_k$ , ottenendo così il cosiddetto *L-coefficiente di variazione* ( $\tau_2$ ), *L-coefficiente di asimmetria* ( $\tau_3$ ), e *L-coefficiente di Kurtosi* ( $\tau_4$ ):

$$\tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (3.6)$$

$$\tau_3 = \lambda_3 / \lambda_2 \quad (3.7)$$

$$\tau_4 = \lambda_4 / \lambda_2 \quad (3.8)$$

Tale metodo dà luogo ai seguenti stimatori (*Hosking e Wallis, 1997*):

$$k = 7.8590C + 2.9554C^2 \quad (3.9)$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 k}{(1 - 2^{-k}) \Gamma(1 + k)} \quad (3.10)$$

$$\xi = \lambda_1 - \alpha \frac{[1 - \Gamma(1 + k)]}{k} \quad (3.11)$$

essendo

$$C = \frac{2}{3 + \tau_3} \frac{\log 2}{\log 3} \quad (3.12)$$

e

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} \exp(-t) dt \quad (3.13)$$

In particolare, lo stimatore di  $k$  ha un'accuratezza di  $9 \cdot 10^{-4}$  se  $-0.5 \leq \tau_3 \leq 0.5$ .

I parametri delle CPP possono essere calcolati attraverso la seguente relazione:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N (\log(h_i) - \mu_{Lh})(\log(t_i) - \mu_{Lt})}{\sum_{i=1}^N (\log(t_i) - \mu_{Lt})^2} \quad (3.14)$$

$$a = \exp(\mu_{Lh} - n\mu_{Lt}) \quad (3.15)$$

essendo  $(t_i, h_i)$   $i=1, \dots, N$  le coppie durata-altezza di precipitazione da interpolare (relativi ad un fissato tempo di ritorno  $T$ ) e  $\mu_{Lh}$  e  $\mu_{Lt}$  le rispettive medie dei logaritmi.

Il modello scala-invariante è basato sull'ipotesi di invarianza di scala per le precipitazioni estreme, all'interno di un certo intervallo di durate  $[t_0, t_1]$ . Secondo tale ipotesi, le altezze di pioggia di due durate diverse hanno la medesima distribuzione a meno di un fattore di scala, pari al rapporto tra le durate elevato ad un esponente  $n$ . Studi condotti da *Supino (1964)*, *Rosso e Burlando (1990)* e *Burlando e Rosso (1995)* hanno dimostrato, sulla base della verifica condotta su una lunga serie di eventi storici, che gli eventi meteorici intensi sono caratterizzati da questa proprietà. In particolare tale proprietà risulta ancora verificata qualora si prendano in esame i casi critici, vale a dire i massimi relativi delle osservazioni sperimentali di pioggia ottenuti da eventi anche diversi.

Dal punto di vista operativo, l'applicazione del modello scala-invariante ai dati di una singola stazione si articola nelle seguenti fasi:

- aggregazione dei dati per le varie durate all'interno dell'intervallo  $[t_0, t_1]$ . Tale fase consiste nel mettere insieme in un unico campione le serie di una singola durata normalizzate rispetto alla propria media;

- adattamento di una distribuzione di probabilità al campione unico;
- calcolo delle CPP. La generica altezza di precipitazione di fissato tempo di ritorno  $T$  e durata  $t$  è data da:

$$h_T(t) = w_T \mu(H(t)) = h_T(1)t^n \quad (3.16)$$

in cui:  $T = 1/(1 - P(w))$ .

essendo  $P$  la probabilità di superamento secondo la distribuzione di probabilità adattata ed

$$n = \frac{\sum_{i=1}^N \log(h_i / h_T(1)) \log(t_i)}{\sum_{i=1}^N \log^2 t_i} \quad (3.17)$$

Si noti che nel caso di modello scala-invariante l'esponente di scala  $n$  è indipendente dal tempo di ritorno (Burlando e Rosso, 1995) ed il coefficiente  $a$  delle CPP coincide con la precipitazione  $h_T(1)$  di un'ora e tempo di ritorno  $T$ .

La bontà di adattamento ai dati dei vari modelli è stata verificata attraverso grafici e test statistici. Questi ultimi hanno altresì permesso di confrontare i vari modelli al fine di individuare quello più appropriato.

In particolare, sono stati applicati i seguenti test statistici:

- il test di Pearson o del Chi-quadrato ( $\chi^2$ );
- il test di Kolmogorov-Smirnov (KS).

In particolare tali test consentono di verificare l'ipotesi nulla  $H_0$  di campione proveniente dalla distribuzione ipotizzata, con livello di significatività  $\alpha$ . Il livello di significatività rappresenta la probabilità di rigettare l'ipotesi nulla quando essa è però di fatto vera. I vari modelli possono altresì essere confrontati, in modo oggettivo, sulla base del  $p$ -value. Il  $p$ -value rappresenta la probabilità di superamento del valore osservato della statistica test, condizionata alla veridicità dell'ipotesi

$H_0$ . Ne segue che maggiore è il  $p$ -value, maggiore è la bontà di adattamento.

Il test di Pearson è basato sulla suddivisione del campione disponibile in  $K$  classi equiprobabili. Il test risulta sensibile al numero di classi  $K$ . Nel presente studio si è scelto di adottare il numero di classi fornito dalla formula (v. *Kottegoda e Rosso, 1997*):

$$k = 2[2(n-1)^2 / z_{\alpha}^2]^{0.2} \quad (3.18)$$

essendo  $z_{\alpha}$  è il valore che una variabile normale standard supera con probabilità  $\alpha$  (in particolare per  $\alpha=0.05$  è  $z_{0.05} = 1.645$ ).

La statistica test  $\chi_{calc}^2$  è data dalla seguente espressione:

$$\chi_{calc}^2 = \sum_{k=1}^K (N_k - N_t)^2 / N_t \quad (3.19)$$

dove  $N_k$  rappresenta il numero di dati presenti nella  $k$ -esima classe e  $N_t = n/K$  rappresenta il numero di dati teorici presenti nella  $k$ -esima classe. In funzione del livello di significatività  $\alpha$  scelto (ad esempio pari al 5%) e del numero di gradi di libertà  $v$  della distribuzione in esame si calcola il valore del  $\chi_t^2$  teorico. Il numero di gradi di libertà è dato da  $K - n_p - 1$  essendo  $n_p$  il numero di parametri della distribuzione ipotizzata.

In definitiva, se si verifica che  $\chi_{calc}^2 \leq \chi_t^2$  il test fornisce esito positivo ovvero è possibile accettare l'ipotesi  $H_0$ . Se invece si verifica  $\chi_{calc}^2 > \chi_t^2$  si deve rigettare l'ipotesi  $H_0$ .

Il test di Kolmogorov-Smirnov è invece basato sulla massima differenza tra le cumulate empirica e teorica.

Sia quindi  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(N)}$  il campione di  $N$  dati ordinato in modo crescente. La cumulata empirica  $F_n(x)$  è definita dalla seguente funzione a gradini:

$$F_n = \begin{cases} = 0 & \text{per } x < x_{(1)} \\ = \frac{k}{N} & \text{per } x_{(k)} \leq x < x_{(k+1)} \\ = 1 & \text{per } x \geq x_{(N)} \end{cases} \quad (3.20)$$

Se  $F_0(x)$  è la cumulata della distribuzione che si vuole verificare, la statistica test è data dalla seguente espressione:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (3.21)$$

Il valore di tale statistica calcolata sul campione  $D_{n,calc}$ , viene poi confrontato con il valore "teorico"  $D_{n,t}$  corrispondente al livello di significatività scelto.

In definitiva se si verifica che  $D_{n,calc} \leq D_{n,t}$  il test fornisce esito positivo ovvero è possibile accettare l'ipotesi  $H_0$ . Se invece si verifica  $D_{n,calc} > D_{n,t}$  si rigetta l'ipotesi  $H_0$ .

Nel presente studio sono state impiegate due CPP distinte per le durate non inferiori all'ora e per le durate inferiori all'ora. Il parametro  $a$  si mantiene tuttavia invariato per entrambe le CPP.

Infine, delle CPP relative alle stazioni (informazione puntuale) è stata effettuata una interpolazione spaziale (spazializzazione), attraverso il metodo Inverse Distance Weighted (IDW). Tale spazializzazione porta alla definizione dei pesi da attribuire a ciascuna stazione al fine di calcolare la precipitazione di fissata durata e tempo di ritorno in qualsiasi punto dell'area di interesse.

### 3.1.2 Calcolo della portata massima

Le portate al colmo per vari tempi di ritorno sono state stimate attraverso la formula di Turazza:

$$Q_T = \frac{ChA}{3.6t_c} = \frac{Cat_c^{n-1}A}{3.6} \quad (3.22)$$

essendo  $C$  il coefficiente di deflusso,  $a$  ed  $n$  i parametri della Curva di Probabilità Pluviometrica corrispondenti al tempo di ritorno  $T$ ,  $A$  [km<sup>2</sup>] l'area del bacino sotteso dalla sezione di chiusura d'interesse e  $t_c$  [ore] il tempo di corrivazione dello stesso.

Il tempo di corrivazione è stato valutato a partire dalle caratteristiche morfometriche dei bacini, utilizzando le seguenti formule:

Kirpich: 
$$t_c = 0.066 \cdot \frac{L^{0.77}}{i^{0.385}} \quad (3.23)$$

Pezzoli: 
$$t_c = 0.055 \frac{L}{\sqrt{i}} \quad (3.24)$$

$$\text{Velocità fittizia:} \quad t_c = \frac{L}{v_f} \quad (3.25)$$

$$\text{Pasini:} \quad t_c = \frac{0.108}{\sqrt{i}} (AL)^{1/3} \quad (3.26)$$

$$\text{Giandotti:} \quad t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{\bar{H} - H_0}} \quad (3.27)$$

$$\text{Ventura:} \quad t_c = 0.1272 \sqrt{\frac{A}{i}} \quad (3.28)$$

$$\text{Di Stefano e Ferro:} \quad t_c = 0.3716A^{0.6} \quad (3.29)$$

essendo  $L$  [km] la lunghezza dell'asta,  $i$  la pendenza dell'asta,  $v_f$  la velocità fittizia (stimata da tabelle di letteratura),  $\bar{H}$  l'altitudine media del bacino [m s.m.m] e  $H_0$  l'altitudine della sezione di chiusura [m s.m.m].



## 3.2 Elaborazioni idrologiche

### 3.2.1 Curve di possibilità pluviometrica

L'analisi idrologica è stata condotta sulla base dei dati pluviometrici dei massimi annuali di durata 1, 3, 6, 12 e 24 ore osservati alle seguenti stazioni pluviometriche gestite dall'Osservatorio delle Acque del Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti, afferente all'Assessorato dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità della Regione Siciliana (già Servizio Idrografico):

- [P1] Camaro (periodo di osservazione: 1925 – 2003, 57 anni);
- [P2] Calvaruso (periodo di osservazione: 1972 – 2002, 16 anni);
- [P3] Monforte (periodo di osservazione: 1971 – 2002, 31 anni).

Nel lavoro svolto sono stati confrontati i seguenti modelli probabilistici:

- distribuzione di Gumbel singola stazione, singola durata;
- distribuzione GEV singola stazione, singola durata;
- distribuzione Gumbel scala-invariante:
  - ipotesi di invarianza di scala nell'intervallo di durate da 1 a 6 ore;
- distribuzione GEV scala invariante:
  - ipotesi di invarianza di scala nell'intervallo di durate da 1 a 6 ore.

La bontà di adattamento dei modelli ipotizzati è stata verificata in primo luogo attraverso i diagrammi probabilistici riportati in Figura 3.1 per la stazione di Calvaruso, in Figura 3.2 per la stazione di Monforte, in Figura 3.3 per la stazione di Camaro. Tali diagrammi riportano in

ascisse la precipitazione e in ordinate il tempo di ritorno corrispondente, e sono relativi alla durata di un'ora. Tale durata assume particolare importanza, in quanto corrisponde al coefficiente  $a$  delle CPP per le durate inferiori all'ora, le quali sono quelle di interesse per i diversi bacini in esame, essendo questi in genere molto piccoli e caratterizzati da tempi di corrivazione inferiori all'ora.

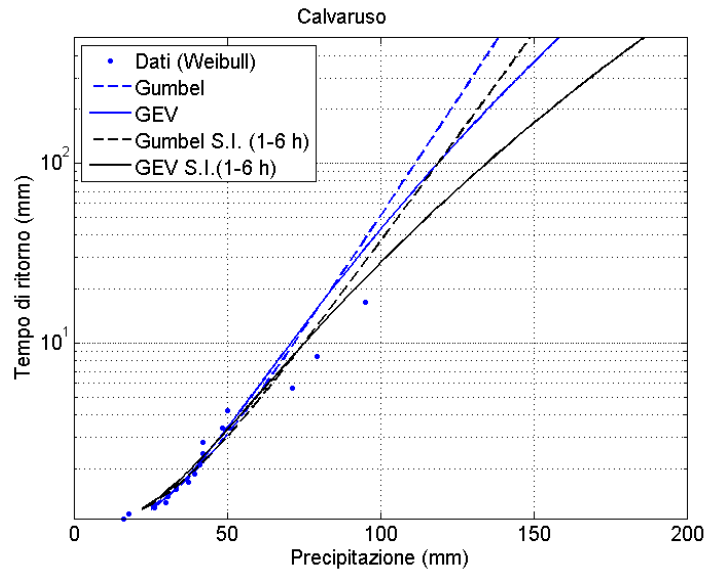


Figura 3.1 Diagrammi probabilistici per la stazione di Calvaruso per precipitazioni di durata di 1 ora

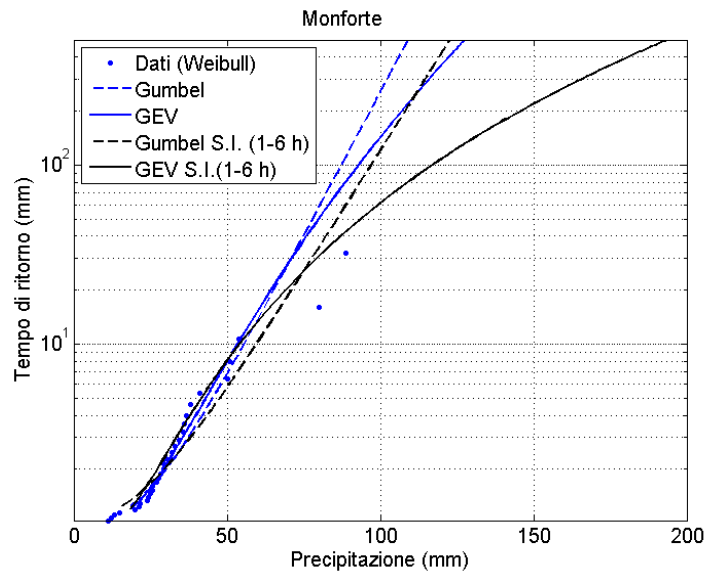


Figura 3.2 Diagrammi probabilistici per la stazione di Monforte per precipitazioni di durata di 1 ora

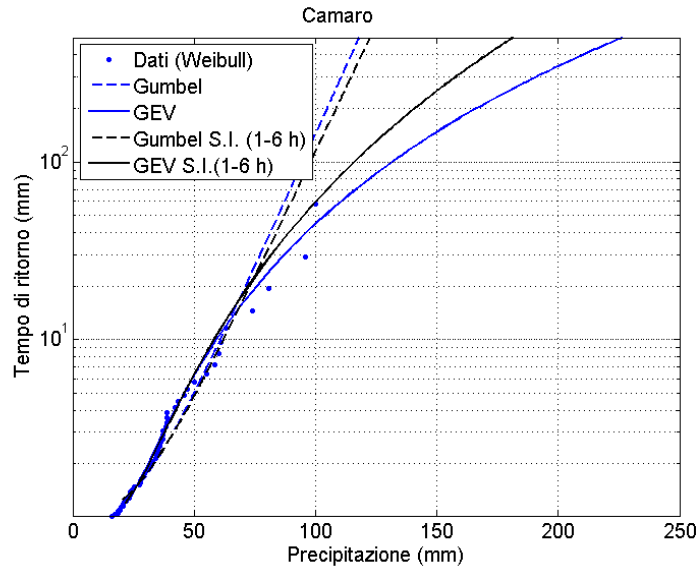


Figura 3.3 Diagrammi probabilistici per la stazione di Camaro per precipitazioni di durata di 1 ora

Per avere un confronto qualitativo delle differenze tra i vari modelli adattati, si può fare riferimento alla Tabella 3.I, la quale riporta le corrispondenti altezze di precipitazione di durata un'ora e tempo di ritorno 100 anni.

La bontà di adattamento dei diversi modelli probabilistici è stata verificata e valutata attraverso i test statistici di Kolmogorov-Smirnov e del Chi-quadro con un livello di significatività  $\alpha = 5\%$ . Nella Tabella 3.I sono riportati i risultati in termini di rigetto o non rigetto dell'ipotesi  $H_0$  di campione proveniente dalla distribuzione di probabilità ipotizzata.

Tabella 3.I Altezze di precipitazione di durata un'ora e tempo di ritorno 100 anni e i valori delle variabili dei relativi test statistici

Stazione	Modello	$h_{TR=100}(t=1)$ [mm]	$\chi^2$	KS
Camaro	Gumbel	94.66	0.06	0.2
	GEV	113.91	0.68	1.0
	GEV SI (1, 3, 6 h)	116.11	0.35	0.892
	Gumbel SI (1, 3, 6 h)	97.86	0	0.023
Calvaruso	Gumbel	111.41	0.572	0.801
	GEV	126.84	0.535	0.965
	GEV SI (1, 3, 6 h)	134.58	0.21	0.404
	Gumbel SI (1, 3, 6 h)	118.81	0.081	0.409
Monforte	Gumbel	87.24	0.471	0.651
	GEV	99.58	0.377	0.751
	GEV SI (1, 3, 6 h)	117.06	0.68	0.894
	Gumbel SI (1, 3, 6 h)	97.03	0.001	0.094

In sintesi, si può ammettere che il modello GEV scala-invariante riesce a cogliere il comportamento probabilistico delle serie osservate meglio della distribuzione di Gumbel e degli altri modelli probabilistici verificati. Nella Tabella 3.II si riportano i pesi delle singole stazioni ricavate mediante una interpolazione spaziale e i bacini a cui sono stati applicati tali pesi.

Tabella 3.II Pesi delle singola stazioni e dei bacini interessati

Stazione	Peso	Bacini
Calvaruso	0.7	Calvaruso Saponara
Camaro	0.3	
Calvaruso	0.44	Pietra Cocuzzaro Senia Caracciolo Niceto
Monforte SG	0.56	

### 3.2.2 Caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici

Le analisi idrologiche sono state effettuate con riferimento alla sezione di foce dei singoli torrenti.

Al fine di determinare il tempo di corrivazione  $t_c$  si è proceduto ad una valutazione speditiva delle caratteristiche morfometriche, riportate in Tabella 3.III. In particolare, nella tabella si riportano il nome del bacino, la superficie, espressa in  $\text{km}^2$ , il perimetro, espresso in km, altitudine media del bacino, espressa in m.s.m.m, la quota massima, espressa in m.s.m.m, la lunghezza dell'asta, espressa in km, la quota massima dell'asta, espressa in m.s.m.m, la pendenza media dell'asta, espressa in percentuale.

Tabella 3.III Caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici

Bacino	Superficie	Perimetro	Altitudine media bacino	Quota massima bacino	Lunghezza asta	Quota massima asta	Pendenza media
	[ $\text{km}^2$ ]	[km]	[m.s.m.m]	[m.s.m.m]	[km]	[m.s.m.m]	[%]
	S	P	Hm	Hmaxb	L	Hmaxast	i
Calvaruso	13.45	18.32	357.32	669.24	7.73	714.64	9.25
Saponara	31.78	28.57	484.98	1072.68	12.60	969.96	7.70
Pietra	7.59	17.02	252.46	541.44	8.32	504.92	6.07
Cocuzzaro	6.13	14.15	196.10	470.32	5.93	392.2	6.61
Senia	3.26	10.83	161.69	343.68	4.86	323.38	6.66
Caracciolo	2.59	9.91	137.56	300.64	4.71	275.11	5.84
Niceto	81.28	47.57	400.96	1057	18.80	801.92	4.27

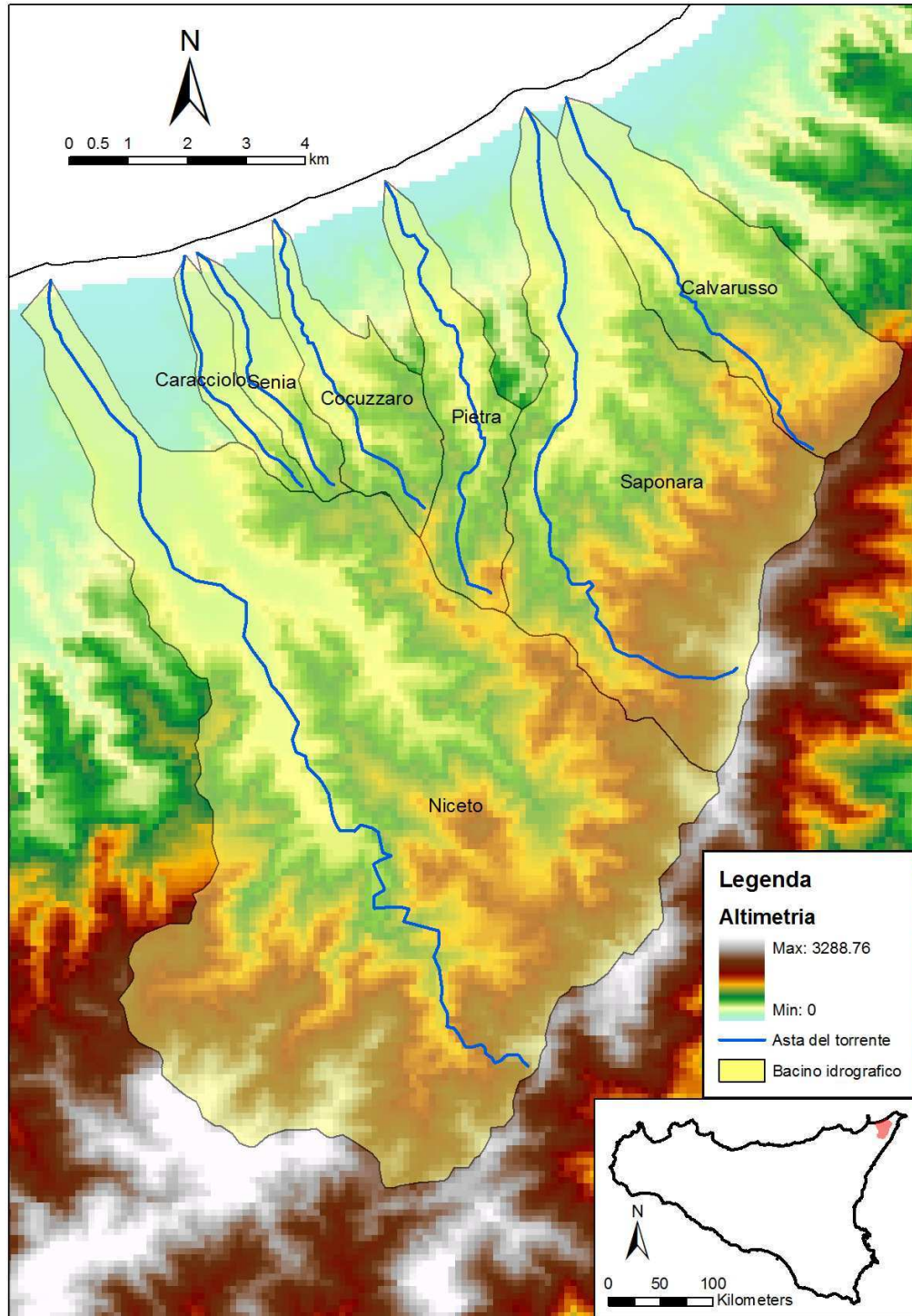


Figura 3.4 Localizzazione dei torrenti analizzati e dei relativi bacini idrografici.

### 3.2.3 Stima delle portate alla foce

I tempi di corrivazione sono riportati in Tabella 3.IV. Il valore adottato per le analisi, riportato nell'ultima colonna della medesima tabella, corrisponde alla media dei valori di tutte le formule, esclusa quella di Giandotti. Tale formula infatti sembra fornire valori troppo dissimili da quelli delle altre formule.

Tabella 3.IV Tempi di corrivazione per i singoli bacini

<b>N.I.</b>	<b>Tempo di corrivazione <math>t_c</math> [ore]</b>							
	<b>Kirpich</b>	<b>Pezzoli</b>	<b>Vel.fit.</b>	<b>Pasini</b>	<b>Giandotti</b>	<b>Ventura</b>	<b>Ferro</b>	<b>media</b>
Calvaruso	0.97	1.80	1.50	1.67	1.93	1.86	1.68	1.50
Saponara	1.25	2.50	1.50	2.33	2.87	2.35	2.58	2.53
Pietra	0.99	1.86	1.50	1.54	1.74	1.85	1.42	1.07
Cocuzzaro	0.74	1.27	1.50	1.10	1.39	1.68	1.22	0.94
Senia	0.63	1.03	1.50	0.90	1.05	1.43	0.89	0.65
Caracciolo	0.68	1.14	1.20	1.13	1.04	1.45	0.84	0.54
Niceto	2.13	5.01	1.20	4.35	6.02	4.01	5.55	4.45

Le portate, ricavate attraverso la formula Turazza per vari tempi di ritorno, sono riportate in Tabella 3.V.

Tabella 3.V Portate alla foce per i singoli bacini

<b>N.I.</b>	<b>Portata alla foce <math>Q</math> [<math>m^3/s</math>]</b>		
	<b>TR=2</b>	<b>TR=20</b>	<b>TR=50</b>
Calvaruso	82	195	248
Saponara	157	374	474
Pietra	44	107	140
Cocuzzaro	41	101	132
Senia	26	63	82
Caracciolo	19	46	60
Niceto	235	577	751

## 4 Verifica idraulica delle interferenze tra il ripascimento protetto e i corsi d'acqua

Sulla base delle portate determinate nel capitolo precedente, è stato valutato il campo di moto che si instaura nel tratto di litorale oggetto dell'intervento di ripascimento protetto a seguito del conferimento delle portate dai torrenti che sfociano sullo stesso litorale. La conoscenza del campo di moto unitamente alla distribuzione dei sedimenti nell'area di interesse consente anche la determinazione del campo di trasporto solido dei sedimenti.

Le analisi sono state condotte utilizzando il modello bidimensionale CMS-Flow prodotto dal U.S. Corps of Engineering.

Di seguito si riporta una sintetica descrizione del citato modello, la definizione delle condizioni al contorno e i risultati ottenuti.

### 4.1 Descrizione del modello

Il modello CMS- FLOW permette la risoluzione dell'equazione di continuità integrata sulla profondità e dell'equazione di bilancio dell'azione ondosa applicando il metodo dei volumi finiti in campo bidimensionale.

Le equazioni di continuità e di bilancio che il modello numerico risolve sono espresse come segue:

$$\frac{\partial(h + \eta)}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial u q_x}{\partial x} + \frac{\partial v q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h + \eta)^2}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_x}{\partial y} + f q_y - \tau_{bx} + \tau_{wx} + \tau_{sx}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial u q_y}{\partial x} + \frac{\partial v q_y}{\partial y} + \frac{1}{2} g \frac{\partial(h + \eta)^2}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial q_y}{\partial y} + f q_x - \tau_{by} + \tau_{wy} + \tau_{sy}$$

dove:

$h$  è la profondità relativa rispetto ad una data verticale;



$\eta$  è la deviazione della superficie libera rispetto il livello idrico in quiete;

$t$  è il tempo;

$q_x$  è il flusso per unità di larghezza lungo l'asse x;

$q_y$  è il flusso per unità di larghezza lungo l'asse y;

$u$  è la componente della velocità lungo l'asse x;

$v$  è la componente della velocità lungo l'asse y ad una profondità media;

$g$  è l'accelerazione di gravità;

$D_x$  è il coefficiente di diffusione lungo l'asse x;

$D_y$  è il coefficiente di diffusione lungo l'asse y;

$f$  è il parametro di Coriolis;

$\tau_{bx}, \tau_{wx}, \tau_{sx}$  e  $\tau_{by}, \tau_{wy}, \tau_{sy}$  sono la tensione al fondo, la tensione in superficie e la tensione dell'onda rispetto l'asse x e y rispettivamente.

Le componenti della velocità sono relative alla portata per unità di larghezza e formulate nel modo seguente:

$$u = \frac{q_x}{h + \eta}$$

$$v = \frac{q_y}{h + \eta}$$

In assenza di onde le componenti della tensione al fondo possono essere espresse come:

$$\tau_{bx} = C_b u |U|$$

$$\tau_{by} = C_b v |U|$$

dove  $U$  è la velocità totale della corrente ( $|U| = \sqrt{u^2 + v^2}$ ) e  $C_b$  è un coefficiente empirico della tensione al fondo ( $C_b = g/c^2$  con  $c$  coefficiente di Chezy).

In presenza di onde, la tensione al fondo contiene i contributi della corrente quasi-stazionaria e del moto orbitale al fondo delle onde. Allo

scopo di valutare la tensione media al fondo, il modello applica un'approssimazione circolare dell'onda che ne consente una stima analitica in riferimento ad un tempo medio.

A tal fine, vengono utilizzate le seguenti approssimazioni (Nishimura, 1988):

$$\tau_{bx} = C_b \left\{ \left( U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) u + \left( \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) v \right\}$$

$$\tau_{by} = C_b \left\{ \left( \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos \alpha \sin \alpha \right) u + \left( U_{wc} + \frac{\omega_b^2}{U_{wc}} \cos^2 \alpha \right) v \right\}$$

dove  $\alpha$  è l'inclinazione dell'onda relativa all'asse x.

Le tensioni superficiali sono invece espresse mediante le relazioni:

$$\tau_{wx} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \sin \theta$$

$$\tau_{wy} = C_d \frac{\rho_a}{\rho_w} W^2 \cos \theta$$

dove  $C_d$  è il coefficiente di Drag,  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $\rho_w$  è la densità dell'acqua,  $W$  è la velocità del vento e  $\theta$  è la sua direzione (convenzionalmente la direzione del vento è  $0^\circ$  partendo da est con angoli crescenti in senso antiorario).

Le tensioni dell'onda vengono calcolate in funzione dei gradienti spaziali della distribuzione di tensione attraverso le relazioni:

$$\tau_{sx} = -\frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{sy} = -\frac{1}{\rho_w} \left( \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

dove  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  sono le componenti del radiation stress.

Il parametro di Coriolis è dato dalla seguente espressione:

$$f = 2\Omega \sin \varphi$$

dove  $\Omega$  è la velocità angolare di rotazione della Terra e  $\varphi$  è la latitudine.

Il coefficiente di viscosità turbolenta ( $\nu$ ), se le onde non contribuiscono all'agitazione, può essere calcolato in funzione della

profondità totale dell'acqua, della velocità della corrente e della scabrezza del fondo attraverso la relazione (Falconer, 1980):

$$D_o = \frac{1}{2} \left[ 1.156g(h + \eta) \frac{|U|}{C^2} \right]$$

Nella surf zone, le onde contribuiscono significativamente alle turbolenze laterali e il coefficiente di viscosità dovuto ai vortici risulta essere in funzione delle caratteristiche delle onde.

In questo caso, nel modello CMS-FLOW la surf zone è rappresentata dalla condizione:

$$D_w = \varepsilon_L$$

dove  $\varepsilon_L$  descrive la turbolenza laterale in profondità (Smith, J.M., Larson M. e Kraus, N.C., 1993) ed è espressa dalla relazione (Kraus, N.C. e Larson, M., 1991):

$$\varepsilon_L = \Lambda u_m H$$

dove  $\Lambda$  è un coefficiente empirico che rappresenta l'intensità della turbolenza laterale e  $u_m$  è l'ampiezza della componente orizzontale della velocità orbitale dell'onda al fondo espressa dalla formula:

$$u_m = \frac{gHT}{\left[ 2\lambda \cosh \left( \frac{2\pi(h + \eta)}{\lambda} \right) \right]}$$

dove  $T$  indica il periodo dell'onda.

Inoltre, il CMS- FLOW utilizza un coefficiente di turbolenza ponderato allo scopo di rappresentare la zona di transizione tra le turbolenze della surf zone e quelle oceaniche; il coefficiente viene calcolato con la relazione:

$$D = (1 - \theta_m) D_o + \theta_m D_w$$

dove il parametro  $\theta_m$  è:

$$\theta_m = \left( \frac{H}{h + \eta} \right)^3$$

in cui la dipendenza cubica della profondità introduce il volume del fluido.

Gli apporti del vento vengono quantificati facendo riferimento ad un profilo parabolico espresso dalla relazione proposta da Charnock (1995). In genere è d'uso fare riferimento alla velocità del vento all'altezza di 10 m s.l.m.m.

Il modello CMS- FLOW è anche in grado di determinare l'entità dei sedimenti trasportati e i conseguenti cambiamenti del fondo.

In particolare il trasporto di materiale può essere quantificato dal modello utilizzando tre differenti formule applicabili sia in presenza che in assenza di onde:

- la formula di Watanabe (1987);
- la formula Lund-CIRP (Camenen e Larson 2007) che combina il trasporto al fondo con quello in sospensione;
- l'equazione di Avvezione-Diffusione (AD).

Nel presente studio è stata scelta la formulazione Lund-CIRP poiché permette di ottenere una graduale transizione tra l'area del frangimento delle onde e la zona in cui questo non è ancora avvenuto e tra le zone interessate dalla sola corrente e quelle caratterizzate da corrente e onde.

La formulazione Lund-CIRP calcola il trasporto totale nella direzione della corrente e, allo scopo di ottenere il trasporto bidimensionale, effettua una suddivisione del vettore del trasporto dei sedimenti nelle componenti x e y.

In CMS-FLOW, la formula Lund-CIRP può essere implementata determinando il trasporto totale come combinazione del trasporto al fondo e di quello in sospensione.

La scabrezza al fondo  $k_s$  viene stimata sommando tre componenti: la scabrezza relativa dei grani ( $k_{sd} = 2.5d_{50}$ ), la scabrezza di forma ( $k_{sf} = 7.5H_r^2/L_r$ ) e la scabrezza relativa dei sedimenti ( $k_{ss} = 5d_{50}\theta_i$  con  $\theta_i$  parametro di Shields); la scabrezza totale è espressa quindi dalla relazione:

$$k_s = k_{sd} + k_{sf} + k_{ss}$$

Il trasporto solido al fondo  $q_b$  può essere stimato utilizzando la formula proposta da Camenen e Larson (2005) riferita sia alla corrente che alle onde:

$$\frac{q_{bw}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_w \sqrt{\theta_{net}} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

$$\frac{q_{bn}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_{cn}} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

dove i pedici  $w$  ed  $n$  indicano rispettivamente la direzione dell'onda e la direzione normale all'onda,  $a$  e  $b$  sono dei coefficienti,  $\theta_{cw,m}$  e  $\theta_{cw}$  sono il valore medio e il valore massimo del parametro di Shields trascurando la scabrezza del fondo; nel caso in cui il trasporto abbia direzione normale alla direzione dell'onda il coefficiente  $a_n$  viene assunto pari a 12.

Il coefficiente  $b$  descrive l'inizio del movimento del materiale ed è posto pari a 4.5. I termini  $\theta_{net}$  e  $\theta_{cn}$  rappresentano il contributo della tensione di taglio alla velocità di trasporto durante un ciclo dell'onda in direzione parallela e normale alle onde stesse.

I valori dei coefficienti di trasporto vengono ottenuti mediante la calibrazione di un ampio set di dati ottenuti in laboratorio e gli esperimenti di campo possono essere riferiti alla corrente media, ad onde oscillatorie (sinusoidali e asimmetriche) e all'unione tra corrente e onde. Al fine di determinare il coefficiente di trasporto nella direzione dell'onda, è possibile utilizzare la seguente relazione (Camenen, B. e Larson, M., 2005):

$$a_w = 6 + 6X_f$$

$$X_f = \frac{\theta_c}{\theta_c + \theta_w}$$

In molte applicazioni, si considerano le onde sinusoidali senza asimmetrie; ciò comporta che il contributo delle onde stesse alla

velocità di trasporto risulti trascurabile e che solo la corrente provochi lo spostamento di materiale. Per questo motivo si può fare riferimento alla seguente formula:

$$\frac{q_{bc}}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = a_n \sqrt{\theta_c} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

dove la portata  $q_{bc}$  è ottenuta nella direzione della corrente e il trasporto nella direzione normale alla corrente è considerato nullo.

Il trasporto in sospensione  $q_s$  viene calcolato considerando un profilo esponenziale della concentrazione e velocità costante lungo l'intera colonna d'acqua (Camenen, B. e Larson, M., 2006):

$$q_s = U_c c_R \frac{\varepsilon}{w_s} \left(1 - \exp\left(-\frac{w_f d}{\varepsilon}\right)\right)$$

dove  $w_f$  è la velocità di caduta del sedimento,  $c_R$  è la concentrazione di riferimento e  $\varepsilon$  è la diffusività del sedimento. La portata  $q_s$  è valutata nella direzione della corrente in quanto le onde non contribuiscono al trasporto. I termini  $c_R$  e  $\varepsilon$  vengono calcolati in funzione della tensione totale e considerando la scabrezza al fondo. La concentrazione di riferimento è data dalla seguente relazione:

$$c_R = A_{cR} \theta_{cw,m} \exp\left(-b \frac{\theta_{cr}}{\theta_{cw}}\right)$$

dove il coefficiente  $A_{cR}$  è pari a:

$$A_{cR} = 3.5 \cdot 10^{-3} \exp(0.3d_s)$$

e la dimensione dei grani adimensionalizzata è  $d_s = ((s-1)g/v^2)^{1/3} d_{50}$ .

La diffusività del sedimento risulta essere in funzione della dissipazione di energia in accordo con la trattazione di Battjes (1975):

$$\varepsilon = \left( \frac{D_s}{\rho} \right)^{1/3} d$$

dove  $n_s$  è la dissipazione totale effettiva di energia data dalla somma delle dissipazioni dovute alla corrente, alle onde e al frangimento delle onde.

Entrambe le tipologie di trasporto di materiale, al fondo e in sospensione, assumono valore nullo all'inizio della simulazione e aumentano ad ogni incremento del passo temporale.

#### **4.2 Descrizione del dominio di calcolo**

Per il modello si è utilizzato un dominio a maglia rettangolare regolare con risoluzione di 4 m in direzione ortogonale alla linea di riva e 5 m nella direzione parallela alla stessa.

E' stata definita una griglia di calcolo di dimensioni pari a 10500m×952m ed è orientata in modo che l'asse delle ascisse parallelo alla linea di riva formi un angolo di 19° rispetto alla direzione corrispondente all' Est Geografico (vedere Figura 4.1).

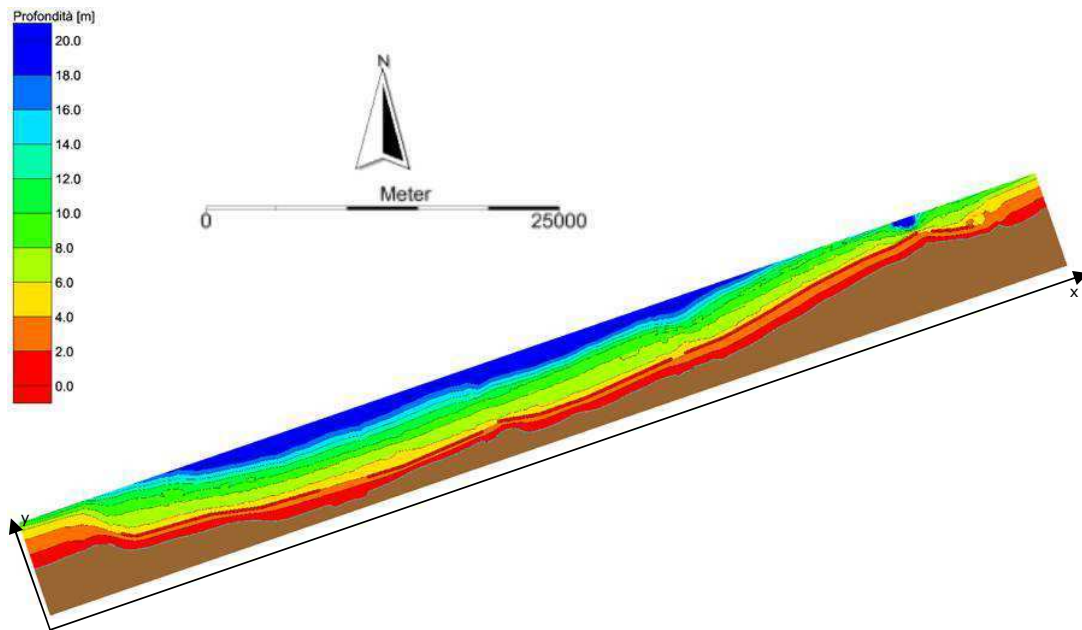


Figura 4.1 Griglia di calcolo avente l'asse lungo la direzione parallela alla linea di costa che forma un angolo di  $19^\circ$  con la direzione Est

### 4.3 Condizioni al contorno

Al fine di definire il campo idrodinamico nel dominio in studio è necessario la definizione di opportune condizioni al contorno. In particolare, per la simulazione del deflusso dei torrenti alla foce, si è imposto alle celle appartenenti alla griglia di calcolo poste in corrispondenza delle foci dei torrenti il valore della portata determinato sulla base dello studio idrologico.

La Figura 4.2 riporta una rappresentazione esemplificativa della griglia di calcolo e delle condizioni al contorno assegnate. In particolare la portata complessiva viene ripartita sulle celle poste in corrispondenza della foce del singolo torrente.



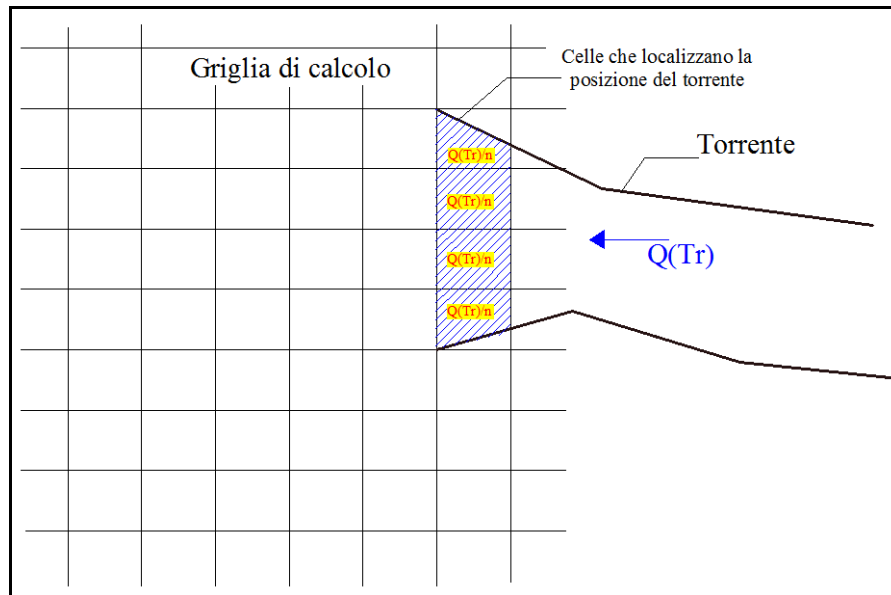


Figura 4.2 Riproduzione esemplificativa della griglia di calcolo CMS-FLOW: esempio delle condizioni al contorno imposte in corrispondenza dei torrenti.

Oltre alle condizioni al contorno imposte in corrispondenza dei torrenti è necessario imporre la condizione al contorno lato mare. In particolare, le simulazioni sono state condotte considerando che sul contorno lato mare il livello sia invariabile, imponendo un'altezza pari a 0 m s.l.m.m., consentendo in tal modo il deflusso dei volumi all'esterno del dominio. Nelle celle poste sul contorno lato terra e non interessate dal deflusso delle acque dei torrenti si è considerata imposta una componente della velocità nulla nella direzione ortogonale al contorno stesso.

Nella Tabella 4.I si riportano il numero di celle che individuano la sezione di foce dei singoli torrenti.

Inoltre al fine di valutare il trasporto solido è stata considerata la distribuzione di sedimenti riportata in Figura 4.3. Tale distribuzione deriva dalla mappa dei sedimenti rilevata oggi in situ modificata al fine di tenere in considerazione la presenza della barriera soffolta e del ripascimento artificiale.

Tabella 4.I

Numero di celle che individuano la sezione alla foce dei torrenti.

	N° celle
Niceto	16
Caracciolo	6
Senia	2
Cocuzzaro	5
Pietra	17
Saponara	8
Calvaruso	7

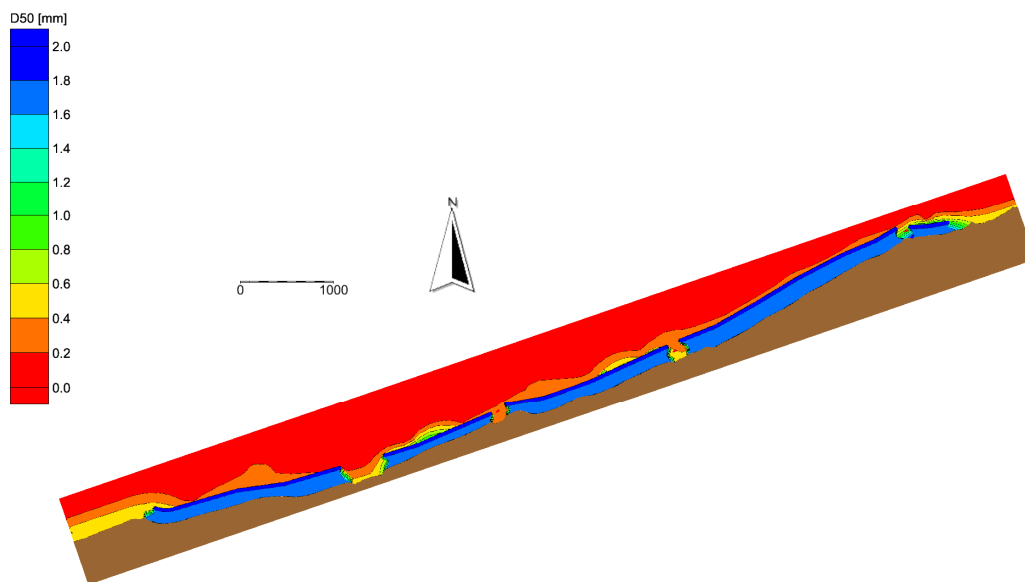


Figura 4.3 Distribuzioni dei sedimenti utilizzati per il calcolo della portata solida.

#### 4.4 *Analisi dei risultati*

Sulla base di definite condizioni al controno, utilizzando il modello CMS-Flow, sono state determinate le velocità delle correnti indotte dalle portate idriche immesse dai corsi d'acqua nel tratto litorale in esame per valori di tempo di ritorno pari a 2, 20 e 50 anni. Sulla base delle velocità così individuate si sono anche determinate le componenti del trasporto solido di sedimenti.

In particolare dalla Figura A.1 alla Figura A.21, riportate nell'allegato A, sono raffigurati i campi di velocità in prossimità delle foci dei torrenti per i diversi tempi di ritorno delle portate dei torrenti stessi, mentre dalla Figura B.1 alla Figura B.21, riportate nell'allegato B, sono raffigurate le corrispondenti distribuzioni del trasporto solido.

Per quanto attiene all'idrodinamica, si rileva che nessuno dei flussi idrici considerati provenienti dai torrenti ha interazioni dirette con le barriere soffolte e che gli stessi generano nelle aree adiacenti unicamente delle correnti di ricircolo, di entità del tutto modesta, indotte dal trascinamento esercitato delle particelle di acqua appartenenti al flusso su quelle circostanti.

Conseguentemente, il trasporto solido in corrispondenza delle barriere soffolte e indotto dai flussi provenienti dai torrenti risulta di entità trascurabile. In particolare, l'immediata riduzione delle velocità del flusso idrico determina la riduzione della capacità di trasporto solido determinando il deposito del materiale più grossolano e il trasporto verso il largo della frazione caratterizzata da granulometria più piccola, sempre lungo il flusso della corrente.

## 5 Sintesi dei risultati e conclusioni

Il presente studio ha avuto per oggetto la verifica delle interferenze tra i principali corsi d'acqua che sfociano nel tratto di costa compreso tra la foce del Torrente Niceto e la foce del Torrente Calvaruso e il ripascimento protetto in progetto.

I torrenti interessati dal presente studio sono stati (da Nord verso Sud): torrente Calvaruso, torrente Saponara, torrente Pietra, torrente Senia, torrente Caracciolo e torrente Niceto. In particolare, i torrenti Niceto e Calvaruso sono immediatamente esterni all'area di intervento mentre gli altri ricadono all'interno.

È stato preliminarmente effettuato uno studio idrologico dei principali torrenti che sfociano nel tratto di litorale in oggetto, che ha consentito, attraverso l'uso della distribuzione GEV a scala invariante, di determinare le curve di probabilità pluviometrica (CPP) per fissati tempi di ritorno necessarie per calcolare l'altezza di precipitazione di fissata durata e tempo di ritorno. Utilizzando tali dati unitamente a un modello afflussi-deflussi sono state determinate le portate alla foce dei sopra citati torrenti. Si precisa che, cautelativamente, tali portate non tengono conto di eventuali effetti di laminazione di opere idrauliche previste nell'ambito del presente progetto.

Le maggiori portate sono state determinate per i torrenti Niceto e Saponara, che per un tempo di ritorno pari a 50 anni presentano rispettivamente portate di circa 751 m<sup>3</sup>/s e 474 m<sup>3</sup>/s.

Tali portate sono state successivamente utilizzate come condizioni al contorno per la verifica di eventuali interferenze con le opere in progetto. In particolare l'analisi del campo di moto nell'area oggetto di intervento è stata condotta utilizzando il modello bidimensionale CMS-Flow prodotto da U.S Corps of Engineering.

Per quanto attiene all'idrodinamica, si è rilevato come nessuno dei flussi idrici considerati provenienti dai torrenti manifesti interazioni

dirette con le barriere soffolte. Detti flussi, infatti, generano, oltre al flusso diretto che non interessa le barriere soffolte, unicamente delle correnti di ricircolo, di entità del tutto modesta.

Conseguentemente, anche il trasporto solido in corrispondenza delle barriere soffolte indotto dai flussi provenienti dai torrenti risulta di entità trascurabile. In particolare, allo sbocco dei torrenti l'immediata riduzione delle velocità del flusso idrico determina la riduzione della capacità di trasporto solido determinando il deposito del materiale più grossolano e il trasporto verso il largo della sola frazione caratterizzata da granulometria più piccola, sempre lungo il flusso della corrente.

## Bibliografia

Battjes, J. (1975). Modeling of turbulence in the surf zone. *Proceedings Symposium on Modeling Techniques, ASCE* .

Burlando P., Rosso R. (1995), Le precipitazioni intense in "La sistemazione dei corsi d'acqua naturali". Atti del Corso di Aggiornamento – Programma di Istruzione Permanente – Politecnico di Milano, ed. Bios.

Camenen, B. e Larson, M. (2005). A bedload sediment transport formula for the nearshore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 63 , 249-260.

Camenen, B. e Larson, M. (2006). A suspended load sediment transport formula for nearshore. *Journal of Coastal Research (in review)* .

Camenen, B., and Larson, M. (2007). "A unified sediment transport formulation for coastal inlet applications", ERDC/CHL-TR-06-7, US Army Engineer Research and Development Center, Coastal and Hydraulics Laboratory, Vicksburg, MS.

Charnock, H. (1995). Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 81 , 639-640.

Cunnane, C. (1988), Methods and merits of regional flood frequency analysis, *Journal of Hydrology*, 100, 269–290

Falconer, R. A. (1980). Modelling of planform influence on circulation in harbors. *Proceeding 17th Coastal Engineering Conference, ASCEE*, 2,726-2,744.

Greenwood J.A., Landwehr J.M., Matalas N.C. & Wallis J.R. (1979), Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form, *Water Resour. Res.*, Vol. 15, pp.1049-1054

Hosking J.R.M. and Wallis J.R. (1997), *Regional Frequency Analysis*, Cambridge University Press

Kottegoda N.T. e Rosso R. Probability, statistics, and reliability for civil and environmental engineers, McGraw-Hill, New York, 1997.

Kraus, N. C., and Larson, M. (1991). "NMLONG: Numerical model for simulating the longshore current: Report 1: Model development and tests," Dredging Research Report DRP-91-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Nishimura, H. (1988). Computation of nearshore current. In *In Nearshore dynamics and coastal processes*. K. Horikawa, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 271-291.

Rosso R., Burlando P. (1990) "Scale invariance in temporal and spatial rainfall". Proceedings XV General Assembly European Geophysical Society, Copenhagen, april 23-27, Annales Geophysicae, Special Issue, p. 145

Smith, J. M., Larson, M., and Kraus, N. C. (1993). "Longshore current on a barred beach: Field measurements and calculation," *Journal of Geophysical Research* 98(C12), 22,717-22,731.

Supino G. (1964) "Le reti idrauliche", Patron, Bologna

Watanabe, A. (1987). "3-dimensional numerical model of beach evolution," *Proceedings Coastal Sediments '87*, ASCE, 802-817.

## Elenco delle Figure

- Figura 1.1 Sintesi planimetrica delle opere in progetto
- Figura 1.2 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in massi naturali
- Figura 1.3 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in massi naturali e materiale proveniente dai salpamenti
- Figura 1.4 Esempio di sezione tipo della barriera soffolta realizzata in geocontenitori
- Figura 3.1 Diagrammi probabilistici per la stazione di Calvaruso per precipitazioni di durata di 1 ora
- Figura 3.2 Diagrammi probabilistici per la stazione di Monforte per precipitazioni di durata di 1 ora
- Figura 3.3 Diagrammi probabilistici per la stazione di Camaro per precipitazioni di durata di 1 ora
- Figura 3.4 Localizzazione dei torrenti analizzati e dei relativi bacini idrografici.
- Figura 4.1 Griglia di calcolo avente l'asse lungo la direzione parallela alla linea di costa che forma un angolo di  $19^\circ$  con la direzione Est
- Figura 4.2 Riproduzione esemplificativa della griglia di calcolo CMS-FLOW: esempio delle condizioni al contorno imposte in corrispondenza dei torrenti.
- Figura 4.3 Distribuzioni dei sedimenti utilizzati per il calcolo della portata solida.
- Figura A.1 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 2 anni
- Figura A.2 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 2 anni
- Figura A.3 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 2 anni



Figura A.4 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 2 anni

Figura A.5 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 2 anni

Figura A.6 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 2 anni

Figura A.7 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 2 anni

Figura A.8 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.9 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.10 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.11 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.12 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.13 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.14 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 20 anni

Figura A.15 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.16 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.17 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.18 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.19 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.20 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura A.21 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 50 anni

Figura B.1 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.2 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.3 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.4 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.5 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.6 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.7 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno paria a 2 anni

Figura B.8 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.9 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.10 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.11 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.12 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.13 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.14 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno paria a 20 anni

Figura B.15 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.16 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.17 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.18 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.19 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.20 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 50 anni

Figura B.21 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno paria a 50 anni

## **Elenco delle Tabelle**

Tabella 3.I Altezze di precipitazione di durata un'ora e tempo di ritorno 100 anni e i valori delle variabili dei relativi test statistici

Tabella 3.II Pesi delle singola stazioni e dei bacini interessati

Tabella 3.III Caratteristiche morfometriche dei bacini idrografici

Tabella 3.IV Tempi di corrivazione per i singoli bacini

Tabella 3.V Portate alla foce per i singoli bacini

Tabella 4.I Numero di celle che individuano la sezione alla foce dei torrenti.

## Appendice A

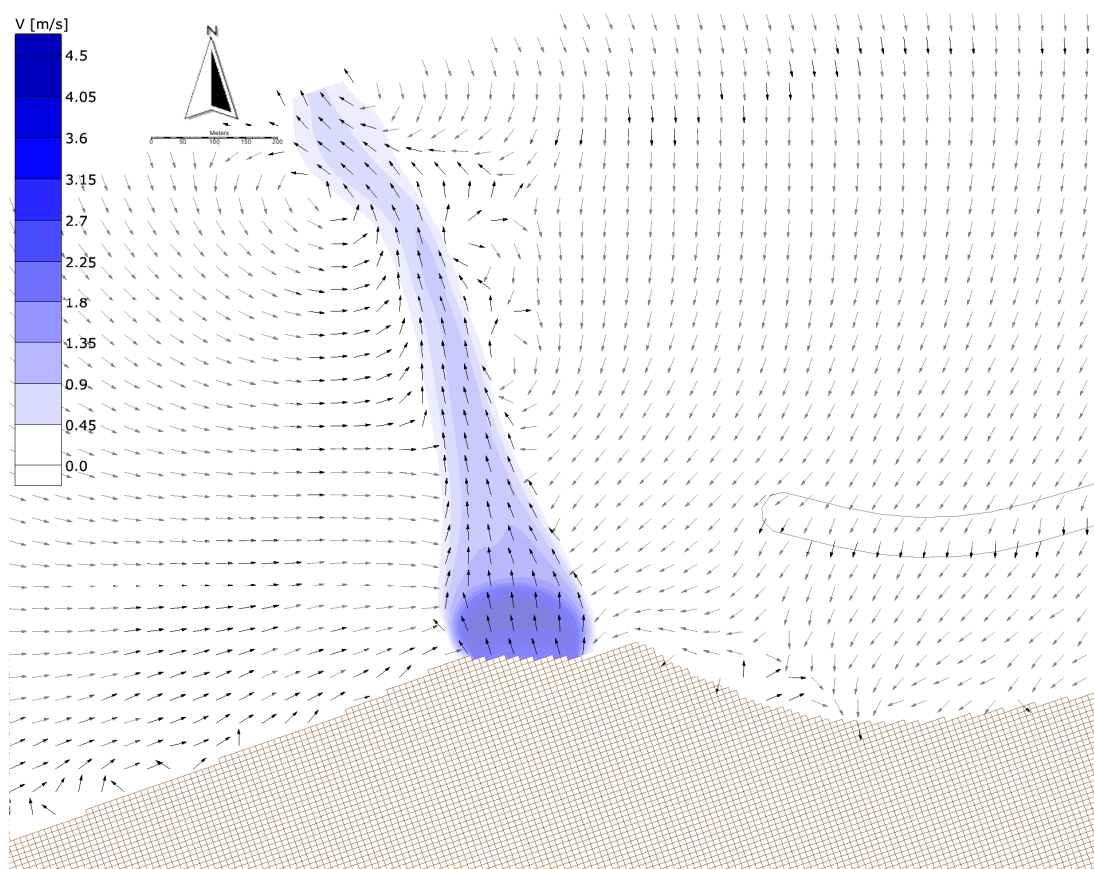


Figura A.1 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 2 anni

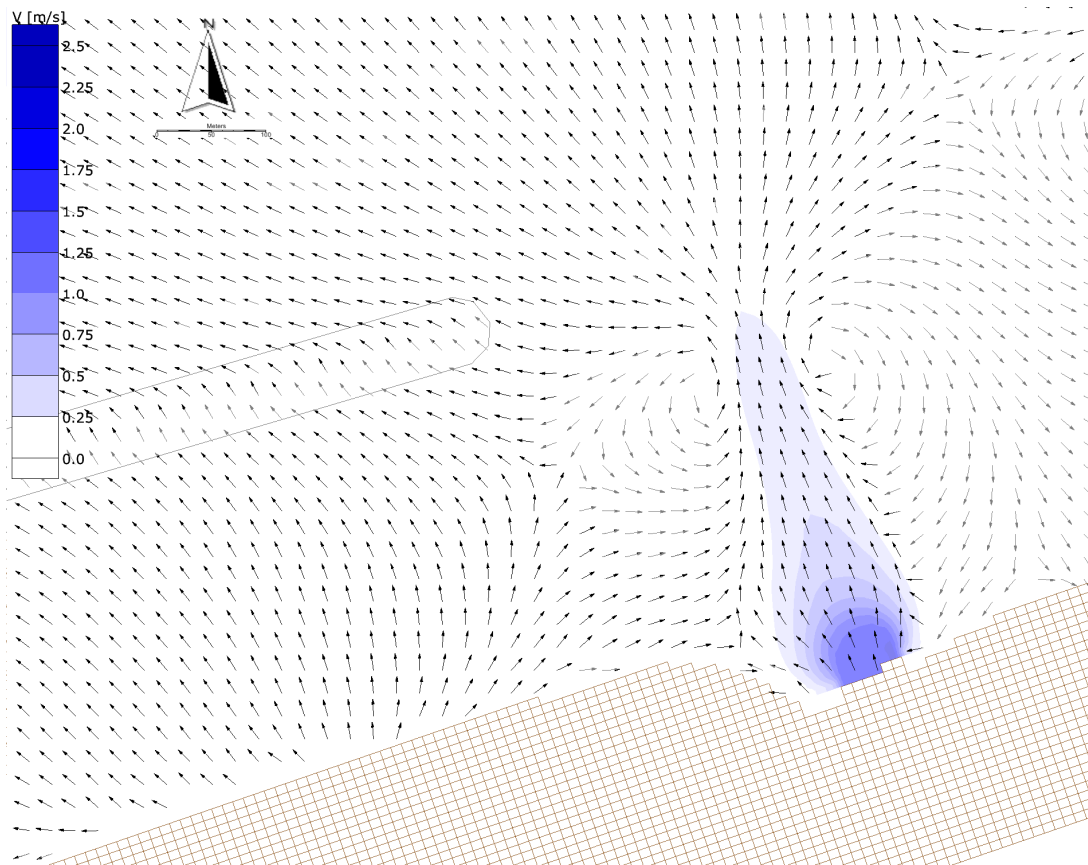


Figura A.2 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del  
Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 2 anni

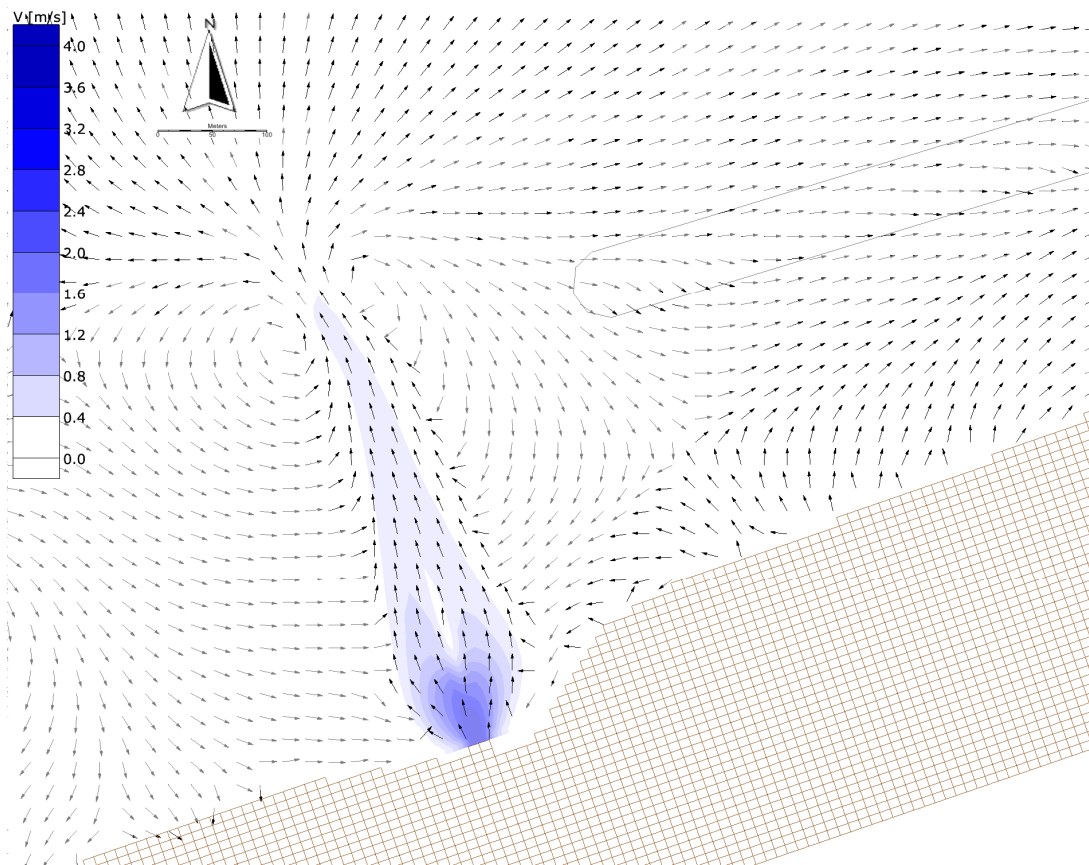


Figura A.3 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 2 anni



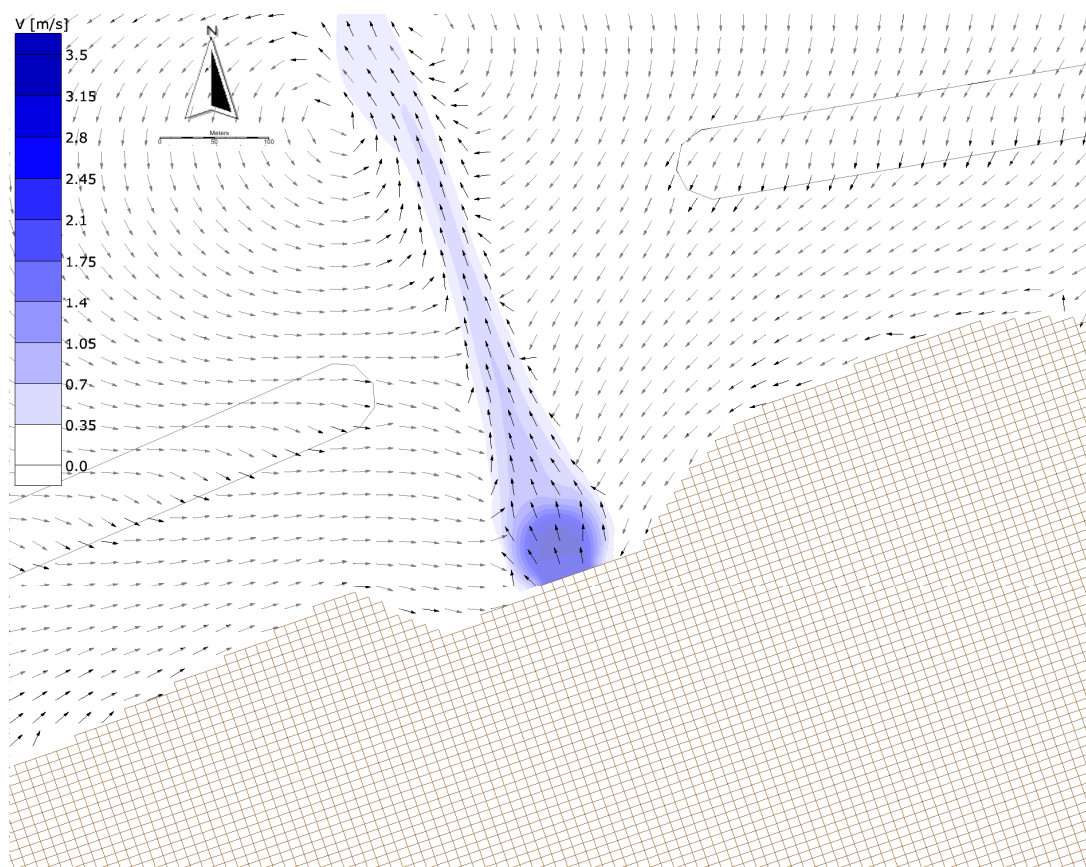


Figura A.4 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 2 anni

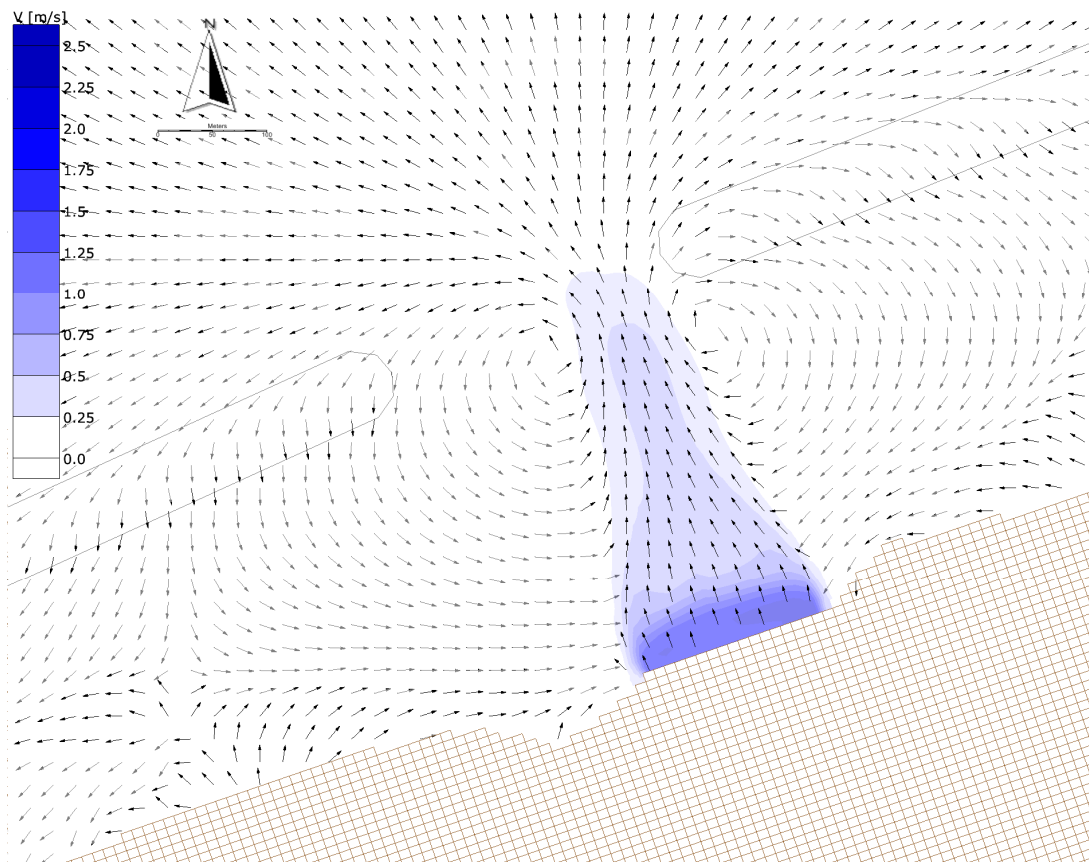


Figura A.5 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 2 anni

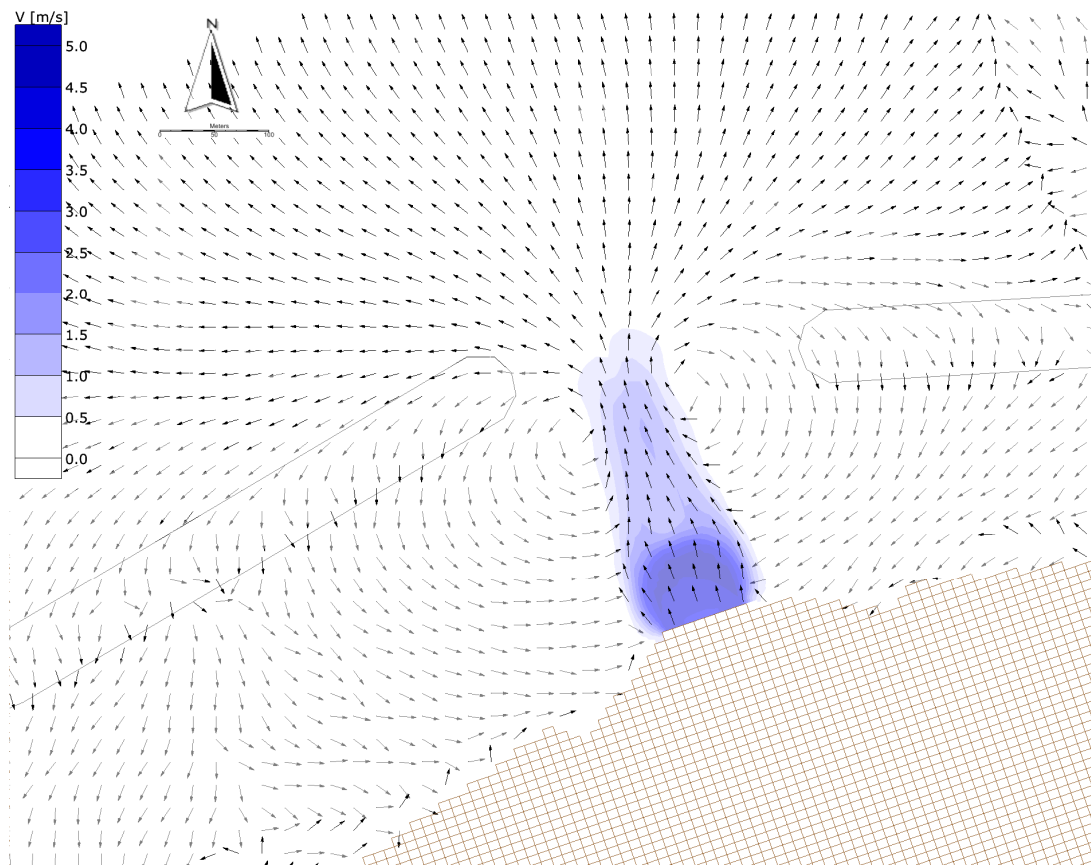


Figura A.6 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 2 anni

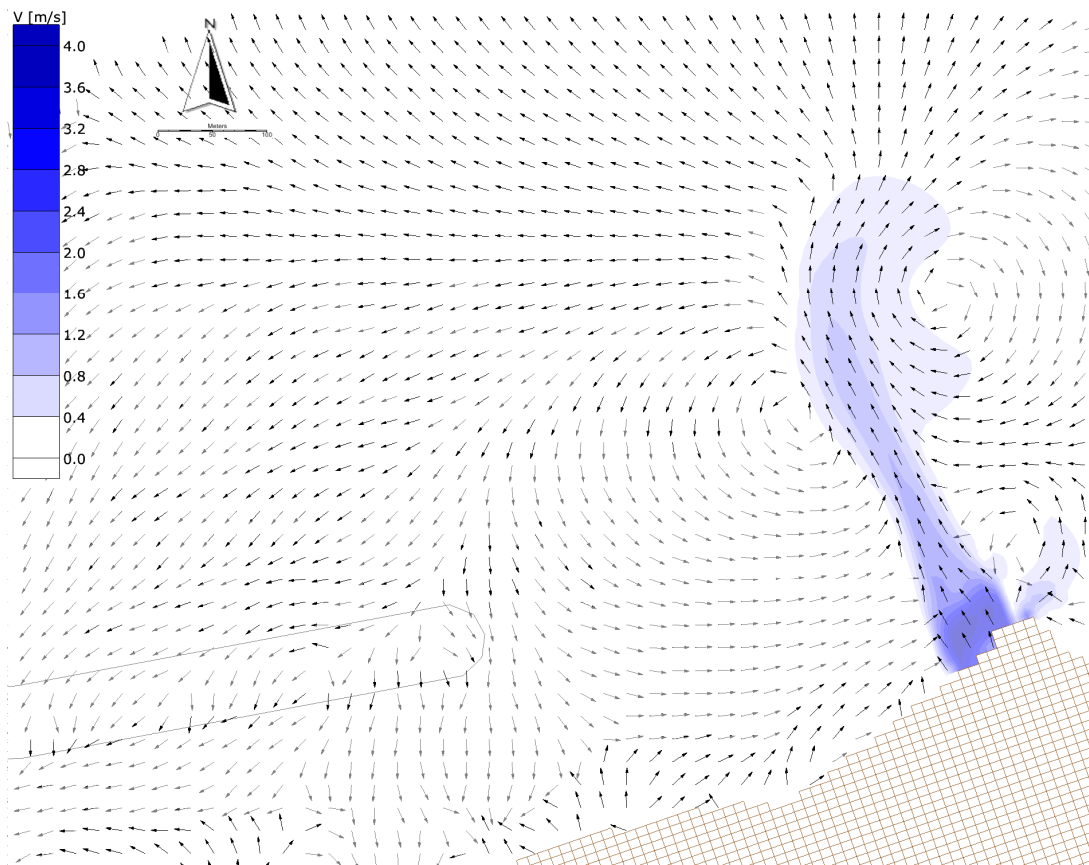


Figura A.7 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del  
Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 2 anni

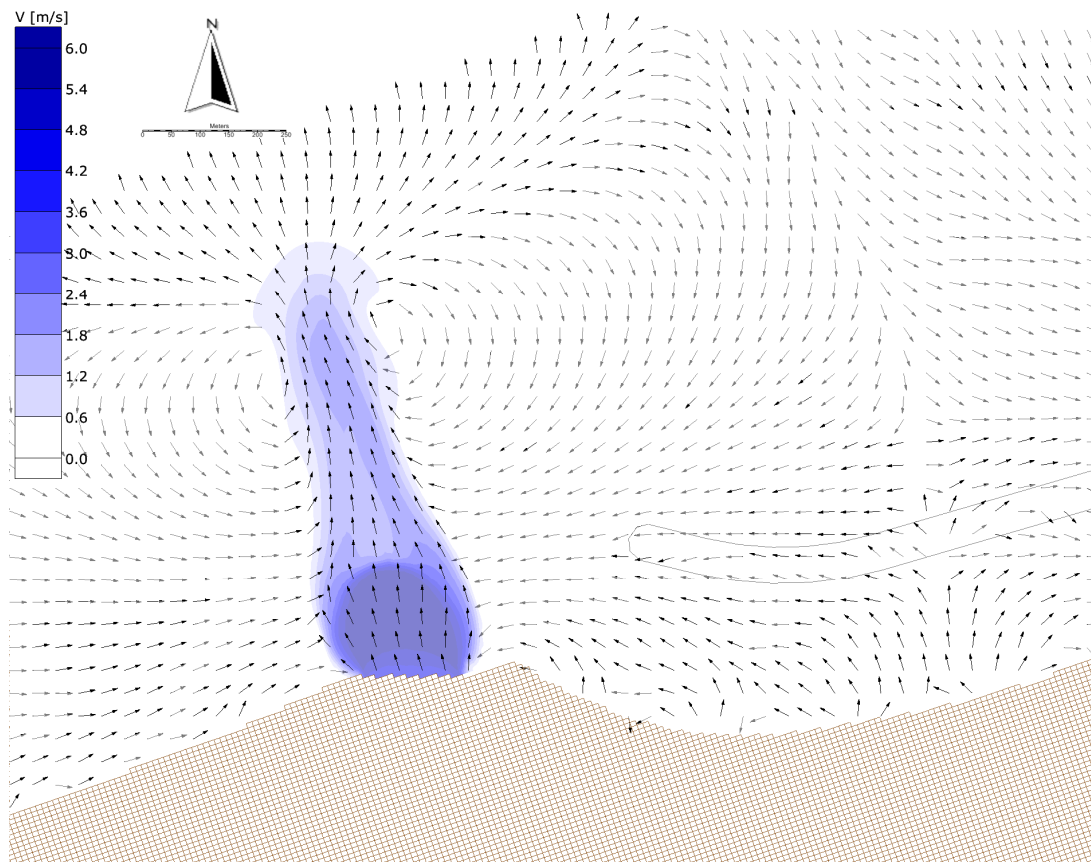


Figura A.8 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 20 anni

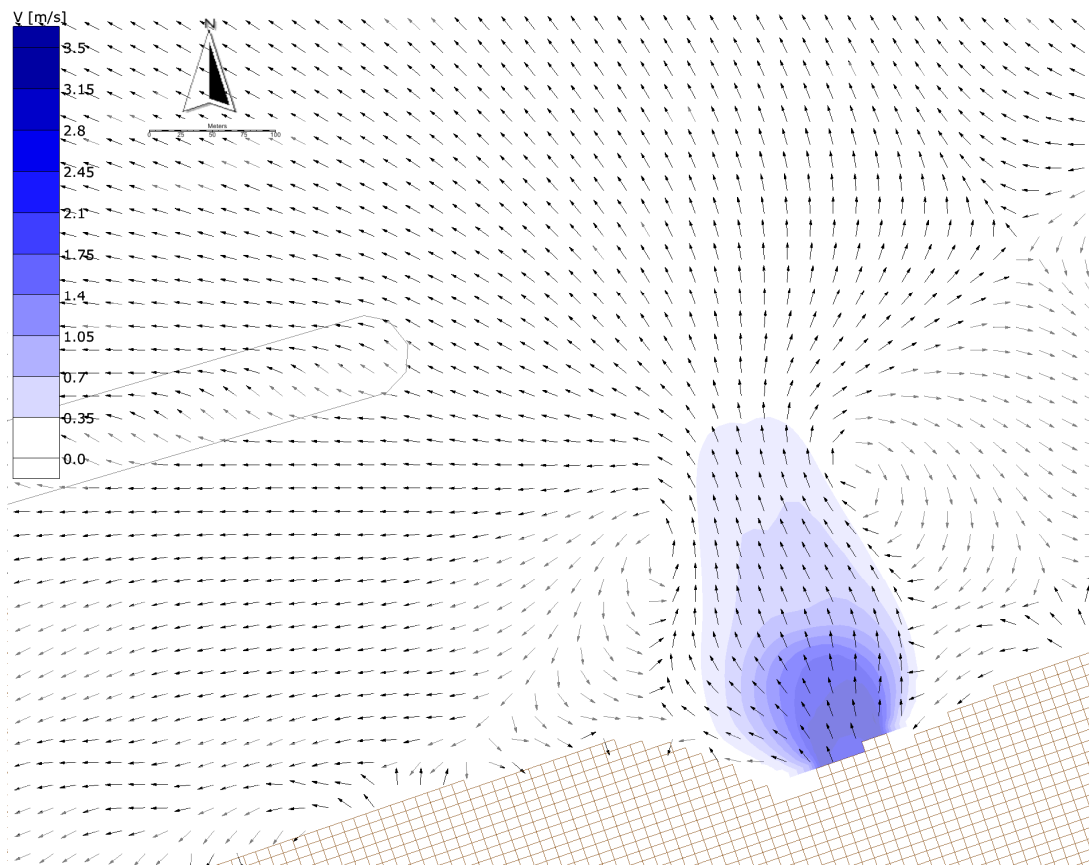


Figura A.9 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 20 anni

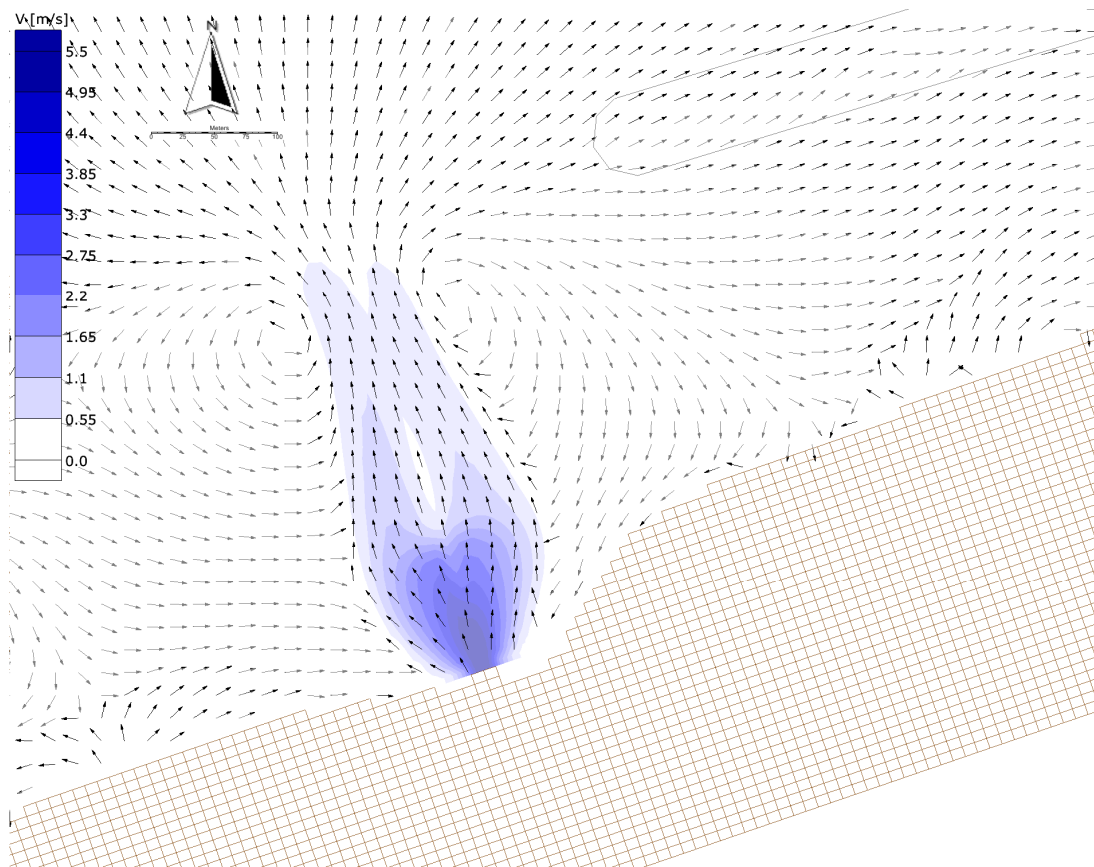


Figura A.10 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 20 anni

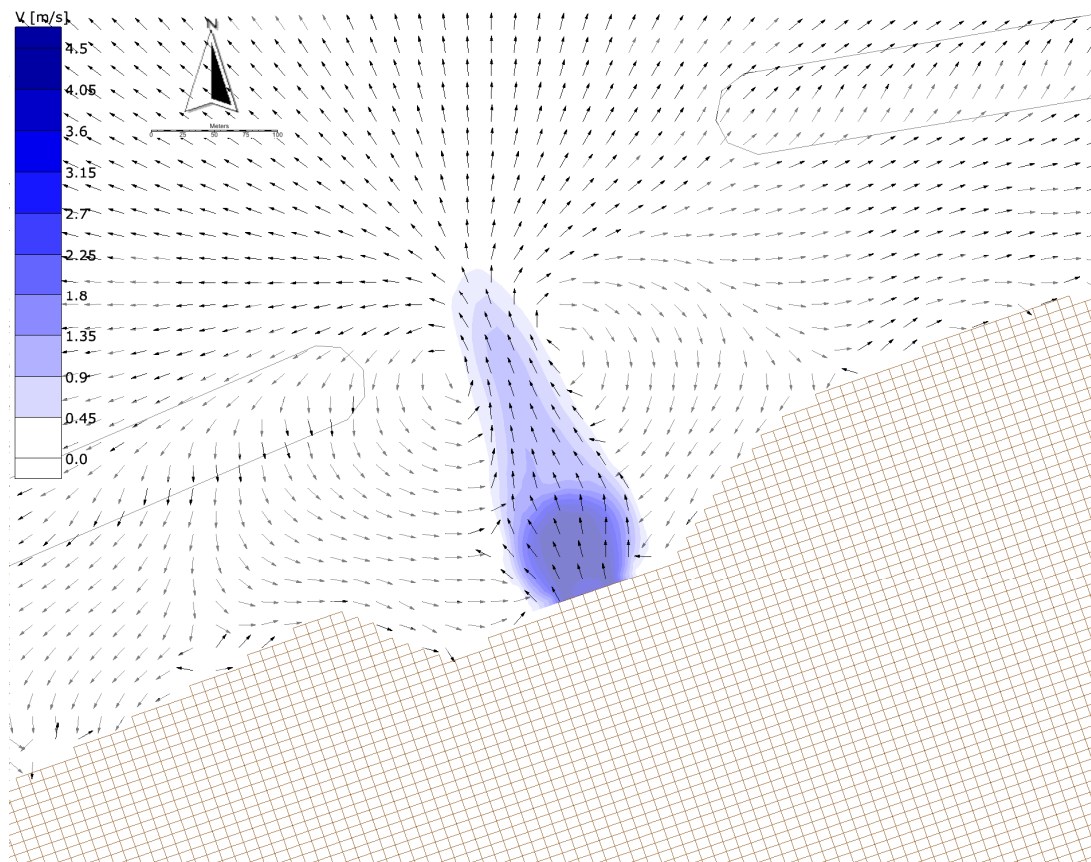


Figura A.11 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 20 anni



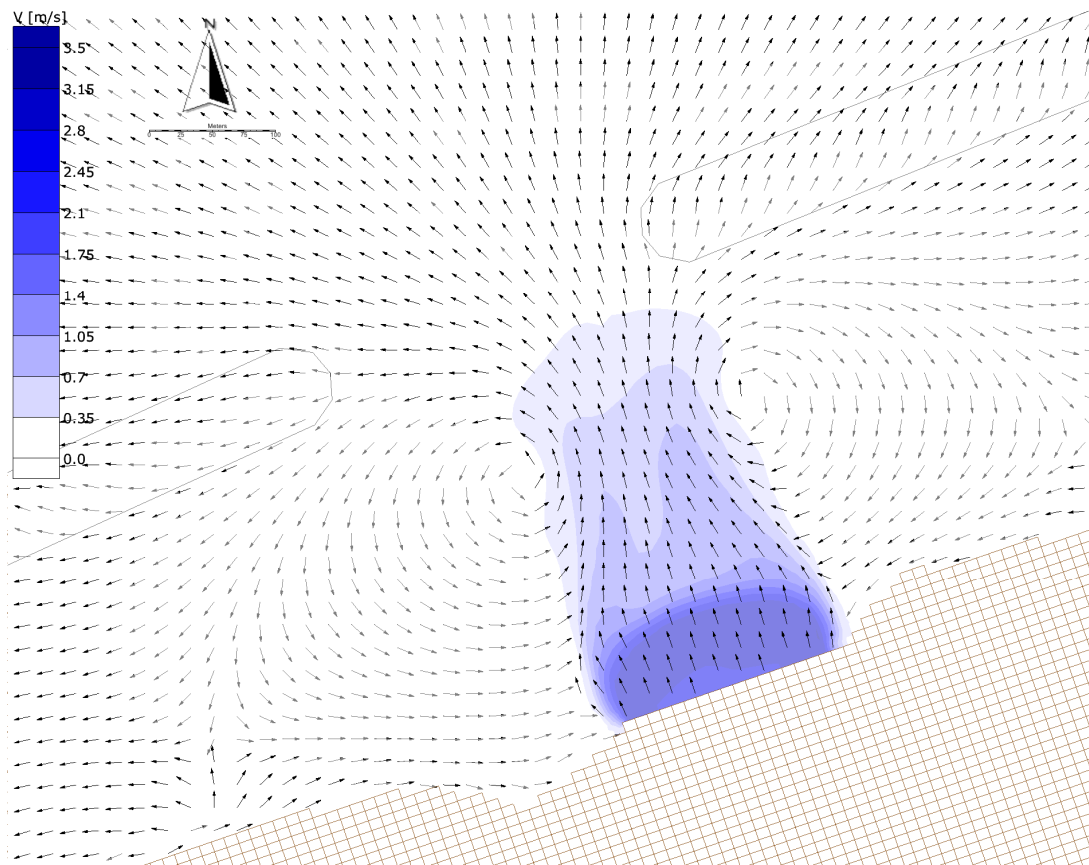


Figura A.12 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 20 anni

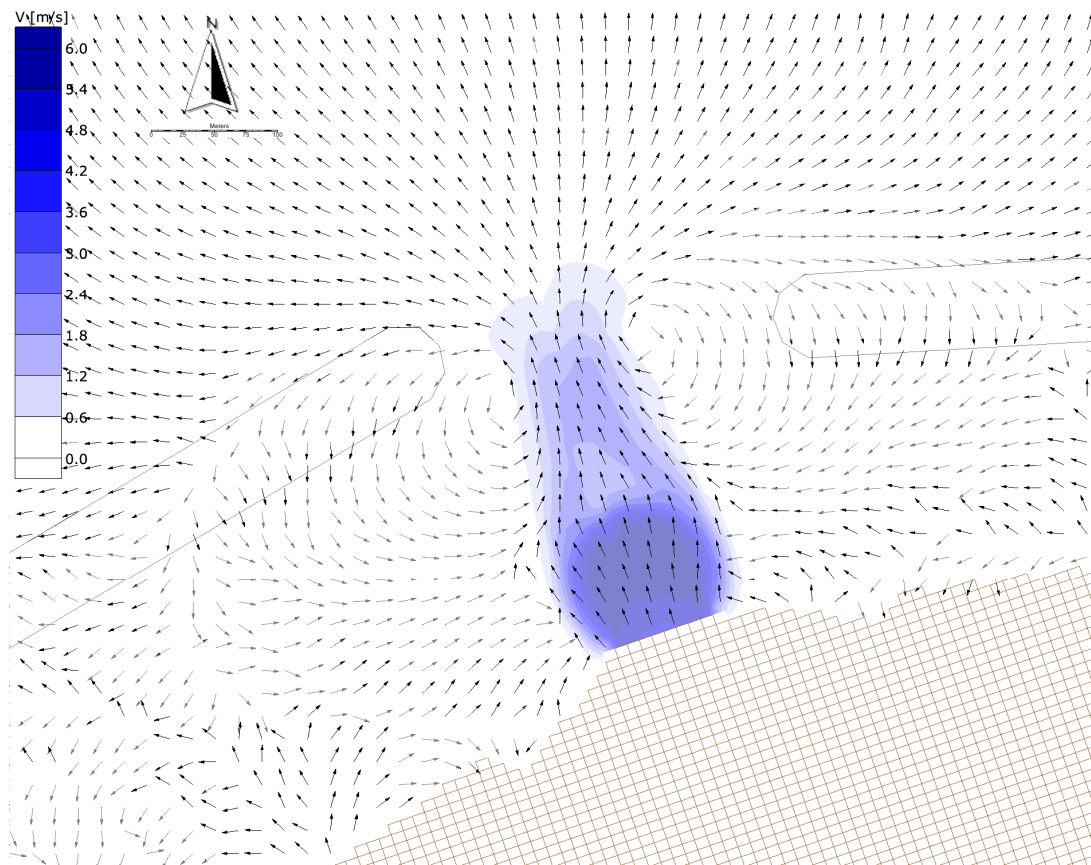


Figura A.13 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 20 anni

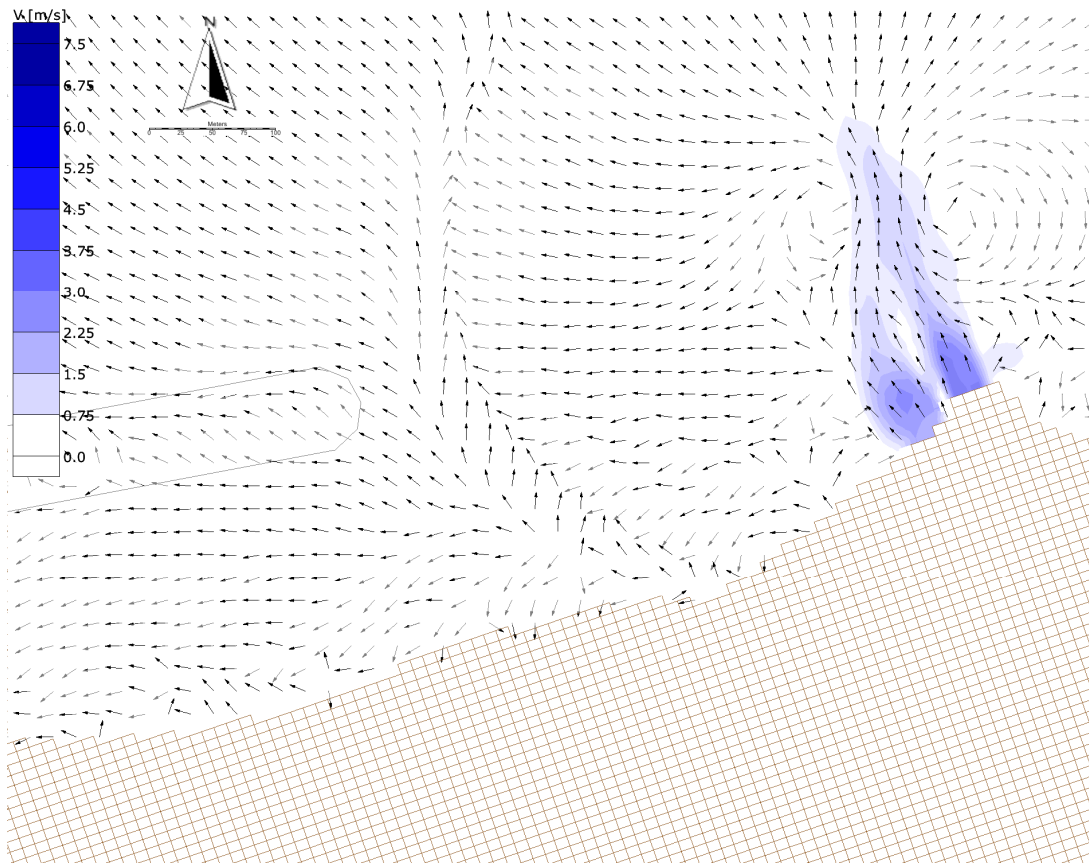


Figura A.14 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 20 anni

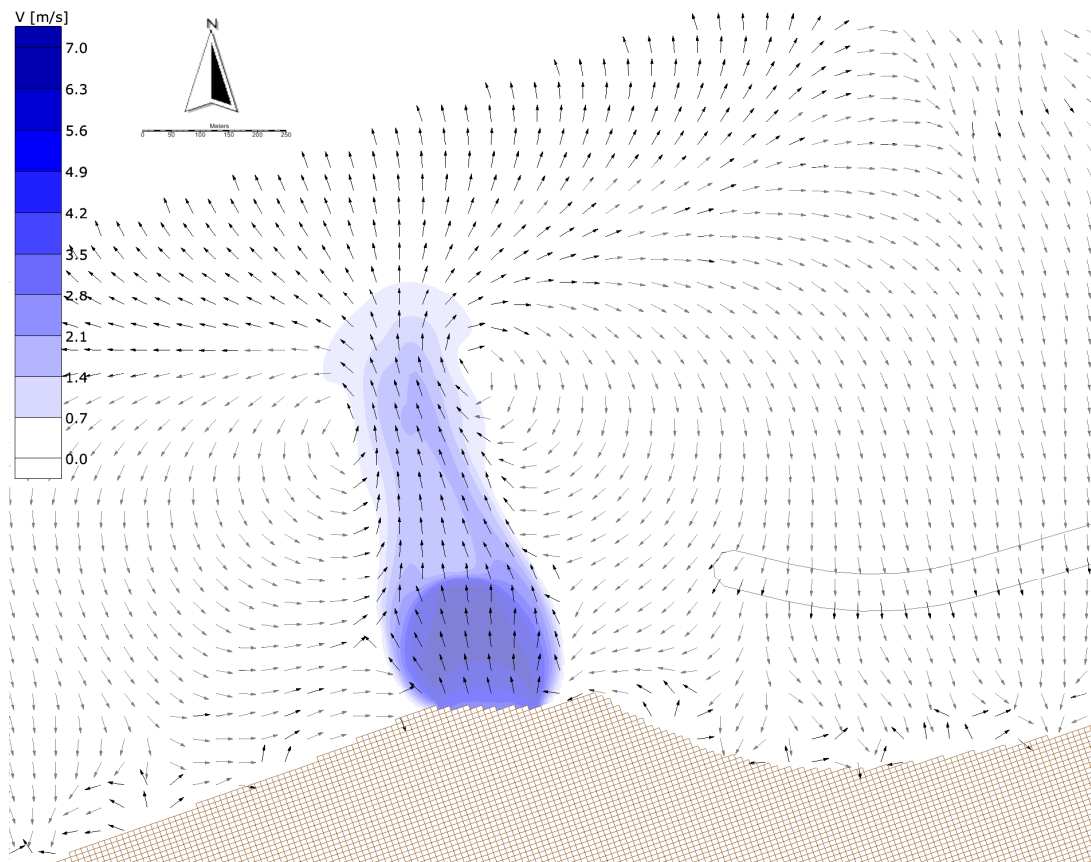


Figura A.15 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 50 anni

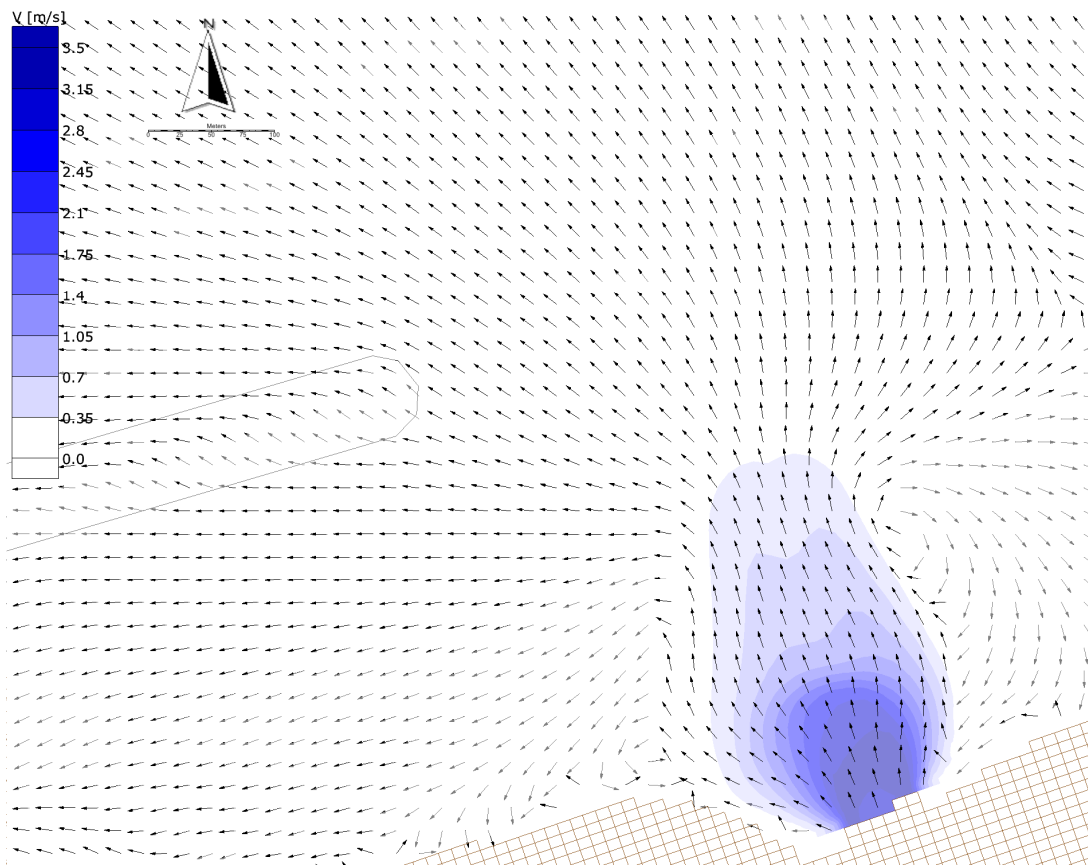


Figura A.16 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno pari a 50 anni

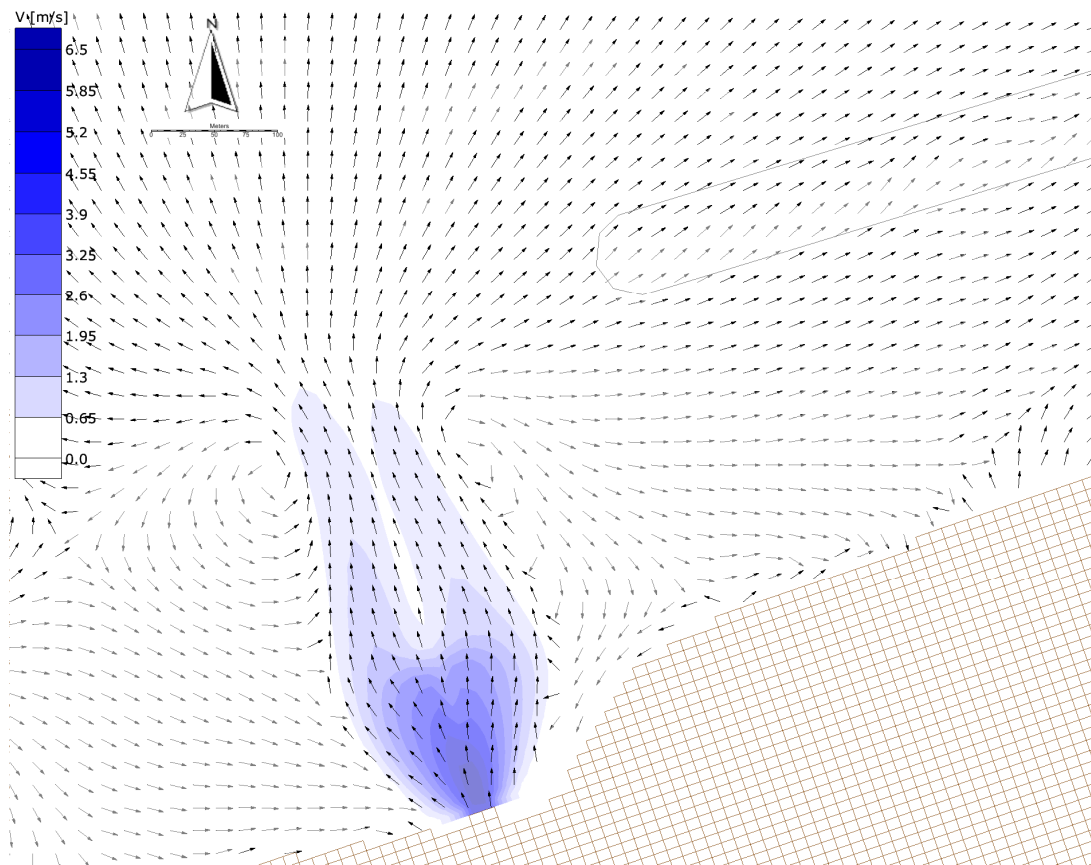


Figura A.17 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno pari a 50 anni

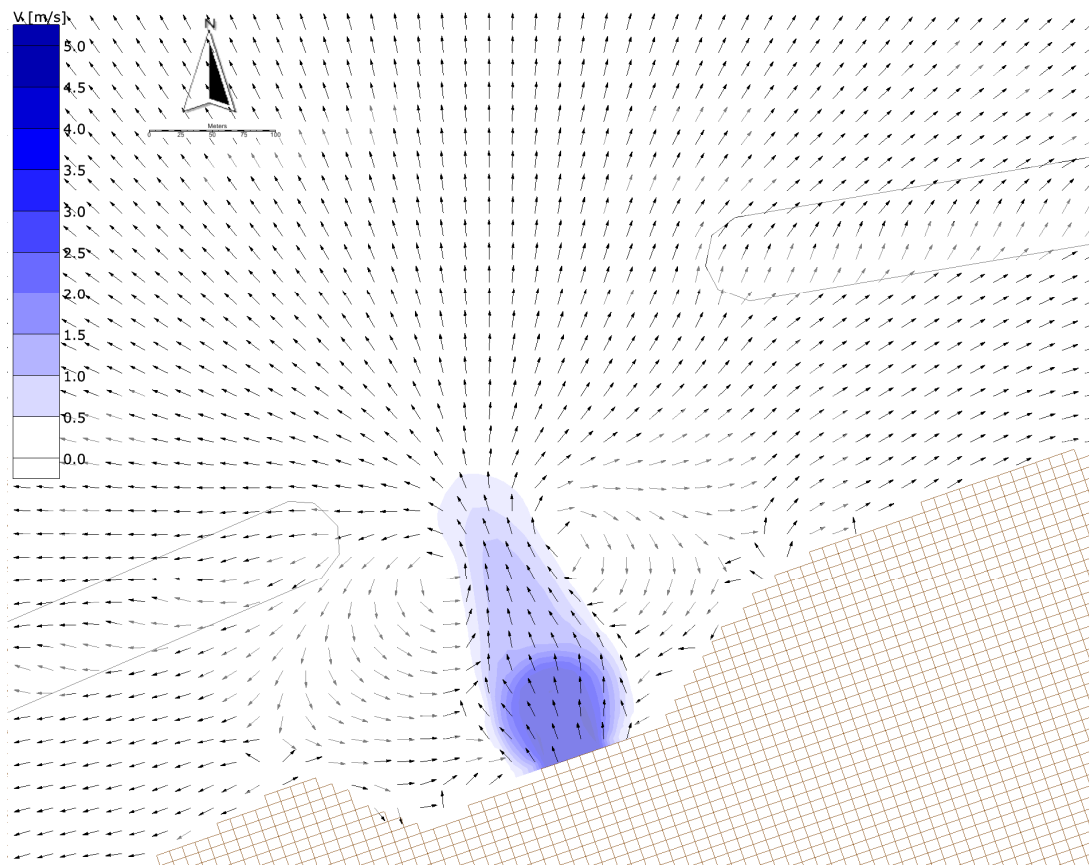


Figura A.18 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del  
Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno pari a 50 anni

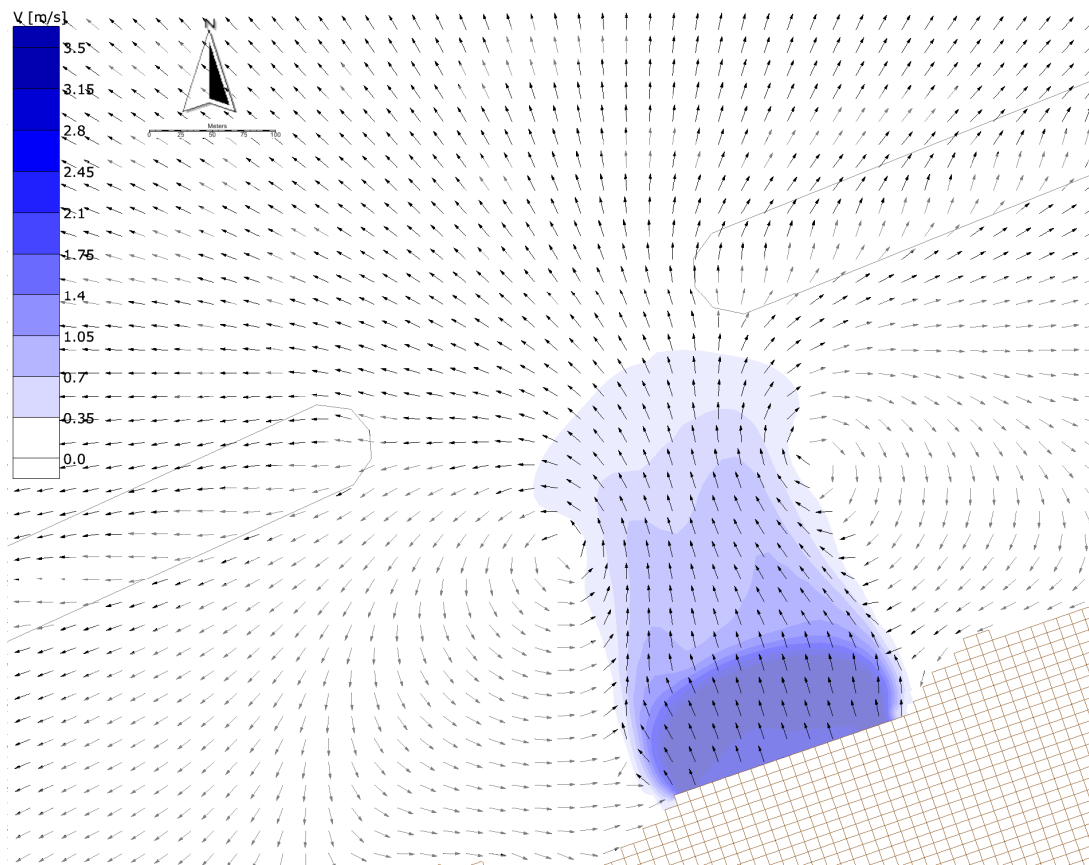


Figura A.19 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno pari a 50 anni



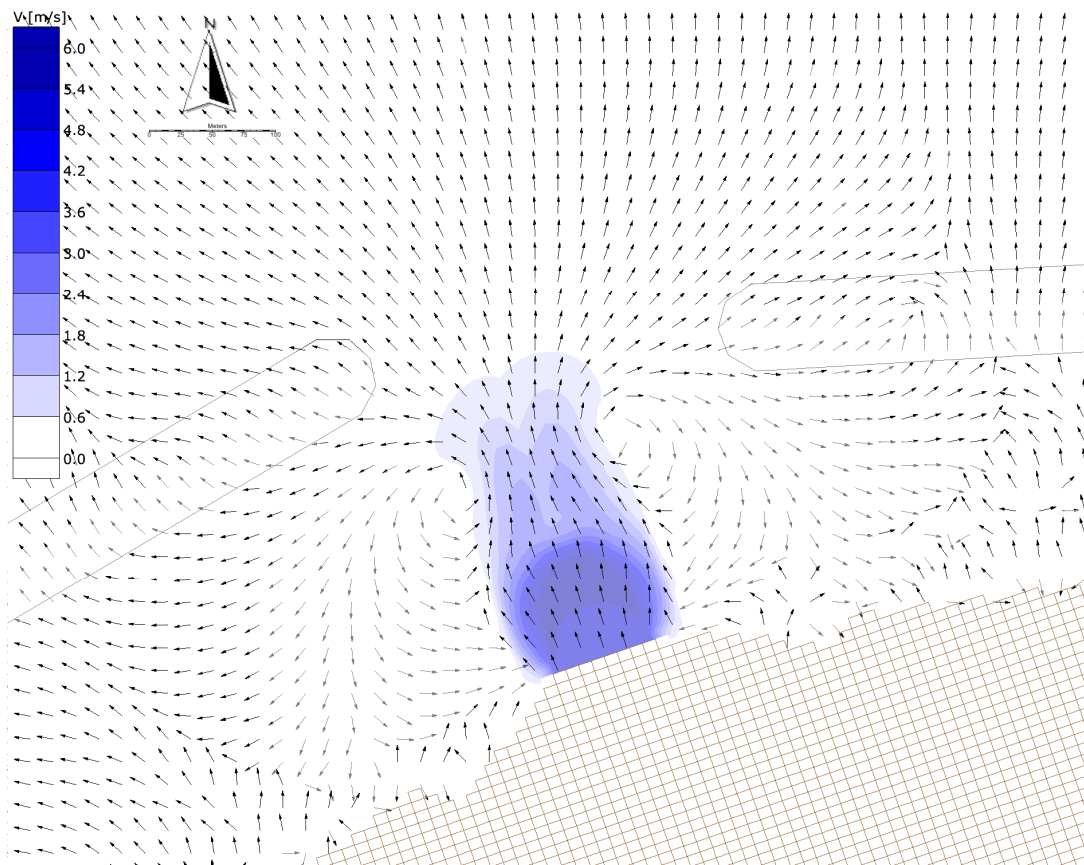


Figura A.20 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno pari a 50 anni

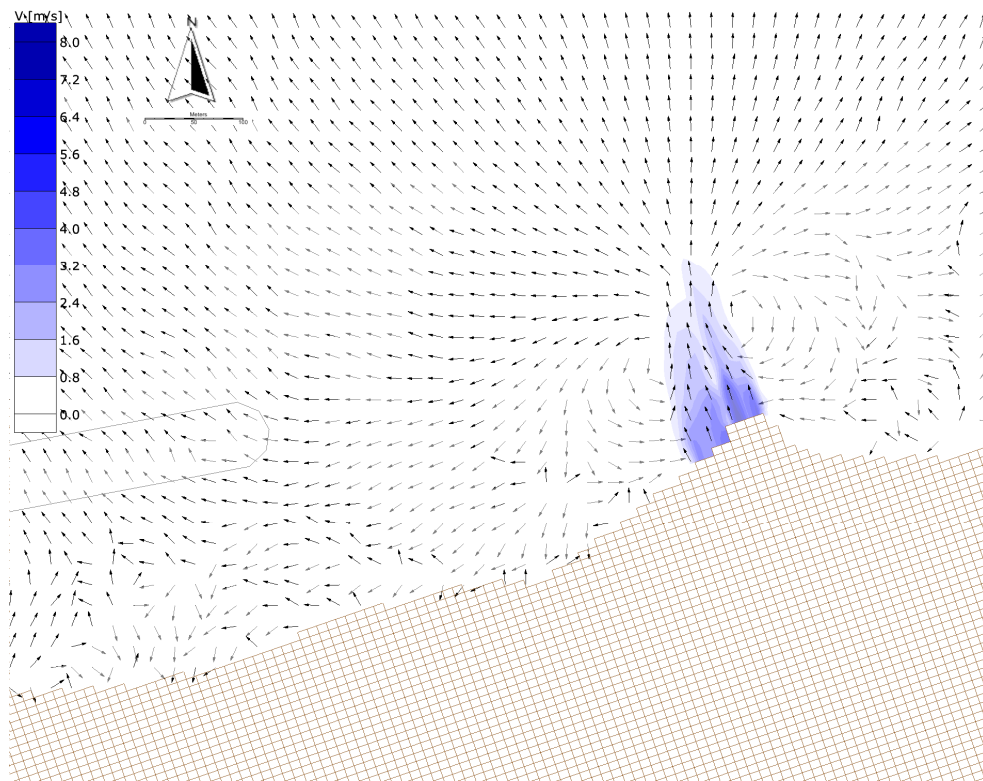


Figura A.21 Distribuzione della velocità in corrispondenza della foce del  
Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 50 anni

## Appendice B

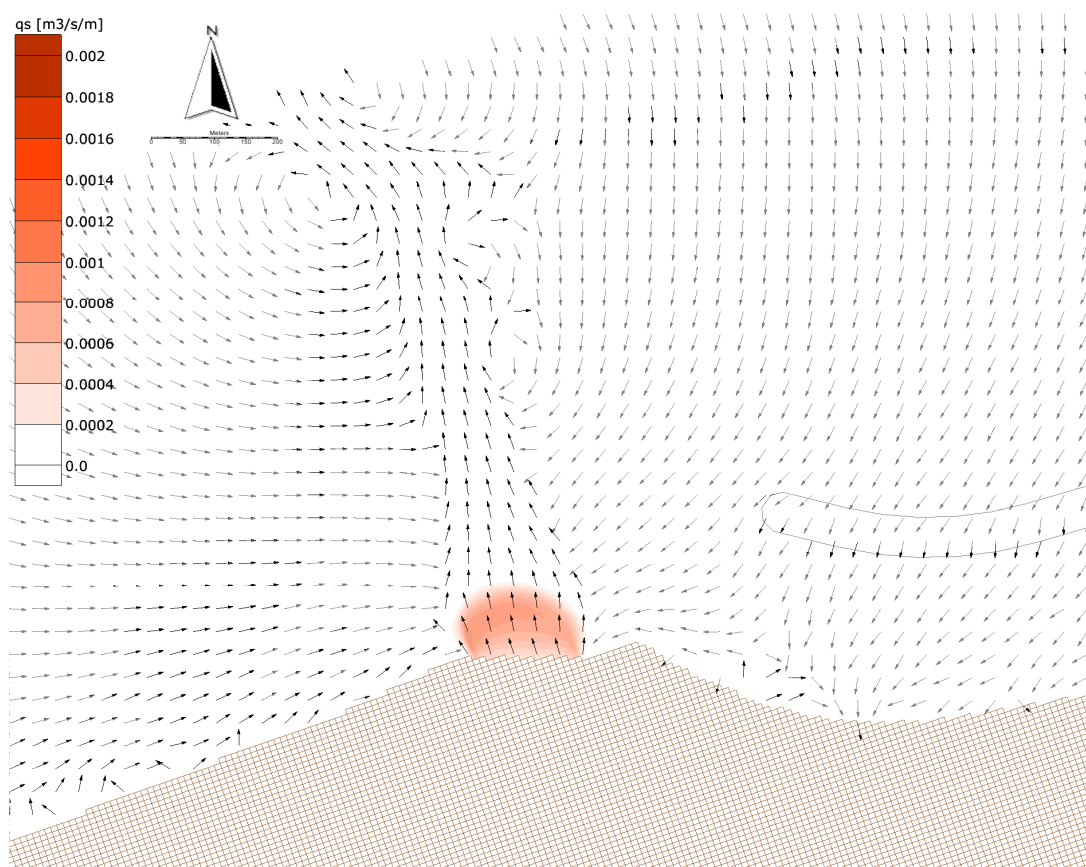


Figura B.1 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno paria a 2 anni

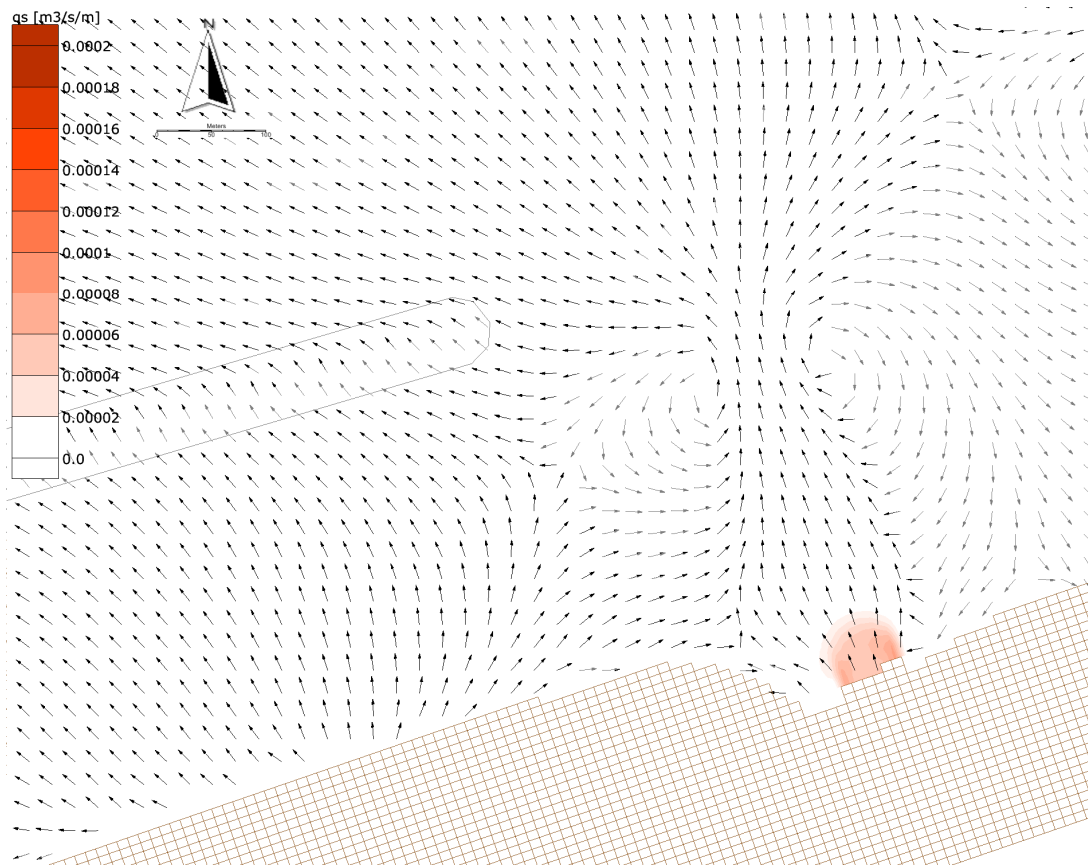


Figura B.2 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 2 anni

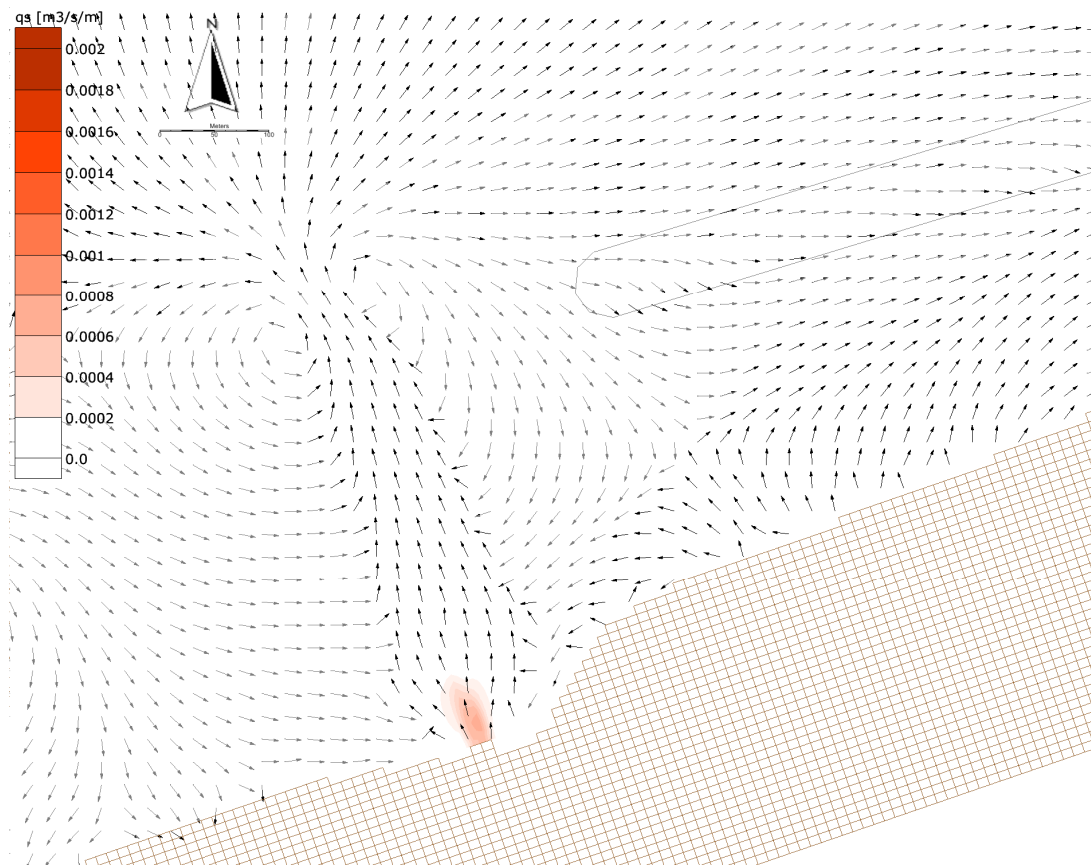


Figura B.3 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 2 anni

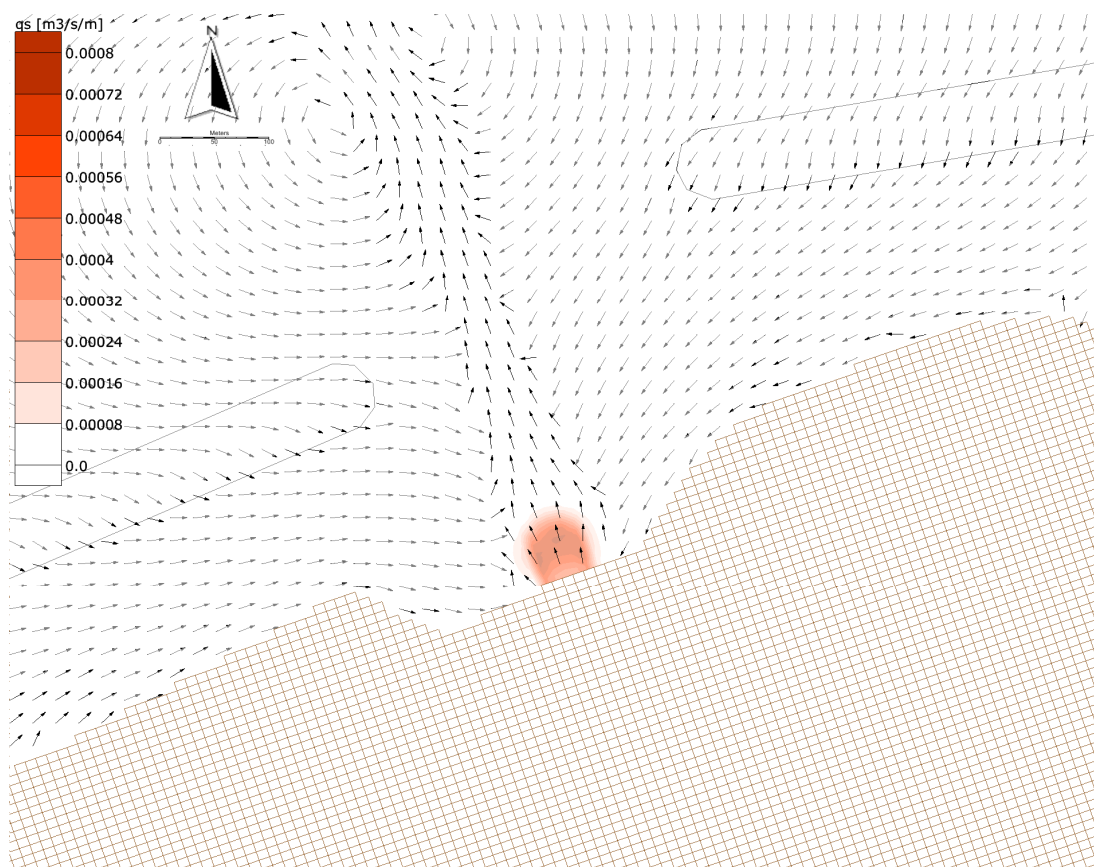


Figura B.4 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 2 anni

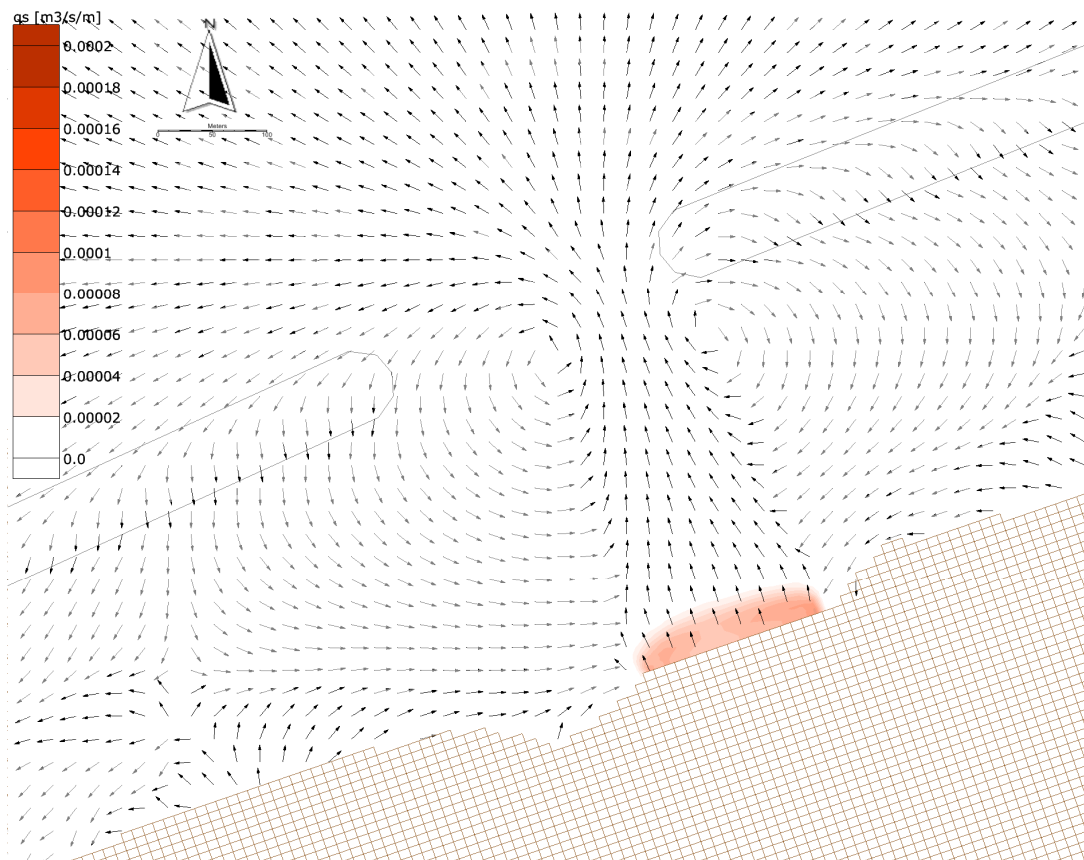


Figura B.5 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 2 anni



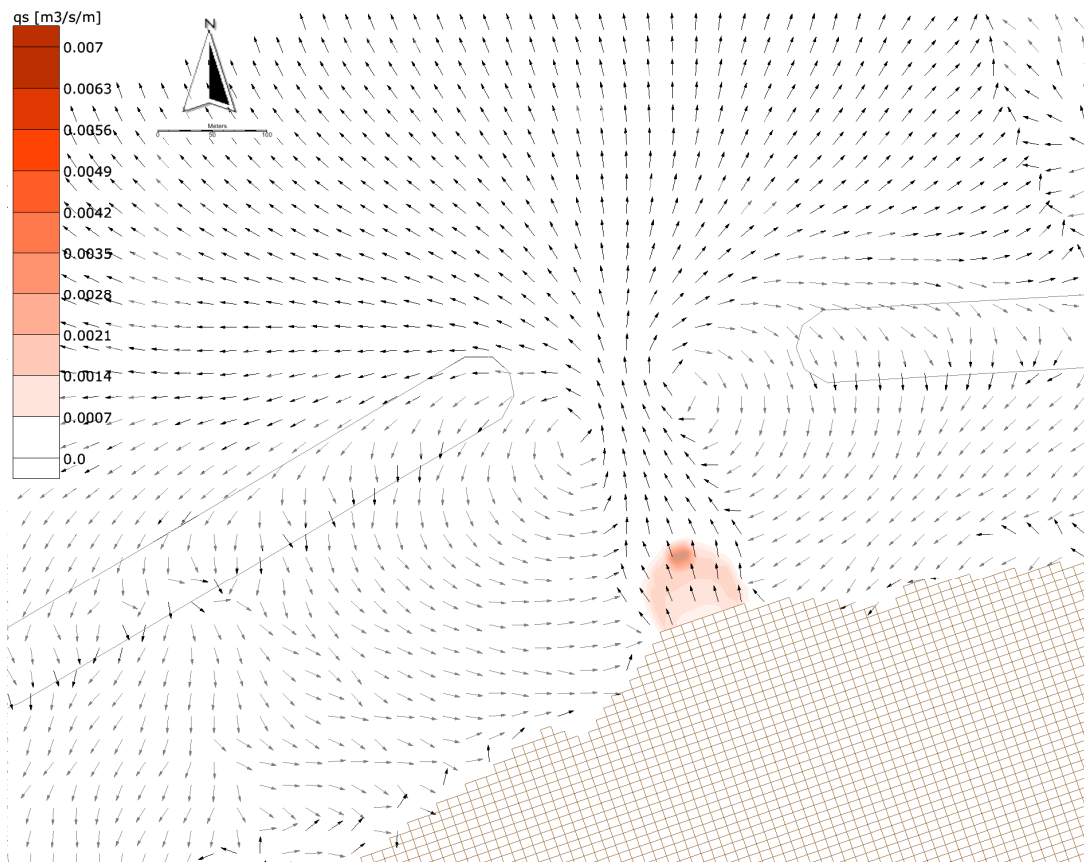


Figura B.6 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 2 anni

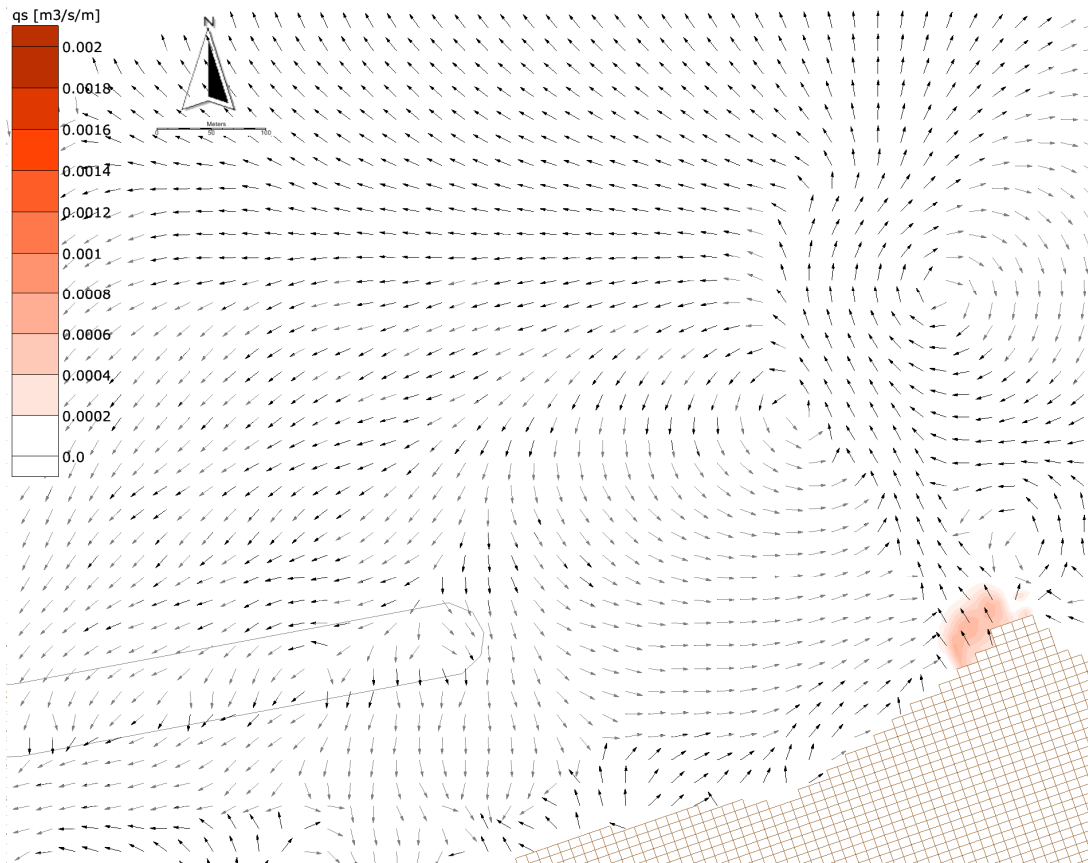


Figura B.7 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno paria a 2 anni

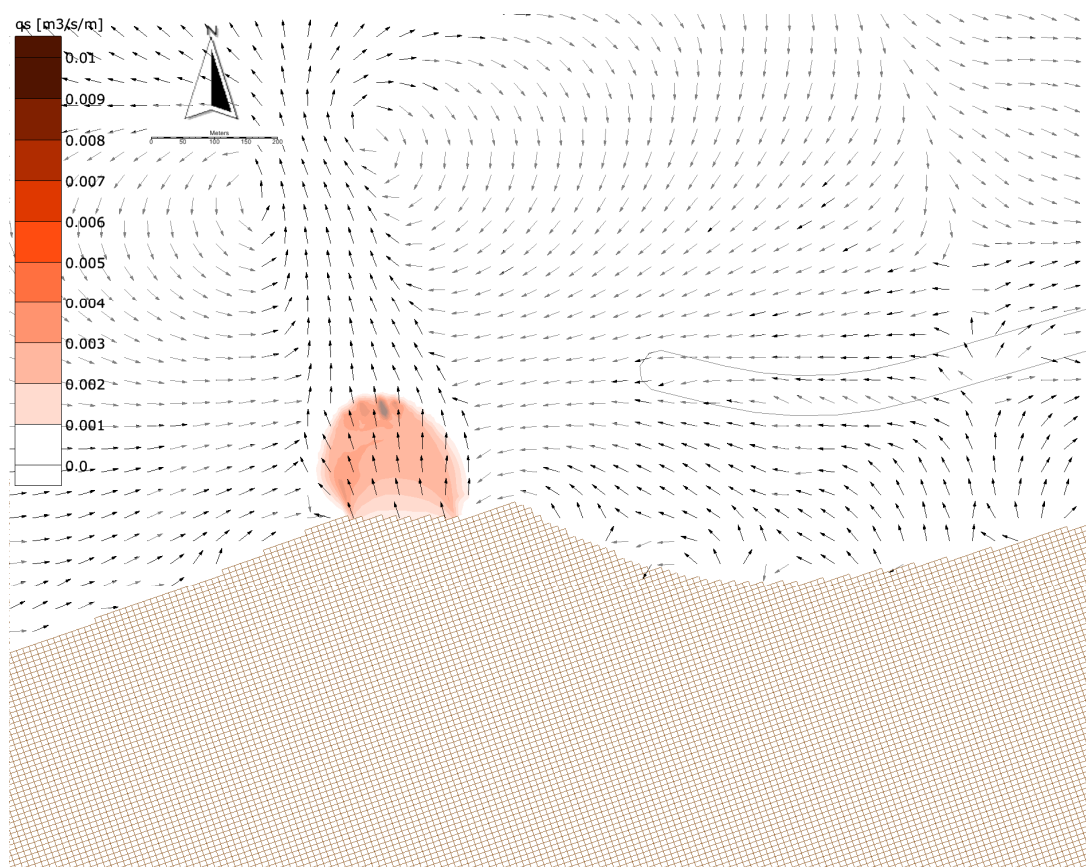


Figura B.8 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno paria a 20 anni

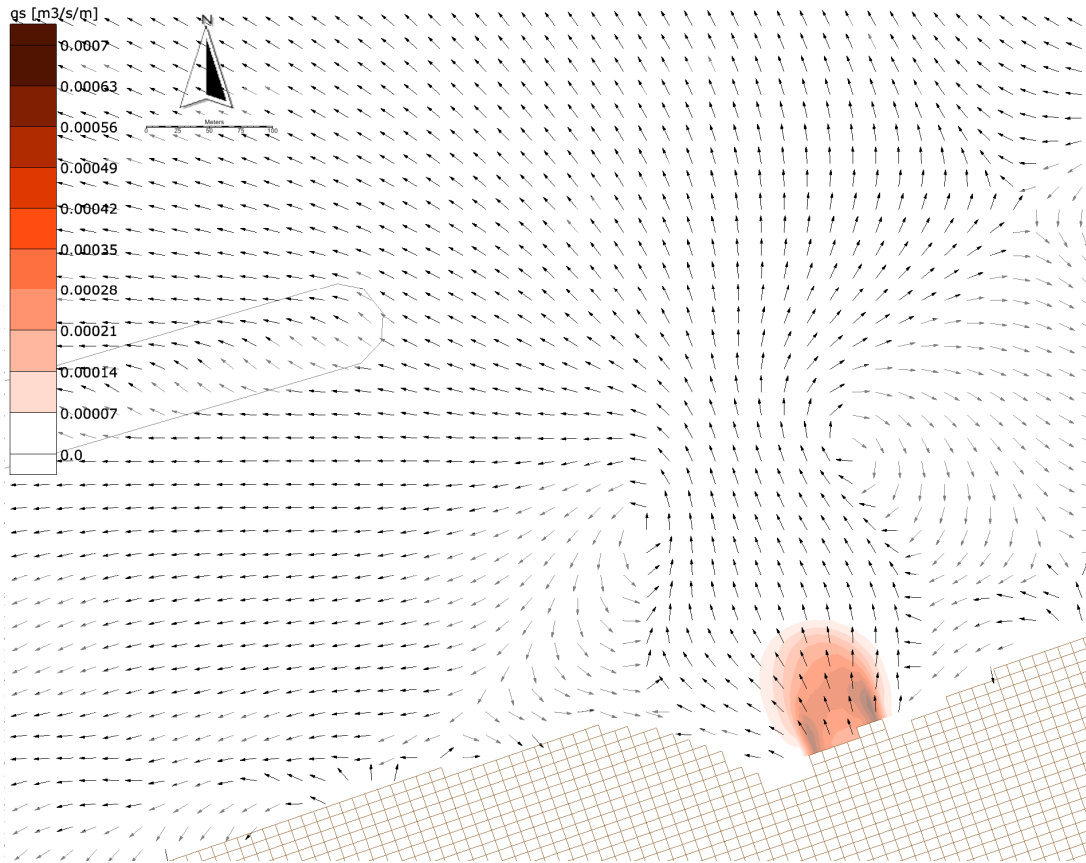


Figura B.9 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 20 anni

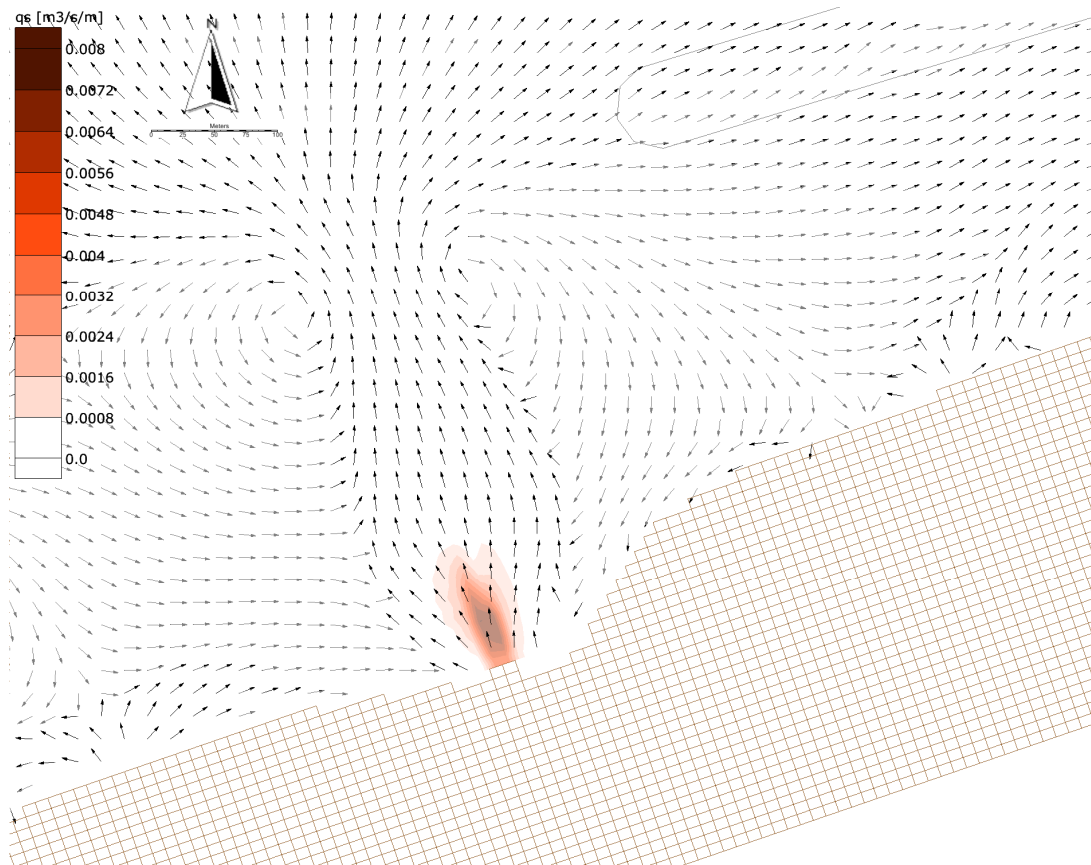


Figura B.10 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 20 anni

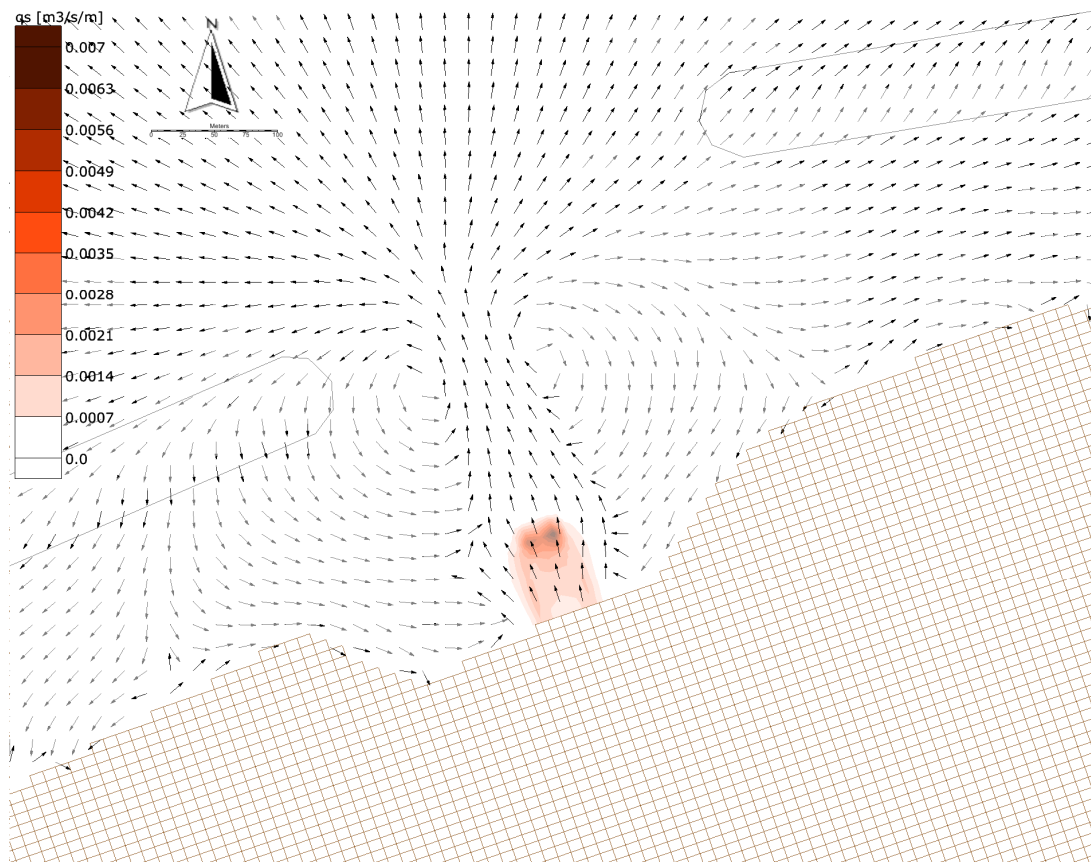


Figura B.11 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 20 anni

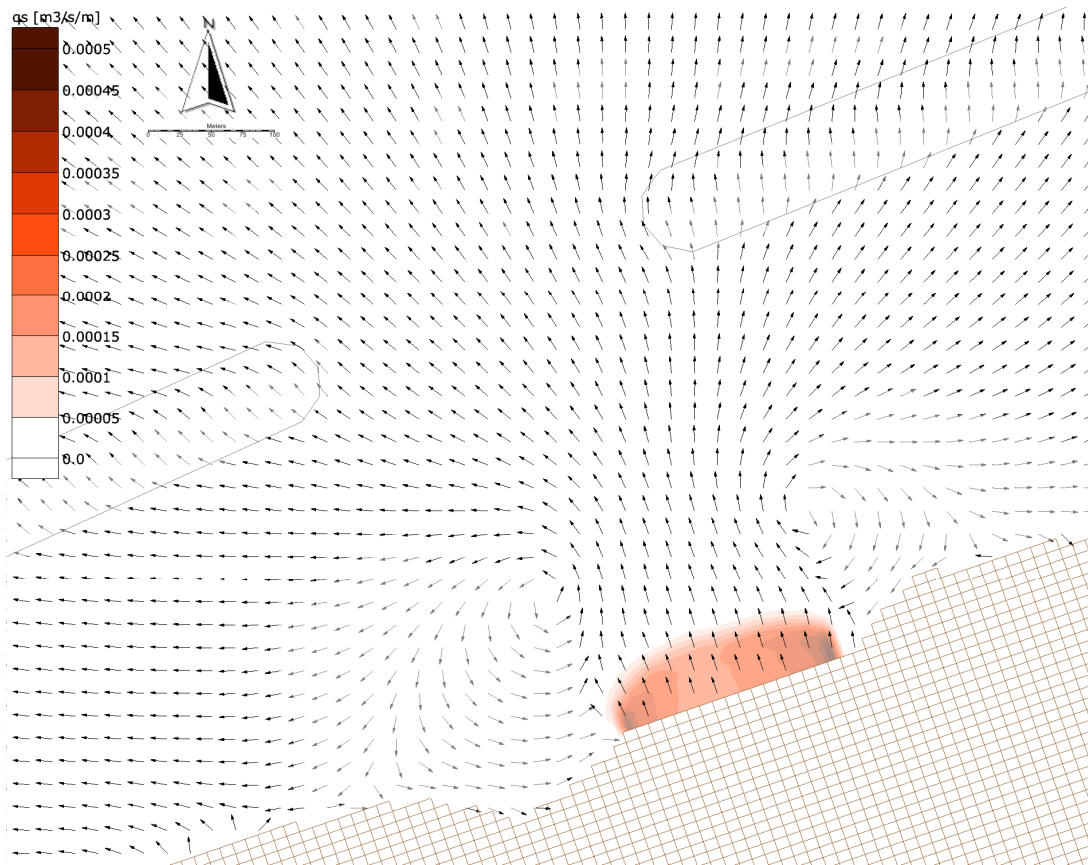


Figura B.12 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 20 anni

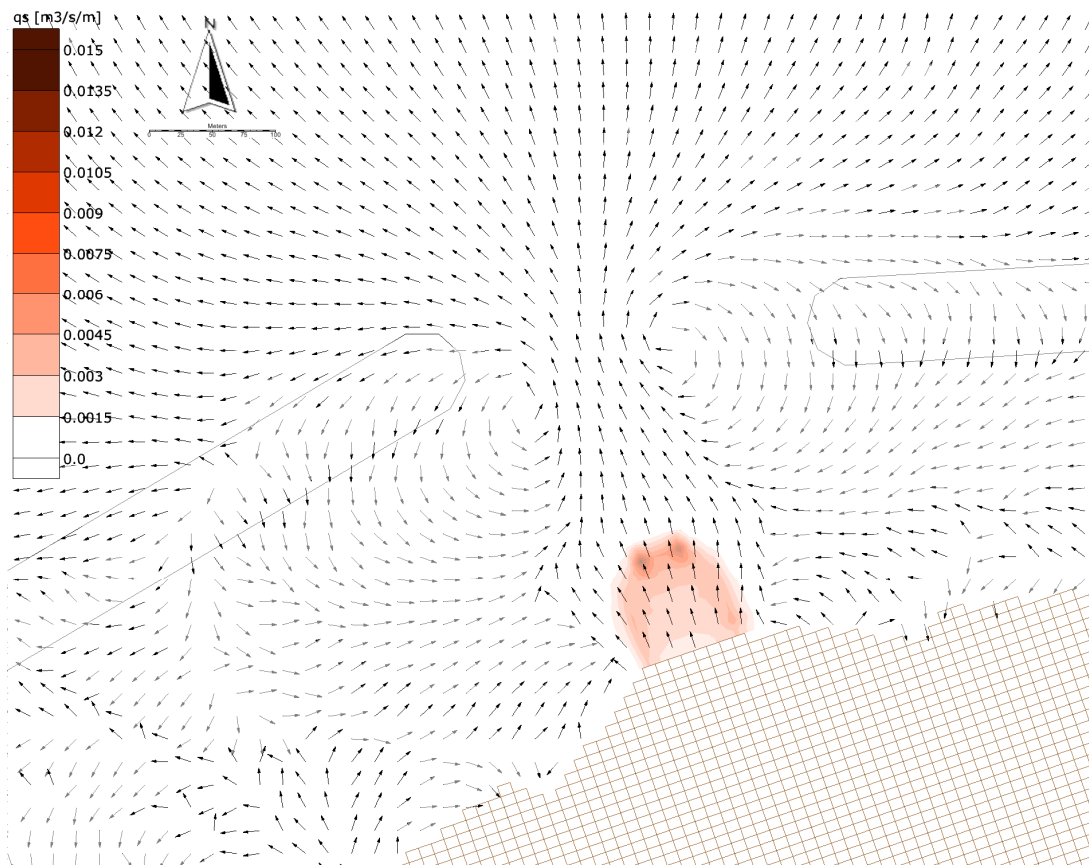


Figura B.13 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 20 anni



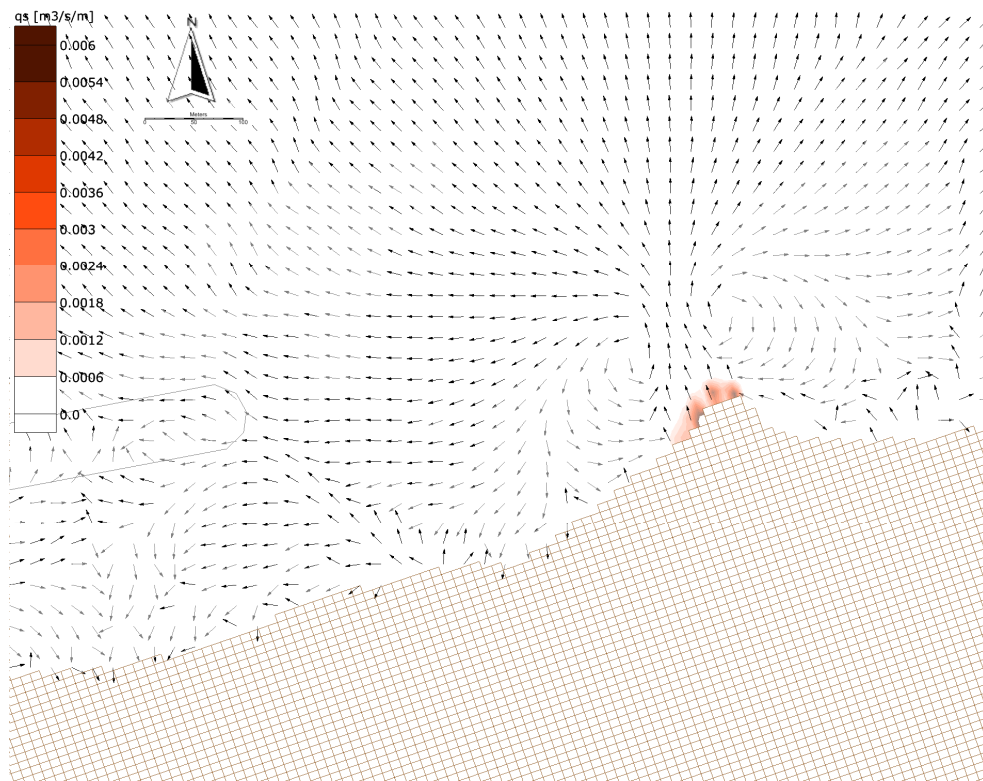


Figura B.14 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 20 anni

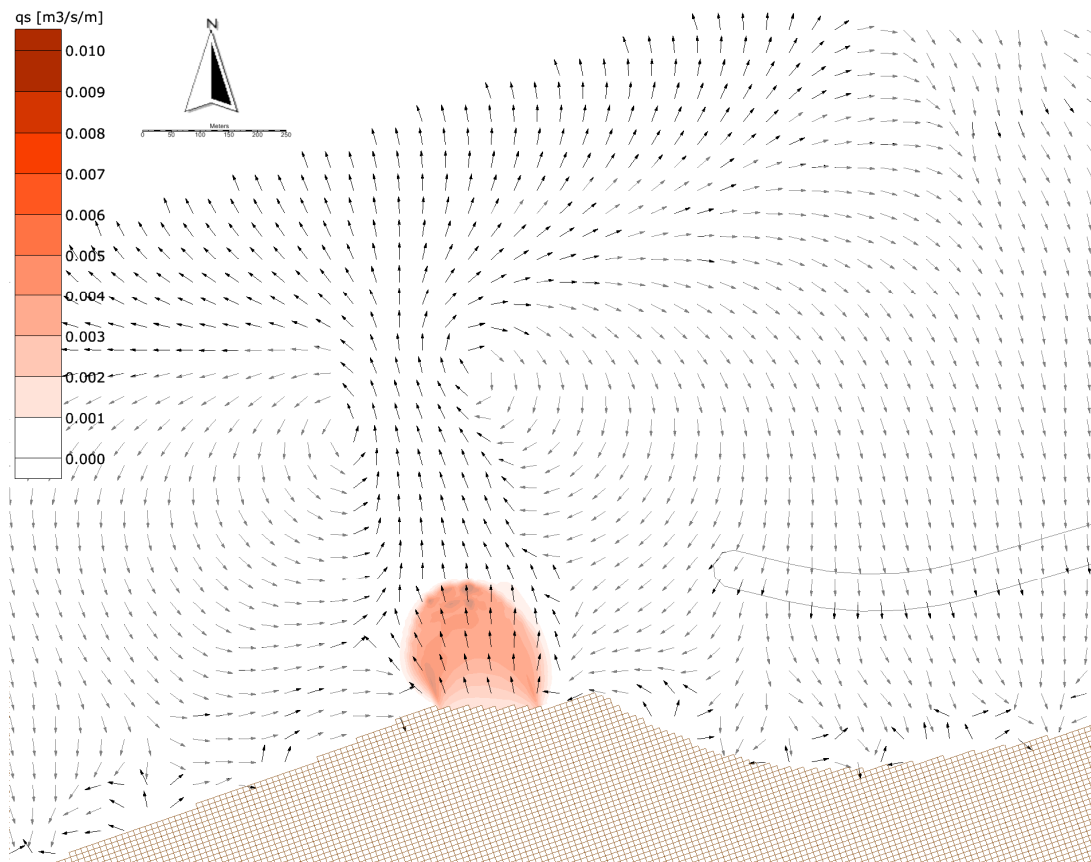


Figura B.15 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Niceto per tempo di ritorno pari a 50 anni

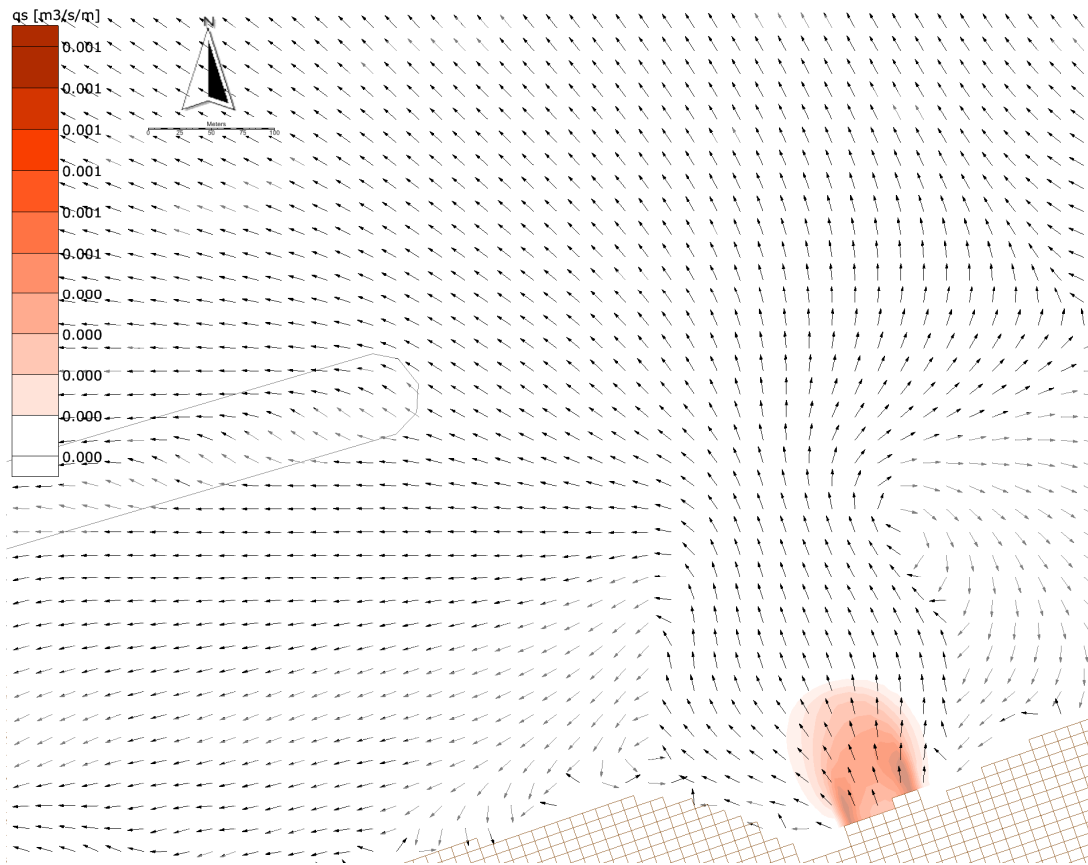


Figura B.16 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Caracciolo per tempo di ritorno paria a 50 anni

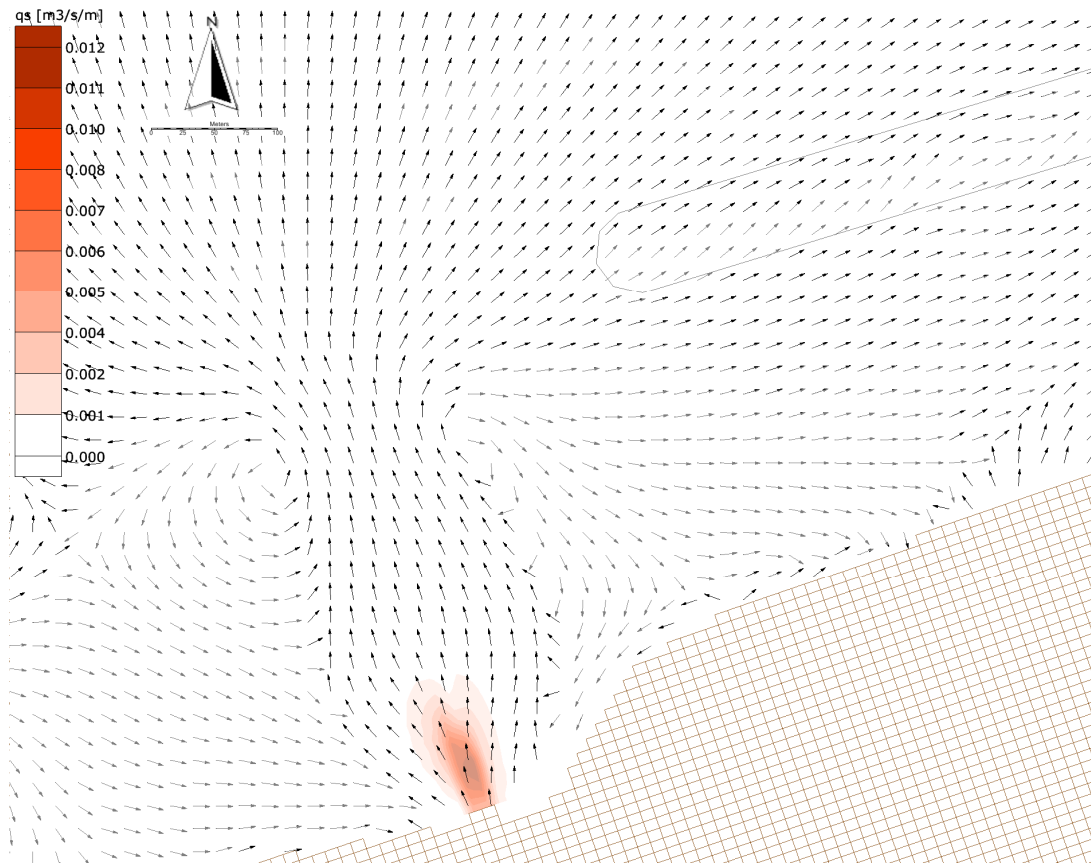


Figura B.17 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Senia per tempo di ritorno paria a 50 anni

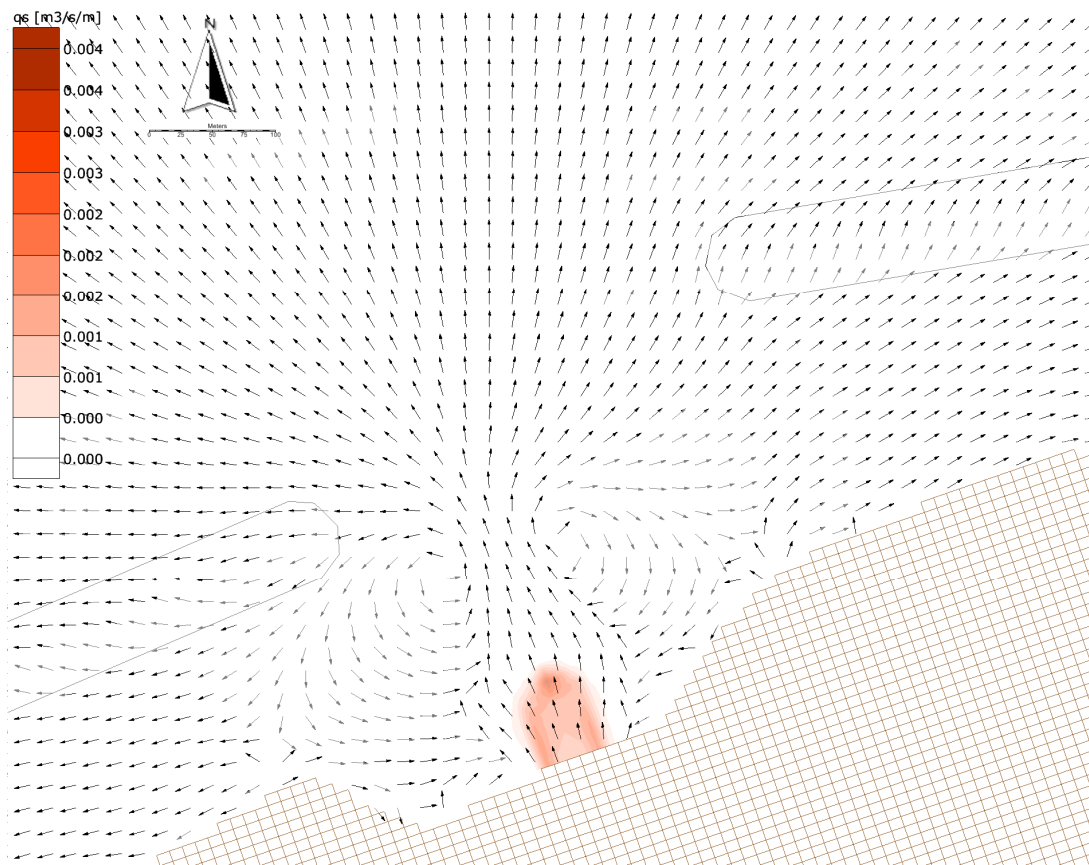


Figura B.18 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Cocuzzaro per tempo di ritorno paria a 50 anni

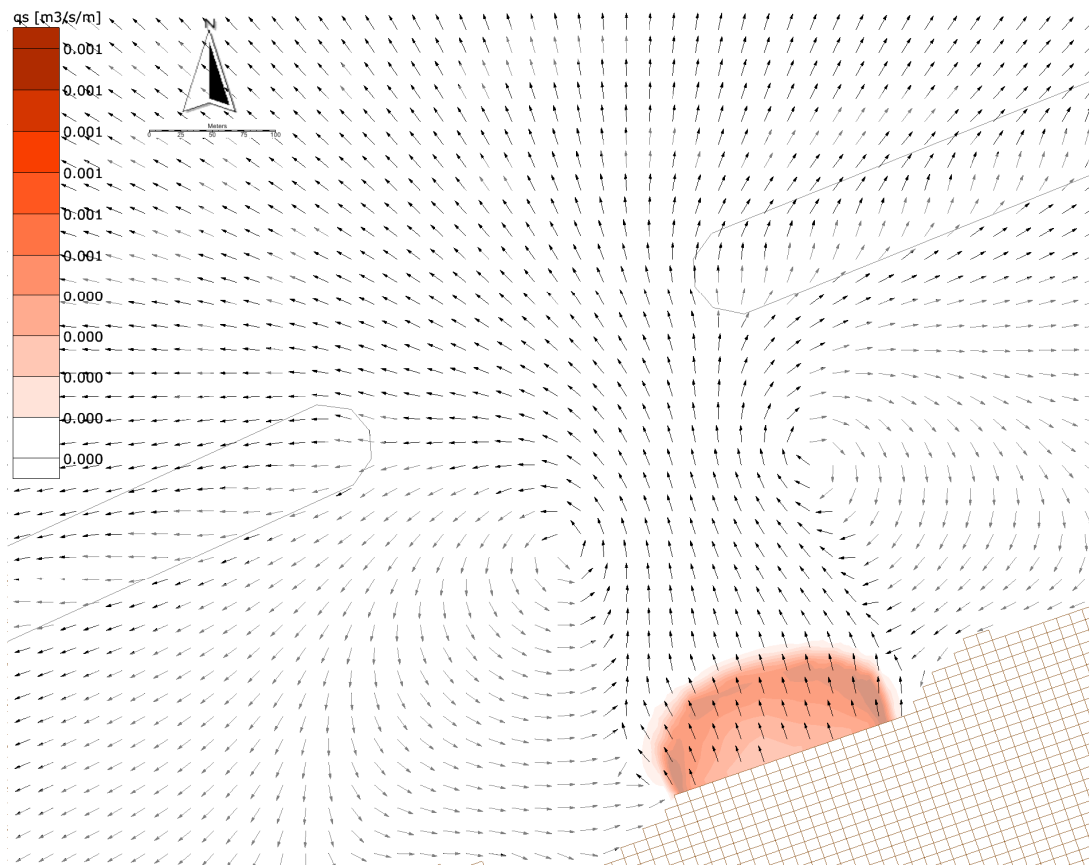


Figura B.19 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Pietra per tempo di ritorno paria a 50 anni

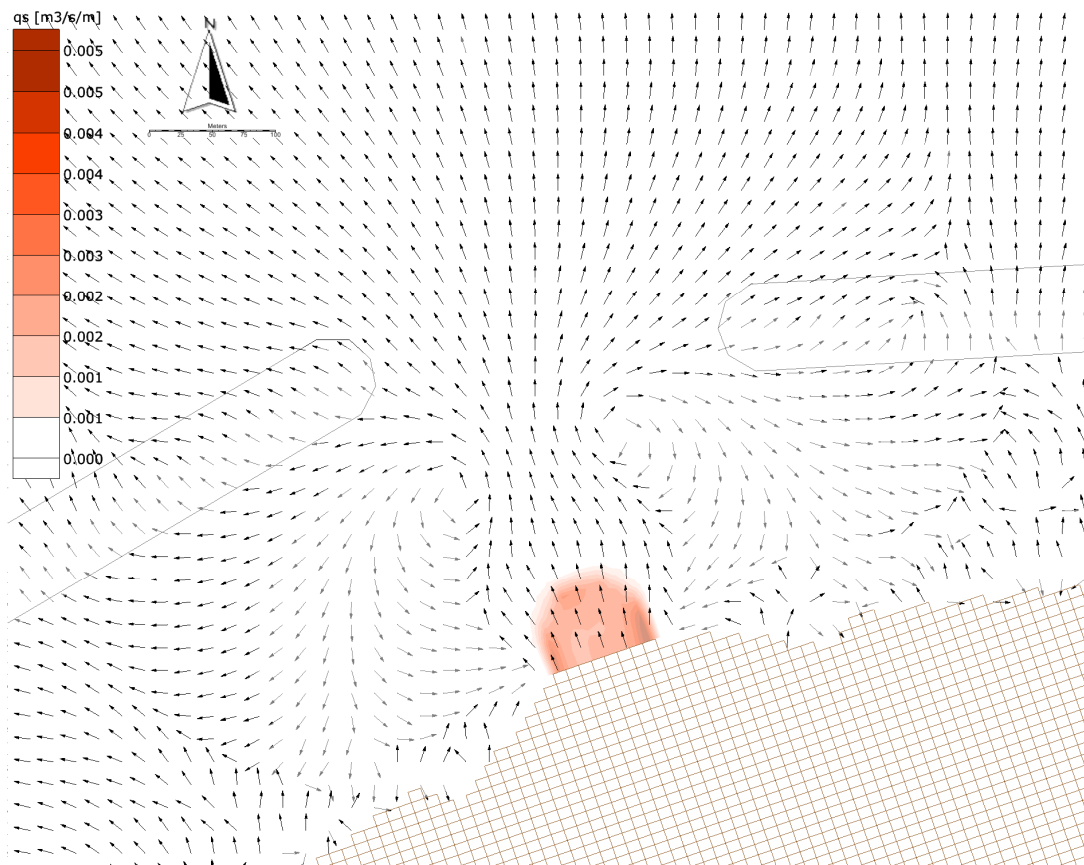


Figura B.20 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Saponara per tempo di ritorno paria a 50 anni

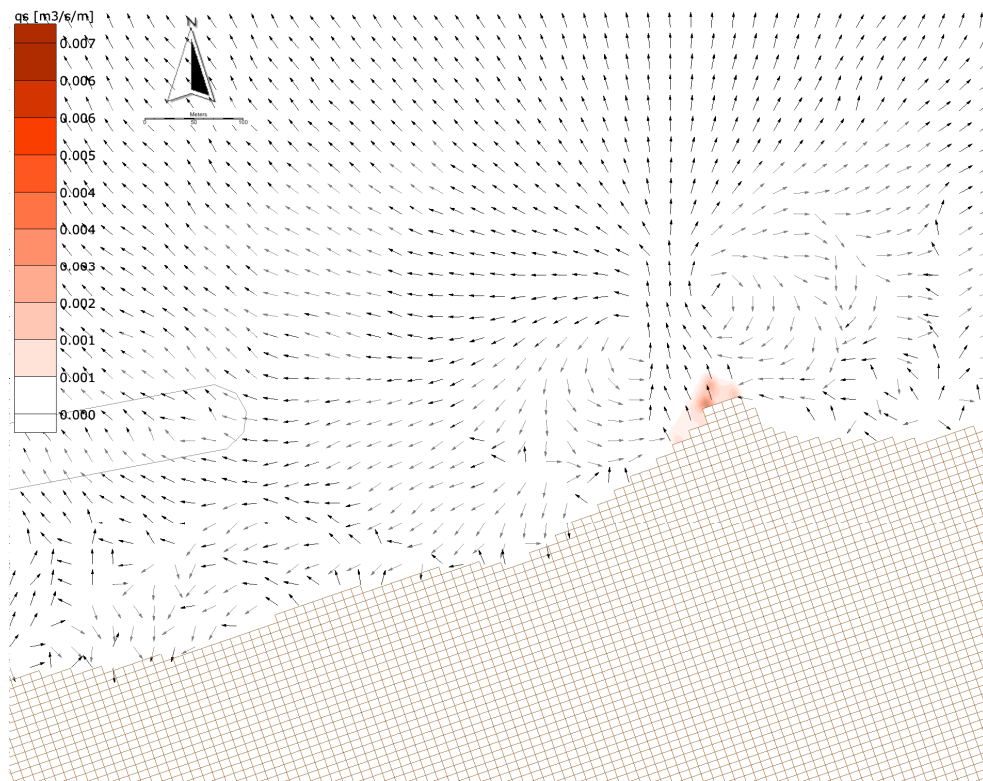


Figura B.21 Distribuzione della portata solida in corrispondenza della foce del Torrente Calvaruso per tempo di ritorno pari a 50 anni