ProgeTec s.n.c.

P.I./C.F.: **01252880115**
REA C.C.I.A.A.: **SP-113302**

COMUNE DI SESTA GODANO
PROVINCIA DELLA SPEZIA

OGGETTO: Intervento di messa in sicurezza del Torrente Gottero nel tratto in corrispondenza del centro abitato di Sesta Godano in località Fulli e consolidamento della viabilità comunale del versante in località Boera

Progetto Definitivo-Esecutivo

COMMITTENTE: Comune di Sesta Godano

ELABORATO: **RELAZIONE SPECIALISTICA IDRAULICA (art. 24 c. 2 e 33 lett. b) del D.P.R. 207/2010)**

Data emissione
15-12-2015

Consulenza idraulica
Ing. David Settesoldi

Sede/Uffici: **Via Fontevivo n°19/F**
19125 La Spezia - Italia

Telefono: **0187/510634**
Fax: **0187/284048**

INDICE

1 PREMESSA 4
2 IL QUADRO CONOSCITIVO 7
2.1 ACQUISIZIONE DEI DATI TERRITORIALI 7
2.2 RILIEVO TOPOGRAFICO 7
3 SCHEMATIZZAZIONE DELLôAREA 9
3.1 IL MODELLO DIGITALE DELLE AREE INONDABILI 9
4 LôANALISI IDROLOGICA 1
4.1 CALCOLO DEGLI IDROGRAMMI DI PIENA 1
5 IL MODELLO IDRAULICO 5
5.1 IL MODELLO IN MOTO VARIO 5
5.2 IL MODELLO DI INONDAZIONE QUASI - BIDIMENSIONALE 7
5.3 IL MODELLO DI INONDAZIONE BIDIMENSIONALE 9
5.4 IL MODELLO A FONDO MOBILE 15
5.4.1 Il modello di Ackers-White 16
5.5 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO IDRAULICO 18
6 ANALISI IDRAULICA DELLO STATO ATTUALE 20
6.1 ANALISI DEI RISULTATI 20
7 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO 1
8 ANALISI IDRAULICA DELLO STATO DI PROGETTO 1
8.1 ANALISI DEI RISULTATI 1

ELENCO FIGURE

Figura 1-1 - Pericolosità idraulica ai sensi del PAI 4
Figura 2-1 - Planimetria sezioni oggetto del rilievo 8
Figura 3-1 ï Reticolo oggetto di studio. 1
Figura 4-1 ï Immissioni di portata 2
Figura 4-2 ï Idrogrammi di portata Tr 30 3
Figura 4-3 ï Idrogrammi di portata Tr 100 3
Figura 4-4 ï Idrogrammi di portata Tr 200 4
Figura 4-5 ï Idrogrammi di portata tr 500 4
Figura 5-1 ï Griglia di calcolo equazione di continuità 10
Figura 5-2 ï Griglia di calcolo equazione di moto lungo X 12
Figura 5-3 ï Griglia di calcolo equazione di moto lungo Y 13
Figura 5-4 ï Curva granulometrica del torrente Gottero 18
Figura 5-5 - Scala di deflusso nella sezione di valle 19
Figura 6-1 - Battenti e velocità Tr 30 attuale 1
Figura 6-2 - Battenti e velocità Tr 100 attuale 2
Figura 6-3 - Battenti e velocità Tr 200 attuale 3
Figura 6-4 - Battenti e velocità Tr 500 attuale 4
Figura 6-5 - Aree inondabili attuale 5
Figura 6-6 - Pericolosità attuale 6
Figura 7-1 - Modello idraulico stato di progetto 1
Figura 8-1 - Battenti Tr 30 progetto 1
Figura 8-2 - Battenti Tr 100 progetto 2
Figura 8-3 - Battenti Tr 200 progetto 3
Figura 8-4 - Battenti Tr 500 progetto 4
Figura 8-4 - Aree inondabili progetto 5
Figura 8-4 - Pericolosità progetto 6

ELENCO TABELLE

Tabella 4-1 ï Portate al colmo 1
Tabella 4-2 ï Fattori moltiplicativi di omogeneizzazione alle curve inviluppo 1
Tabella 8-1 - Verifica aggravio a valle 1

Tabella 8-2 - Verifica del franco di sicurezza 2

1 PREMESSA

L'intervento riguarda il tratto del torrente Gottero che va dal ponte per Casa Boera alla località Fulli. Nel suddetto tratto il PAI della Autorità di Bacino del fiume Magra riporta un'area di approfondimento con pericolosità idraulica molto elevata ed elevata (Figura 1-1).

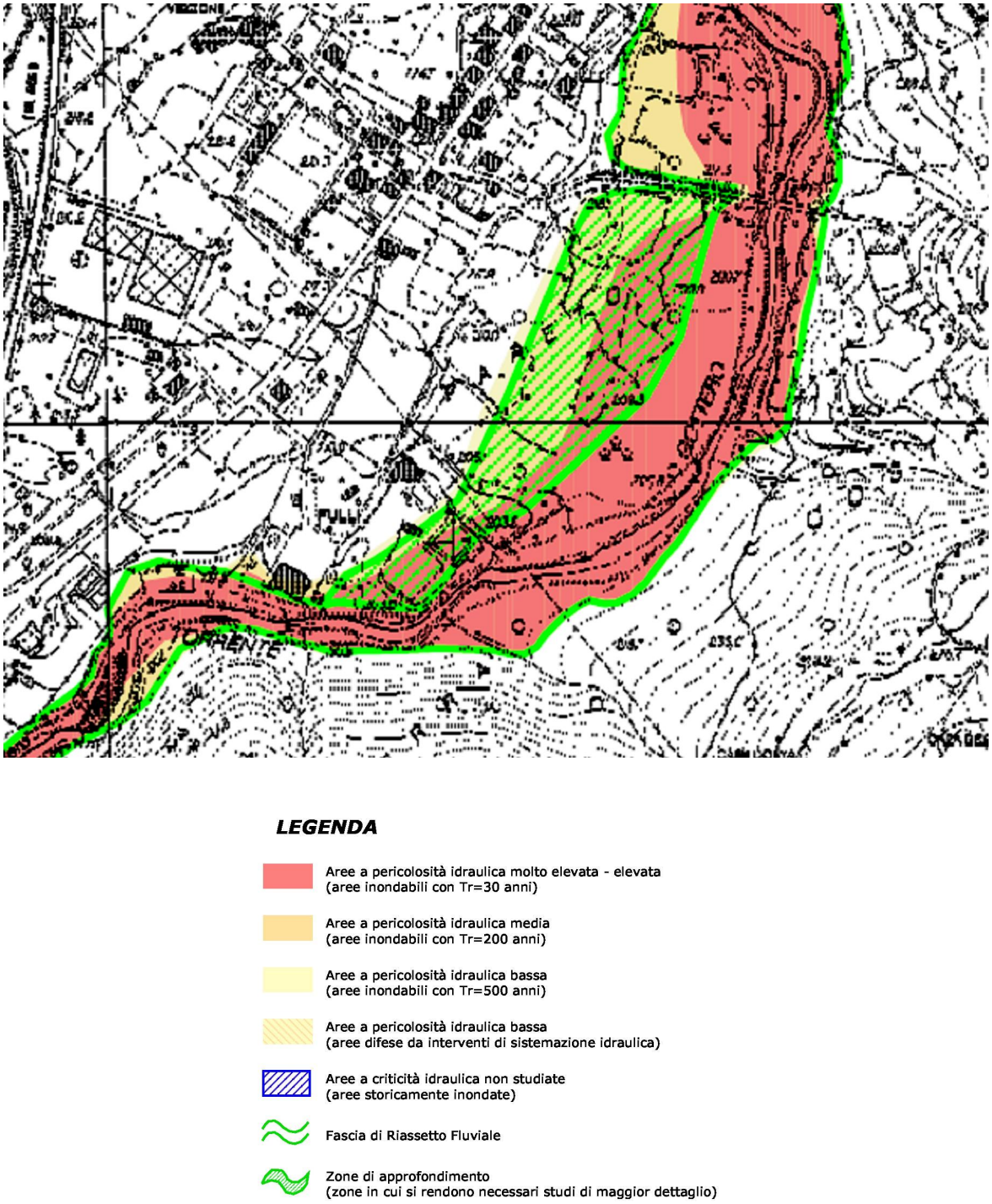


Figura 1-1 - Pericolosità idraulica ai sensi del PAI

L'intervento è configurabile come un intervento di mitigazione dei rischio.

L'art. 34 delle Norme di Attuazione del Piano di Assetto Idrogeologico recita:

ART. 34. Obiettivi e criteri per la definizione degli interventi di mitigazione del rischio
1. Gli interventi di mitigazione del rischio devono tendere alla messa in sicurezza idraulica, ovvero al conseguimento dello smaltimento della portata di piena con T=200 anni con adeguato franco.
2. La realizzazione degli interventi può avvenire per lotti funzionali, ovvero per stralci successivi di interventi complessivi di sistemazione, che garantiscano la diminuzione della pericolosità ai livelli stabiliti (messa in sicurezza o mitigazione) di porzioni significative delle aree interessate dal progetto complessivo.
3. Gli interventi volti alla diminuzione delle condizioni di pericolosità delle aree inondabili, che tuttavia non si configurano come interventi definitivi di messa in sicurezza, in quanto comportano la permanenza di pericolosità residua rispetto agli obiettivi di messa in sicurezza, costituiscono interventi di mitigazione della pericolosità, qualora consentano la corrispondente parziale riperimetrazione delle aree pericolose.
4. La progettazione degli interventi di sistemazione idraulica deve essere tale da traguardare, contestualmente alla mitigazione del rischio, anche la riqualificazione ambientale e la rinaturalizzazione dei corsi dâacqua.
5. Gli interventi di mitigazione del rischio idraulico devono rispondere ai seguenti criteri:
a) salvaguardare la visione integrata di bacino e garantire la coerenza degli interventi alla scala di bacino;
b) valutare lâeffettiva necessità della sistemazione idraulica, attraverso lâanalisi degli elementi a rischio (persone e beni) e delle cause che generano la situazione di pericolo;
c) indicare in quale misura lâintervento sia direttamente finalizzato allâeliminazione della cause, motivando esplicitamente lâeventuale proposta di interventi volti solo alla temporanea rimozione degli effetti;
d) effettuare considerazioni e stime sul rapporto costo dellâintervento - benefici attesi in termini economici, ambientali, paesistici e sociali,analizzando anche le possibili ripercussioni idrauliche e naturalistiche sia locali che sullâevoluzione dei tratti a monte e a valle;
e) prevedere e precisare gli accorgimenti adottati per il miglioramento degli habitat acquatico, spondale e terrestre, ovvero le motivazioni che ne impediscano lâadozione.
6. In ogni caso, qualsiasi intervento non deve pregiudicare la sistemazione definitiva del corso dâacqua, né aumentare significativamente la pericolosità di inondazione ed il rischio connesso, sia localmente, sia a monte che a valle.

Inoltre l'art.37 del Piano di Assetto Idrogeologico riporta:

ART. 37. Modalità di approvazione degli interventi
1. I progetti relativi ad interventi di sistemazione idraulica devono acquisire il parere obbligatorio e vincolante del Comitato Tecnico dellâAutorità di Bacino nei seguenti casi:
a) interventi previsti allâart. 41 e/o contenuti negli atti di programmazione approvati dal Comitato Istituzionale dellâAutorità di Bacino;
b) interventi che riguardino:
1. sistemazioni che interessino un tratto di corsi dâacqua della lunghezza superiore a m 100 e/o altezza massima superiore a m 3;
2. costruzione di briglie di altezza massima superiore a m 1 o larghezza maggiore di m 20;

3. gli interventi di cui allâart. 8, comma 4, lettera b).
.....

La presente relazione è pertanto finalizzata al dimensionamento idraulico degli interventi previsti per un tempo di ritorno di 200 anni.

A tale scopo è stato implementato un modello che comprende il torrente Gottero per tutto il tratto oggetto di studio nel Piano di Assetto Idrogeologico e una parte del fiume Vara nell'intorno della confluenza.

Le verifiche sono state condotte per i tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni con modellazione in moto vario dell'alveo e bidimensionale delle aree inondabili sia nella configurazione attuale che in quella di progetto.

Inoltre per il tratto ove è previsto l'intervento è stata condotta per gli stessi tempi di ritorno una verifica a fondo mobile nella configurazione di progetto.

La verifica è stata condotta sulla base di:

- un rilievo topografico dell'alveo relativo al sedime fluviale relativo a 56 sezioni;
- le sezioni del rilievo condotto per il PAI (sezioni 1992 e sezioni 2000)
- sezioni idrauliche ricavate dai rilievi Lidar del 2008.

Le attività previste per la redazione dello studio sono le seguenti:

- analisi idrologica;
- analisi idraulica allo stato attuale;
- definizione degli interventi;
- analisi idraulica allo stato di progetto.

2 IL QUADRO CONOSCITIVO

2.1 Acquisizione dei dati territoriali

Le basi cartografiche utilizzate sono costituite dalla Cartografia Tecnica Regionale in scala 1:10.000.

E' stato inoltre acquisito il rilievo Lidar 2008.

2.2 Rilievo topografico

Il rilievo è relativo a 56 sezioni comprese tra la sezione GT3037__ e la sezione GT3098__.

La planimetria delle sezioni oggetto del rilievo è riportata nella Figura 2-1.

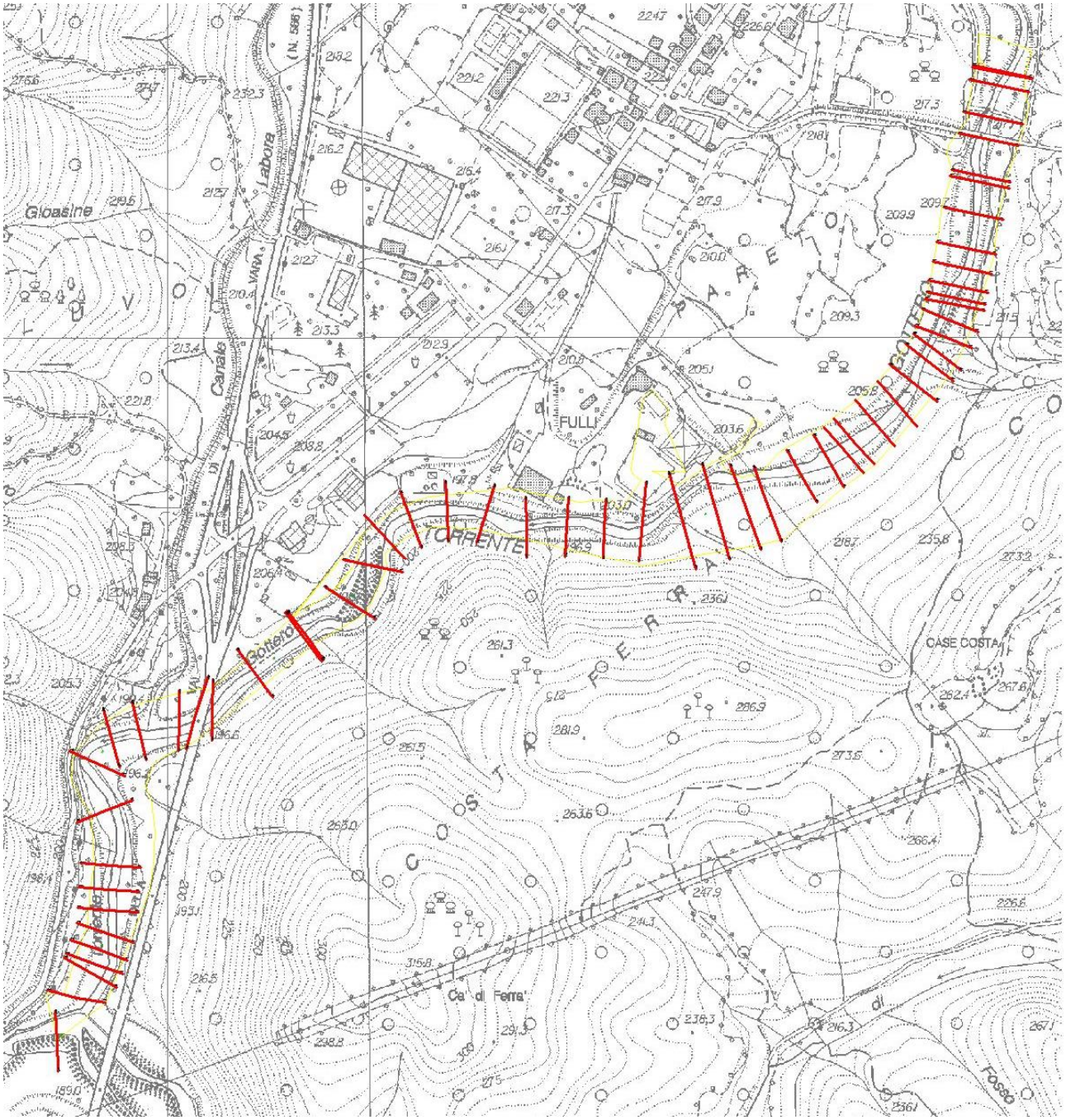


Figura 2-1 - Planimetria sezioni oggetto del rilievo

3 SCHEMATIZZAZIONE DELLôAREA

Il sistema idraulico è stato schematizzato da:

- 2 tronco;
- 7 immissioni di portata;
- 1 area di esondazione bidimensionale;
- 471 sfioratori.

Nella Figura 3-1 si riporta lo schema della rete oggetto di studio.

Le sezioni utilizzate per la modellazione idraulica sono complessivamente in numero pari a 98 sul torrente Gottero e 23 sul fiume Vara.

Le sezioni sono state estese e interpolate utilizzando il modello digitale del terreno Lidar. In particolare le sezioni di rilievo sono state utilizzate per ricostruire il profilo dell'alveo mentre quelle ricavate dal Lidar per le aree limitrofe.

La geometria viene considerata ñfissa nel tempoò, prescindendo quindi da evoluzioni del letto sul breve e lungo periodo e ignorando di conseguenza i fenomeni di erosione e deposito di tipo generalizzato e localizzato.

3.1 Il modello digitale delle aree inondabili

Il modello digitale del terreno 10mx10m è stato ricavato dal rilievo Lidar del 2008.

Il modello digitale del terreno è collegato alle sezioni fluviali attraverso una serie di soglie sfioranti la cui quota è ricavata dalle sezioni fluviali e di lunghezza pari a 10m.

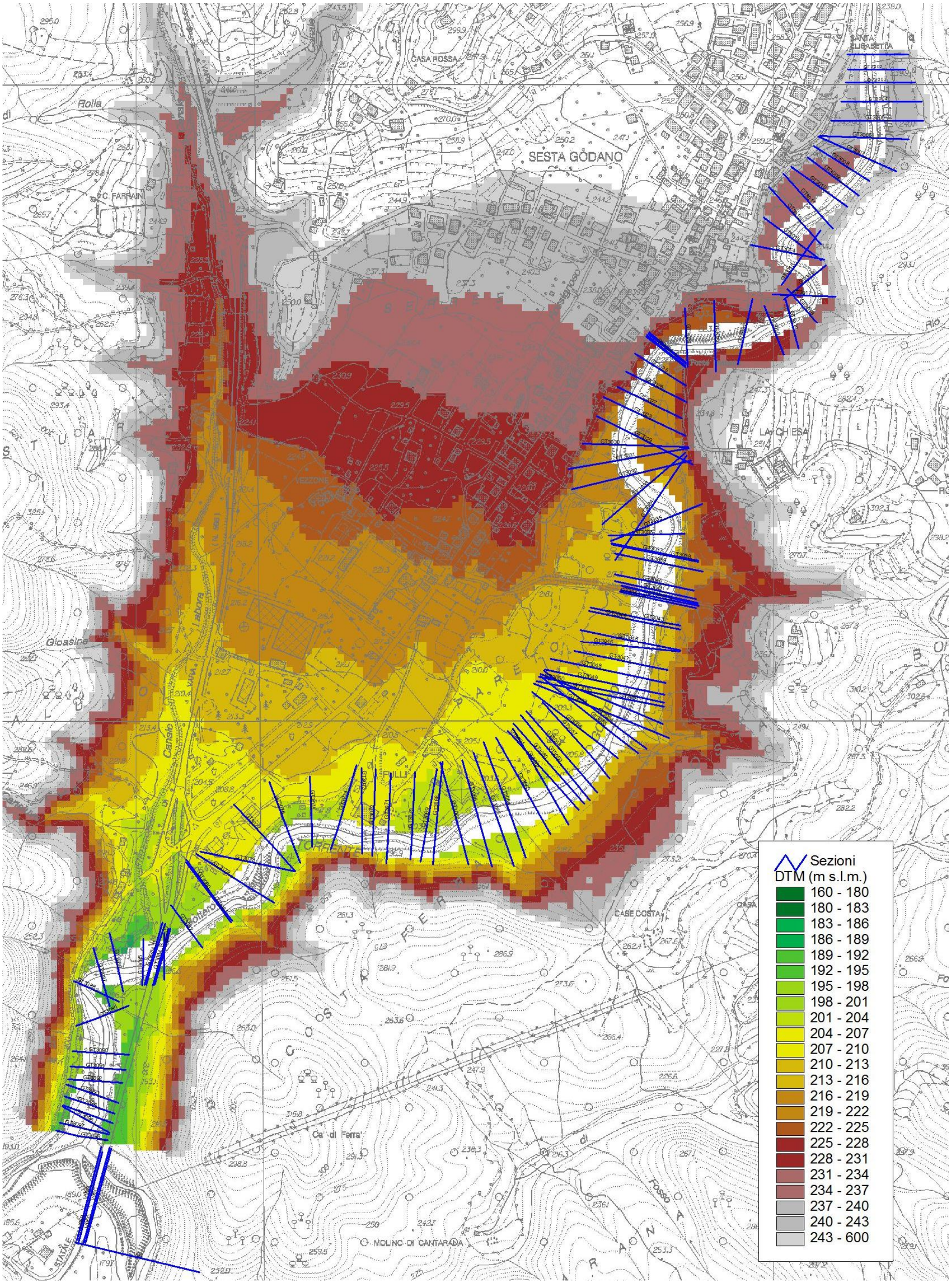


Figura 3-1 ï Reticolo oggetto di studio.

4 LôANALISI IDROLOGICA

Lôanalisi idrologica ha preso a riferimento i risultati delle analisi condotte nellôambito degli studi per la redazione del Piano di Assetto Idrogeologico.

Lôanalisi idrologica è finalizzata alla determinazione degli idrogrammi di piena per i tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni. Nella Figura 4-1 sono riportati i punti di immissione nel tratto di verifica.

4.1 Calcolo degli idrogrammi di piena

La valutazione delle portate di piena al colmo è stata condotta applicando le curve di inviluppo adottate con il Piano di Assetto Idrogeologico. Gli idrogrammi di piena sono stati calcoli con il modello a parametri distribuiti PIENE in uso presso l'Autorità di Bacino del fiume Magra.

Le curve di inviluppo per il bacino del fiume Vara sono le seguenti:

- TR30 A < 15 kmq $Q = 16 A^{0.85}$ [m³/s] A > 15 kmq $Q = 24 A^{0.7}$ [m³/s]
- TR100 A < 36 kmq $Q = 21 A^{0.85}$ [m³/s] A > 36 kmq $Q = 33 A^{0.7}$ [m³/s]
- TR200 A < 23 kmq $Q = 25 A^{0.85}$ [m³/s] A > 23 kmq $Q = 40 A^{0.7}$ [m³/s]
- TR500 A < 43 kmq $Q = 29 A^{0.85}$ [m³/s] A > 43 kmq $Q = 51 A^{0.7}$ [m³/s]

dove A è lôarea del bacino idrografico del corso dôacqua valutato alla sezione di chiusura posta in corrispondenza della confluenza.

Nella Tabella 4-1 si riportano le aree e i contributi al colmo.

Immisione	IMI01	IMI02	IMI03	IMI04	IMI05	IMI06	IMI07
Sezione	GT3001__	GT3018__	GT3068__	GT3086__	V98	IMI06	V93
Area	33.1	34.6	35.2	38.1	205.3	243.4	247.5
30	278.2	286.6	290.3	306.7	997.5	1123.7	1136.8
100	382.5	394.0	399.1	421.7	1371.6	1545.0	1563.1
200	463.7	477.6	483.8	511.1	1662.5	1872.8	1894.6
500	591.2	609.0	616.8	651.7	2119.7	2387.8	2415.6

Tabella 4-1 ï Portate al colmo

In Figura 4-2, Figura 4-3, Figura 4-4, Figura 4-5 sono riportati gli idrogrammi di portata ricavati. Per rendere omogenee le portate calcolate con il modello PIENE con le curve inviluppo le stesse sono state moltiplicate per i coefficienti di Tabella 4-2.

Tr	Gottero	Vara
30	0.976	0.770
100	1.022	0.785
200	1.062	0.782
500	1.126	0.791

Tabella 4-2 ï Fattori moltiplicativi di omogeneizzazione alle curve inviluppo

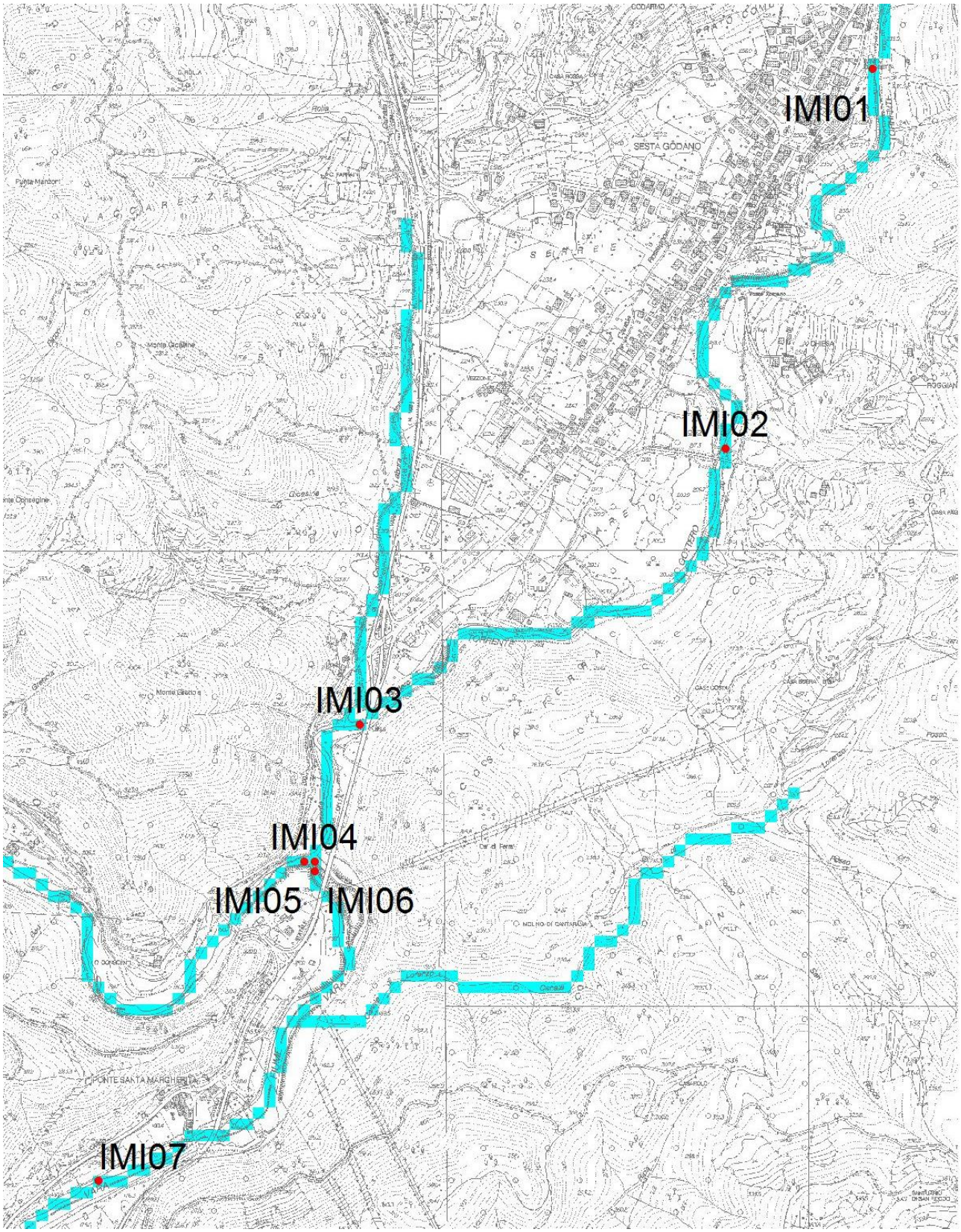


Figura 4-1 ï Immissioni di portata

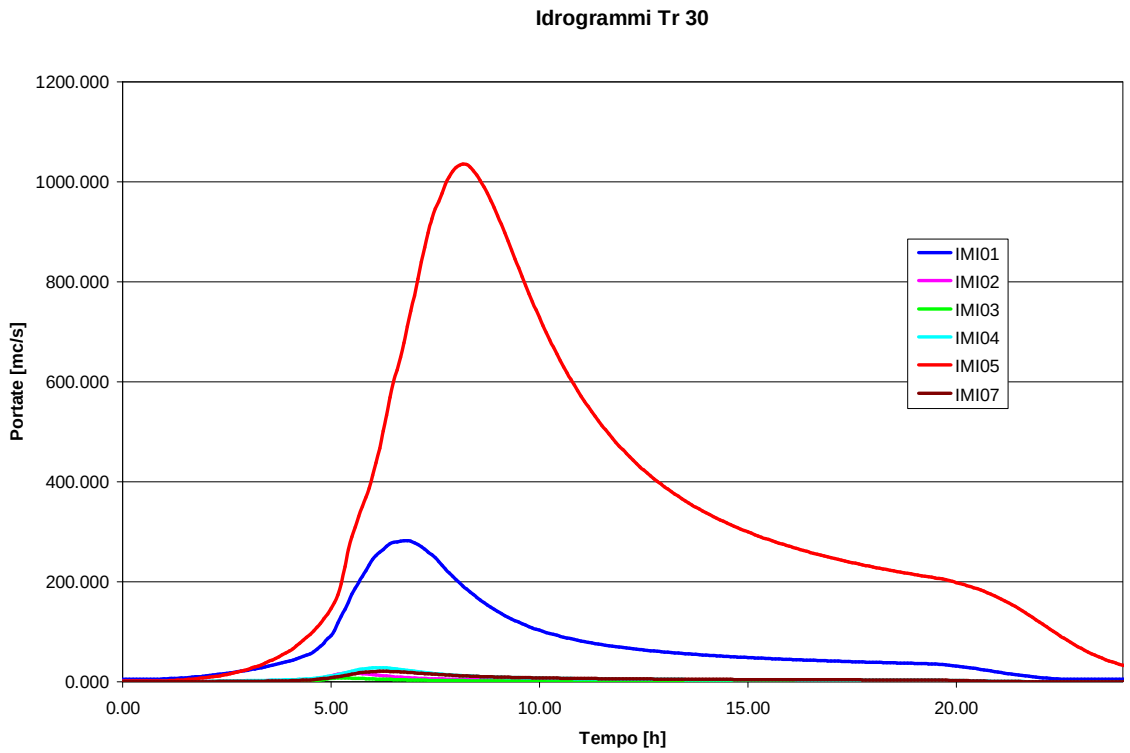


Figura 4-2 – Idrogrammi di portata Tr 30

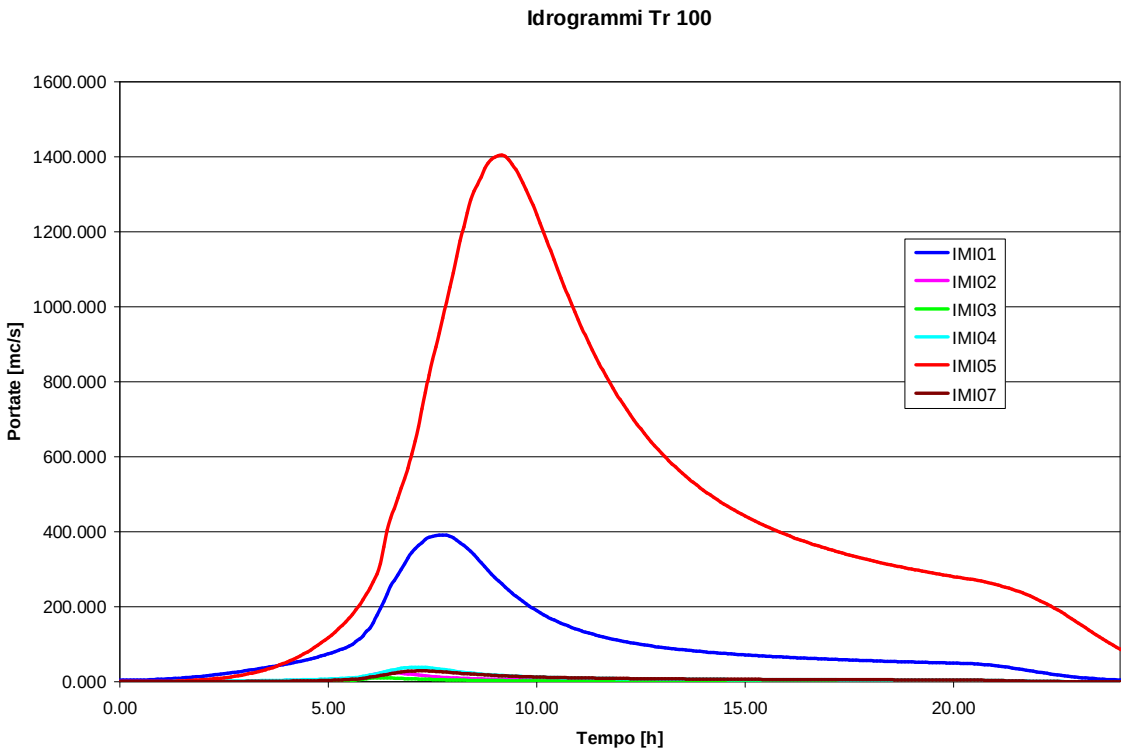


Figura 4-3 – Idrogrammi di portata Tr 100

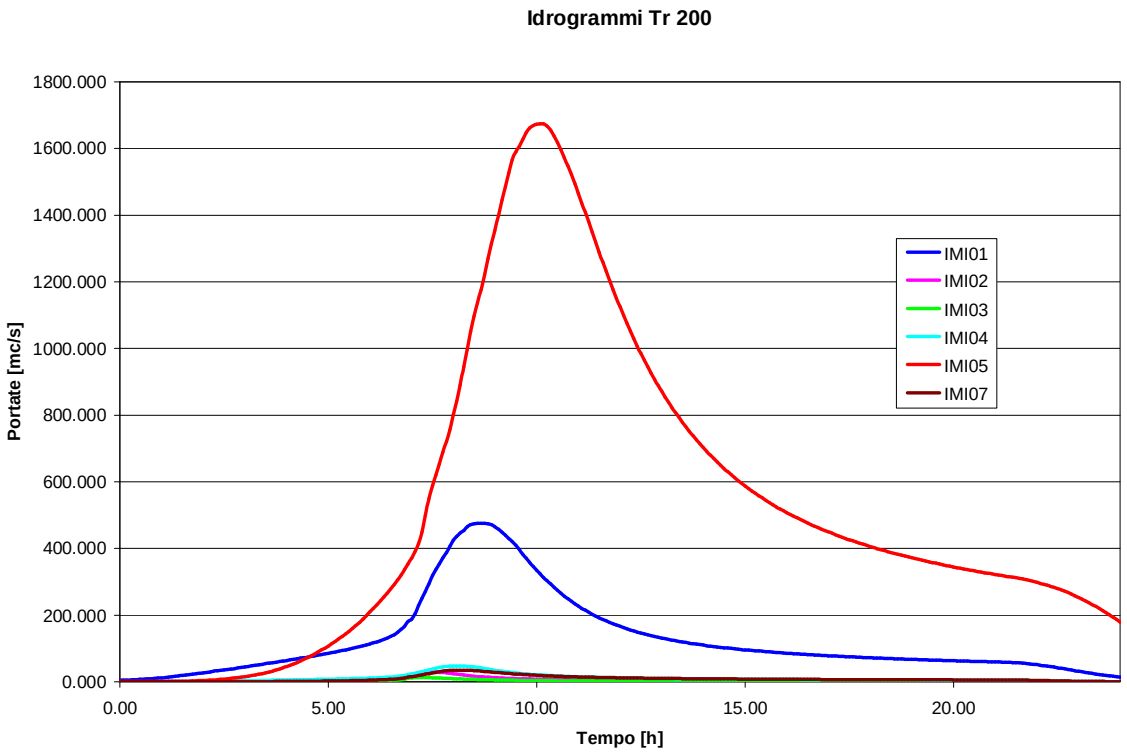


Figura 4-4 ï Idrogrammi di portata Tr 200

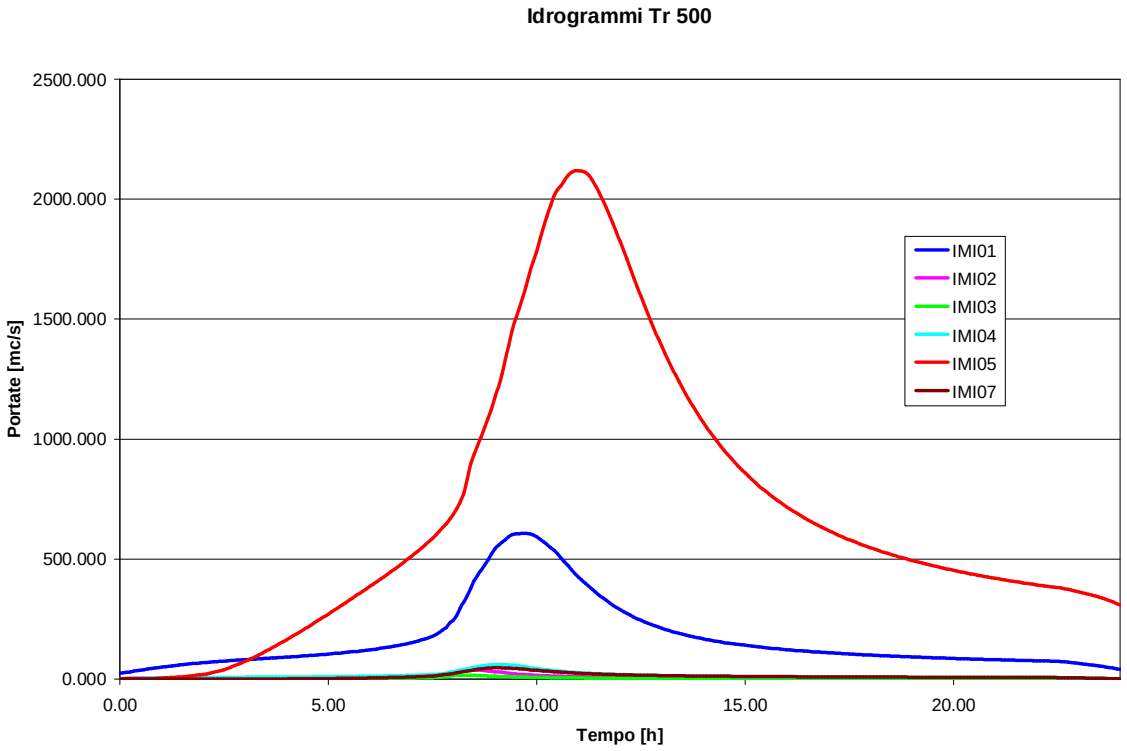


Figura 4-5 ï Idrogrammi di portata tr 500

5 IL MODELLO IDRAULICO

Il modello idraulico adottato si basa sulle classiche equazioni del moto e di continuità per una corrente unidimensionale, associate a una opportuna equazione per la stima delle dissipazioni energetiche sia a carattere concentrato sia di tipo distribuito. Le equazioni, nella loro formulazione generale di De Saint Venant, esprimono le caratteristiche idrauliche (portata, carico piezometrico, altezza d'acqua, velocità) in funzione del tempo e dello spazio.

In generale, la risoluzione dello schema di moto vario viene ottenuta per via numerica, discretizzando le equazioni nel dominio spazio-temporale mediante opportuni schemi numerici. La soluzione viene pertanto ottenuta solo nei punti di discretizzazione (e non con continuità su tutto il dominio). Tali punti sono rappresentati dalla sezioni geometriche rilevate (*discretizzazione spaziale*) e dalla scansione temporale utilizzata nella rappresentazione dei fenomeni (*discretizzazione temporale*).

Il grado di risoluzione che si ottiene deriva quindi dalla densità delle sezioni rilevate e, per lo schema di moto vario, anche dal passo temporale adottato. Nel presente caso il passo temporale adottato è stato di 60 secondi con restituzione dei dati ogni 5 minuti.

Gli elementi che compongono il modello idraulico sono riportati nella Figura 3-1.

5.1 Il modello in moto vario

In particolare, le equazioni di moto vario sono state applicate per lo studio della propagazione delle onde di piena, ovvero per la stima delle condizioni idrometriche dei presenti corsi dâacqua interessati da onde di piena.
Il modello di moto vario si basa sulle equazioni di continuità e di moto per una corrente liquida incomprimibile e unidirezionale in condizioni non stazionarie; tali equazioni risultano, rispettivamente:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t} - J \qquad [5.1]$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + q(x) = 0 \qquad [5.2]$$

in cui:

- A = area della sezione liquida [m²];
- Q = portata [m³/s];
- $q(x)$ = portata laterale (positiva se entrante) [m²/s];
- H = carico totale della corrente [m];
- g = accelerazione di gravità [m/s²];
- U = velocità media della corrente [m/s];
- J = perdite di carico effettivo per unità di lunghezza;
- x = ascissa corrente lungo l'alveo [m];
- t = tempo [s].

La perdita di carico effettivo può essere stimata con un'equazione analoga a quella adottata per il moto uniforme:

$$J = \frac{U|U|}{gC^2R} \qquad [5.3]$$

ove, oltre ai simboli già noti, R è il raggio idraulico e C il coefficiente di resistenza esprimibile nella forma:

$$C = \frac{K_s R^{1/6}}{\sqrt{g}} \qquad [5.4]$$

ove K_s [$m^{1/3}s^{-1}$] è il coefficiente dimensionale di Gauckler-Strickler,

Per includere nel modello gli effetti dissipativi indotti da variazioni di sezione, quali allargamenti o restringimenti, si sono valutate le perdite di carico effettivo addizionali, ΔH, mediante la formula:

$$\Delta H = \xi \Delta\left(\alpha \frac{Q^2}{2gA^2}\right) \qquad [5.5]$$

ove α è il coefficiente di ragguaglio della energia cinetica e ξ può assumere valori compresi tra 0.1 e 0.9 maggiori nel caso di allargamento della sezione e minori nel caso di restringimento.

La risoluzione delle equazioni sopra descritte viene svolta per via numerica, discretizzandole opportunamente alle differenze finite, e associandovi appropriate condizioni al contorno.

Le equazioni ridotte in forma numerica sono in generale risolte in forma implicita approssimando alle differenze finite le derivate e operando una media pesata per gli altri termini. In particolare sono utilizzate le seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned} A &= p_s p_t A_i^k + p_s(1-p_t)A_i^{k+1} + (1-p_s)p_t A_{i+1}^k + (1-p_s)(1-p_t)A_{i+1}^{k+1} \\ \frac{\partial A}{\partial s} &= p_t \frac{A_{i+1}^k - A_i^k}{\Delta s} + (1-p_t)\frac{A_{i+1}^{k+1} - A_i^{k+1}}{\Delta s} \\ \frac{\partial A}{\partial t} &= p_s \frac{A_i^{k+1} - A_i^k}{\Delta t} + (1-p_s)\frac{A_{i+1}^{k+1} - A_{i+1}^k}{\Delta s} \end{aligned} \qquad [5.6]$$

dove p_s e il peso della media spaziale e p_t il peso della media temporale (l'indice k è riferito al tempo e l'indice i allo spazio). I valori utilizzati in genere per p_s e p_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, in corrispondenza delle sezioni fluviali predefinite, al variare del tempo si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata.

Nell'ipotesi di corrente lenta, le condizioni al contorno da imporre al sistema prima definito possono consistere nella attribuzione di una scala di deflusso nella sezione di chiusura di valle, del tipo:

$$Q = a(h - h_0)^c + q_0 \qquad [5.7]$$

dove *a*, *b*, *c* e q_0 sono i parametri della scala di deflusso, mentre nella sezione di monte si assegna un idrogramma di portata.

Come condizione di valle può essere assunto, inoltre, un livello idrometrico o una portata variabili nel tempo. Eôinoltre possibile inserire una portella nella simulazione che impedisce il rigurgito verso monte annullando la portata.

La simulazione di eventuali fenomeni di esondazione è stata condotta associando al modello idraulico non stazionario appena descritto un modello quasi-bidimensionale o bidimensionale, definiti mediante la rappresentazione ña celle di accumuloò o distribuita delle aree inondabili adiacenti il corso dôacqua.

5.2 Il modello di inondazione quasi - bidimensionale

La modellazione *quasi-bidimensionale tipo Cunge*, integra il modello mono-dimensionale con quello a macro-aree interconnesse.

Nel modello tipo Cunge lôarea potenzialmente inondabile viene immaginata composta da aree elementari connesse idraulicamente tra loro e con lôasta fluviale da soglie sfioranti. La definizione delle aree elementari che compongono le aree di potenziale inondazione deve avvenire con criteri di massima verosimiglianza del modello alla realtà: pertanto ad ogni struttura di contenimento identificabile sul territorio (quali i rilevati stradali e ferroviari, muri e argini) deve corrispondere il bordo di una o più aree.

La delimitazione e la modellazione di tali aree, dette *aree di laminazione*, per le quali risulta prevalente il fenomeno di invaso rispetto a quello di trasporto, avviene secondo le seguenti fasi:

- *individuazione e acquisizione delle strutture di contenimento*
  le aree elementari di potenziale esondazione sono delimitate da elementi di contorno rappresentati da argini, rilevati stradali e ferroviari, contenimenti naturali. Lôindividuazione di tali elementi è stata condotta sulla base cartografica della C.T.R. 1:2000 acquisita in forma digitale vettoriale;
- *caratterizzazione morfologica delle aree di potenziale inondazione*
  in tale fase si è proceduto alla definizione delle caratteristiche plano-altimetriche delle aree elementari sulla base della cartografia con lôobiettivo di ricavare la legge di riempimento quota-volume di inondazione in funzione dei livelli di piena nella forma:

  $$V = A(y - y_0)^B \qquad [5.8]$$

  in cui y_0 è la quota minima del terreno allôinterno dellôarea.
- *definizione delle connessioni idrauliche*
  sulla base dellôanalisi dettagliata delle caratteristiche morfologiche, infrastrutturali ed idrauliche del territorio sono definite le caratteristiche delle connessioni idrauliche tra lôalveo principale e le aree di potenziale esondazione, e tra le aree stesse.

La simulazione del fenomeno esondativo si basa inoltre sulle seguenti ipotesi:

- i volumi idrici di inondazione si generano esclusivamente *per tracimazione* delle sommità arginali del corso dôacqua. Non sono considerati altri fenomeni quali, ad esempio, il collasso delle strutture arginali o fenomeni di rigurgito diversi da quelli già considerati nel presente studio. Anche gli elementi infrastrutturali, delimitanti le aree di potenziale inondazione (i.e. rilevati stradali, ferroviari, etc.), si considerano, al pari degli argini fluviali, tracimabili senza collasso;
- il fenomeno dellôallagamento di ciascuna area potenzialmente inondabile avviene seguendo la legge di riempimento quota-volume (5.8);
- il trasferimento dei volumi di esondazione, sia alveo/area sia area/area avviene con la legge degli stramazzi in parete grossa, con possibilità di funzionamento bidirezionale, in condizioni di deflusso libero oppure rigurgitato in funzione dei livelli a monte e a valle dello stramazzo. La legge di deflusso adottata è la seguente:

$$Q_{sf} = l(\mu_1 h_2 - \mu_2 h_1)\sqrt{2gh_1} \qquad [5.9]$$

dove *l* è la lunghezza della soglia, μ_1 e μ_2 sono pari rispettivamente a 0.65 e 0.4, h_1 e h_2 sono rispettivamente i livelli del pelo libero a monte e a valle, riferiti alla quota della soglia. Mentre la quota di sfioro delle connessioni alveo/area o area/area è in generale ben definibile come la quota inferiore dellôelemento di contenimento che separa le aree stesse, invece la lunghezza del fronte di sfioro ha un valore dipendente in linea di massima dalla densità spaziale delle sezioni fluviali o dalla lunghezza dei lati delle aree.

Il fenomeno dellôallagamento di ciascuna area avviene in modo sincrono, cioè non viene messo in conto il tempo effettivo connesso alla reale propagazione sul terreno dei volumi esondati.

La propagazione dei livelli idrici nelle celle avviene pertanto attraverso la sola legge di continuità dei volumi. A tale scopo è necessario considerare il volume accumulato nella singola cella e le sue variazioni dovute agli scambi di portata con le celle circostanti.

Ad ogni passo temporale lôequazione di continuità impone il bilancio tra i volumi netti transitati attraverso la cella e la variazione di volume locale, sotto le ipotesi che il volume accumulato in ciascuna cella sia univocamente correlato allôaltezza idrica nella cella stessa, e che le portate scambiate siano funzione dei livelli a monte e a valle delle connessioni idrauliche.

In particolare, lôequazione di continuità per la generica area *k*-esima risulta la seguente:

$$A_{ck}\frac{\partial h_k}{\partial t} = \sum_i Q_{ki}\left(h_k, h_i\right) \qquad [5.10]$$

ove A_{ck} rappresenta la superficie allagata nellôarea *k*-esima, h_k è lôaltezza dôacqua relativa, Q_{ki} è la portata scambiata con lôarea *i*-esima adiacente in funzione delle relative altezze idriche e la sommatoria è estesa a tutte le aree in comunicazione diretta con lôarea *k*-esima.

Nel presente caso la modellazione quasi-bidimensionale è stata adottata per la sola area di potenziale esondazione posta a valle dellôarea di studio.

5.3 Il modello di inondazione bidimensionale

Le aree di potenziale esondazione possono essere modellate anche come oggetto bidimensionale a patto di fornire un modello digitale del terreno rappresentativo della loro altimetria.

La risoluzione dello schema di inondazione bidimensionale è ottenuta mediante la risoluzione di un sistema alle derivate parziali, di tipo iperbolico, non lineare, costituito dalle equazioni complete di De Saint Venant scritte in forma bidimensionale.

Le equazioni di continuità e del moto nelle due direzioni possono essere scritte come segue:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial x}+\frac{\partial N}{\partial y}=0 \qquad [5.8]$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial (uM)}{\partial x}+\frac{\partial (vM)}{\partial y}+gh\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\tau_x=0 \qquad [5.9]$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{\partial (uN)}{\partial x}+\frac{\partial (vN)}{\partial y}+gh\frac{\partial H}{\partial y}+\frac{1}{\rho}\tau_y=0 \qquad [5.10]$$

in cui:

x = coordinata longitudinale;
y = coordinata trasversale;
t = coordinata temporale;
h = altezza dâacqua;
u = componente di velocità nella direzione x;
v = componente di velocità nella direzione y;
M = uh = flusso della corrente in direzione x;
N = uh = flusso della corrente in direzione y;
h = altezza dâacqua;
H = quota della superficie libera;
J = densità dellâacqua;
τ_x = sforzo tangenziale al fondo nella direzione x;
τ_y = sforzo tangenziale al fondo nella direzione y.

In particolare, gli sforzi tangenziali lungo x e y sono stati valutati nel modo seguente:

$$\tau_x=\frac{\rho g n^2 u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \qquad [5.11a]$$

$$\tau_y=\frac{\rho g n^2 v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{1/3}} \qquad [5.11b]$$

avendo indicato con *n* il coefficiente di scabrezza di Manning.

La risoluzione delle equazioni sopra scritte viene svolta numericamente mediante uno schema alle differenze finite di tipo implicito accoppiato ad appropriate condizioni al contorno.

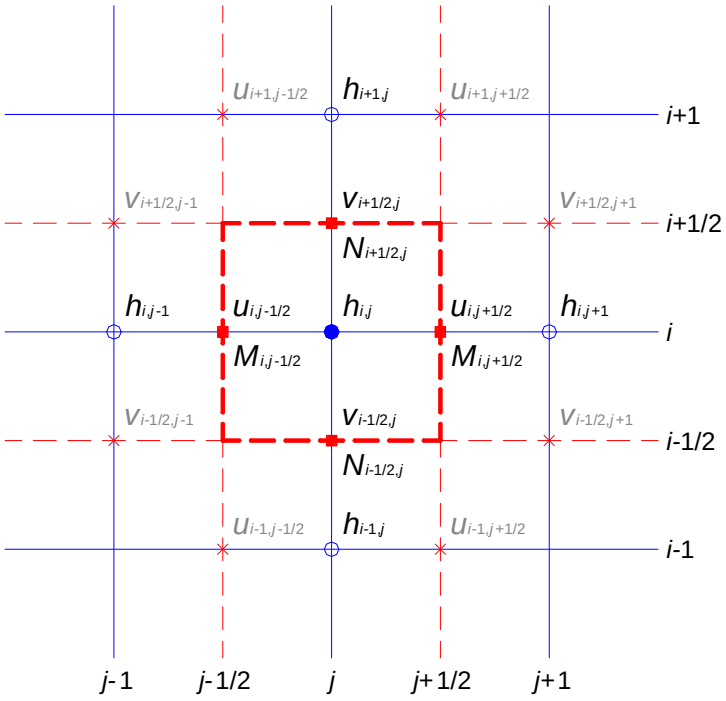


Figura 5-1 – Griglia di calcolo equazione di continuità

In particolare, facendo riferimento allo schema di Figura 5-1, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nell'equazione di continuità:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial h}{\partial t} = \dfrac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k}}{\Delta t} \\ \dfrac{\partial M}{\partial x} = p_t\left(\dfrac{M_{i,j+1/2}^{k} - M_{i,j-1/2}^{k}}{\Delta x}\right) + (1-p_t)\left(\dfrac{M_{i,j+1/2}^{k+1} - M_{i,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x}\right) \\ \dfrac{\partial N}{\partial y} = p_t\left(\dfrac{N_{i+1/2,j}^{k} - N_{i-1/2,j}^{k}}{\Delta y}\right) + (1-p_t)\left(\dfrac{N_{i+1/2,j}^{k+1} - N_{i-1/2,j}^{k+1}}{\Delta y}\right) \end{cases} \qquad [5.12]$$

in cui:

$$M^{k}_{i,j-1/2} = u^{k}_{i,j-1/2}\left[p_s h^{k}_{i,j} + (1-p_s)h^{k}_{i,j-1}\right]; \qquad N^{k}_{i-1/2,j} = v^{k}_{i-1/2,j}\left[p_s h^{k}_{i,j} + (1-p_s)h^{k}_{i-1,j}\right];$$
$$M^{k}_{i,j+1/2} = u^{k}_{i,j+1/2}\left[p_s h^{k}_{i,j+1} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right]; \qquad N^{k}_{i+1/2,j} = v^{k}_{i+1/2,j}\left[p_s h^{k}_{i+1,j} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right];$$
$$M^{k+1}_{i,j-1/2} = u^{k+1}_{i,j-1/2}\left[p_s h^{k+1}_{i,j} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j-1}\right]; \qquad N^{k+1}_{i-1/2,j} = v^{k+1}_{i-1/2,j}\left[p_s h^{k+1}_{i,j} + (1-p_s)h^{k+1}_{i-1,j}\right];$$
$$M^{k+1}_{i,j+1/2} = u^{k+1}_{i,j+1/2}\left[p_s h^{k+1}_{i,j+1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j}\right]; \qquad N^{k+1}_{i+1/2,j} = v^{k+1}_{i+1/2,j}\left[p_s h^{k+1}_{i+1,j} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j}\right].$$

[5.13a,b]

Mentre, facendo riferimento allo schema di Figura 5-2, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nellêequazione del moto nella direzione x:

$$\begin{cases}
\dfrac{\partial M}{\partial t} = \dfrac{M^{k+1}_{i,j} - M^{k}_{i,j}}{\Delta t} = \dfrac{(uh)^{k+1}_{i,j} - (uh)^{k}_{i,j}}{\Delta t} \\[2ex]
\dfrac{\partial (uM)}{\partial x} = p_t\left(\dfrac{(uM)^{k}_{i,j} - (uM)^{k}_{i,j-1}}{\Delta x}\right) + (1-p_t)\left(\dfrac{(uM)^{k+1}_{i,j} - (uM)^{k+1}_{i,j-1}}{\Delta x}\right) \\[2ex]
\dfrac{\partial (vM)}{\partial y} = p_t\left(\dfrac{(vM)^{k}_{i+1/2,j-1/2} - (vM)^{k}_{i-1/2,j-1/2}}{\Delta y}\right) + (1-p_t)\left(\dfrac{(vM)^{k+1}_{i+1/2,j-1/2} - (vM)^{k+1}_{i-1/2,j-1/2}}{\Delta y}\right) \\[2ex]
gh\dfrac{\partial H}{\partial x} = g\left[p_t\left(p_s h^{k}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right) + (1-p_t)\left(p_s h^{k+1}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j}\right)\right]\cdot \\
\qquad \cdot\left[p_t\left(\dfrac{H^{k}_{i,j} - H^{k}_{i,j-1}}{\Delta x}\right) + (1-p_t)\left(\dfrac{H^{k+1}_{i,j} - H^{k+1}_{i,j-1}}{\Delta x}\right)\right] \\[2ex]
\dfrac{1}{\rho}\tau_x = gn^2\left(p_t u^{k+1}_{i,j-1/2} + (1-p_t)u^{k}_{i,j-1/2}\right)\cdot\left[p_t\left(p_s h^{k}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right) + (1-p_t)\left(p_s h^{k+1}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j}\right)\right]^{-1/3}\cdot \\
\qquad \cdot\left\langle\left(p_t u^{k}_{i,j-1/2} + (1-p_t)u^{k+1}_{i,j-1/2}\right)^2 + \left\{p_t\left[p_s\left(p_s v^{k}_{i-1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k}_{i-1/2,j}\right) + \right.\right.\right. \\
\qquad + (1-p_s)\left(p_s v^{k}_{i+1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k}_{i+1/2,j}\right)\left.\right] + (1-p_t)\left[p_s\left(p_s v^{k+1}_{i-1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k+1}_{i-1/2,j}\right) + \\
\qquad \left.\left.\left. + (1-p_s)\left(p_s v^{k+1}_{i+1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k+1}_{i+1/2,j}\right)\right]\right\}^2\right\rangle^{1/2}
\end{cases}$$

[5.14]

in cui:

$$
\begin{aligned}
(uM)^{k}_{i,j-1} &= \left[p_s u^{k}_{i,j-3/2}\cdot u^{k}_{i,j-3/2} + (1-p_s)u^{k}_{i,j-1/2}\cdot u^{k}_{i,j-1/2}\right]h^{k}_{i,j-1};\\
(uM)^{k}_{i,j} &= \left[p_s u^{k}_{i,j-1/2}\cdot u^{k}_{i,j-1/2} + (1-p_s)u^{k}_{i,j+1/2}\cdot u^{k}_{i,j+1/2}\right]h^{k}_{i,j};\\
(uM)^{k+1}_{i,j-1} &= \left[p_s u^{k+1}_{i,j-3/2}\cdot u^{k+1}_{i,j-3/2} + (1-p_s)u^{k+1}_{i,j-1/2}\cdot u^{k+1}_{i,j-1/2}\right]h^{k+1}_{i,j-1};\\
(uM)^{k+1}_{i,j} &= \left[p_s u^{k+1}_{i,j-1/2}\cdot u^{k+1}_{i,j-1/2} + (1-p_s)u^{k+1}_{i,j+1/2}\cdot u^{k+1}_{i,j+1/2}\right]h^{k+1}_{i,j};
\end{aligned}
\qquad [5.15a]
$$

$$
\begin{aligned}
(vM)^{k}_{i-1/2,j-1/2} &= \left[\left(p_s v^{k}_{i-1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k}_{i-1/2,j}\right)\cdot\left(p_s u^{k}_{i-1,j-1/2} + (1-p_s)u^{k}_{i,j-1/2}\right)\right]\cdot\\
&\quad\cdot\left[p_s\left(p_s h^{k}_{i-1,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i-1,j}\right) + (1-p_s)\left(p_s h^{k}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right)\right];\\
(vM)^{k}_{i+1/2,j-1/2} &= \left[\left(p_s v^{k}_{i+1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k}_{i+1/2,j}\right)\cdot\left(p_s u^{k}_{i,j-1/2} + (1-p_s)u^{k}_{i+1,j-1/2}\right)\right]\\
&\quad\cdot\left[p_s\left(p_s h^{k}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i,j}\right) + (1-p_s)\left(p_s h^{k}_{i+1,j-1} + (1-p_s)h^{k}_{i+1,j}\right)\right];\\
(vM)^{k+1}_{i-1/2,j-1/2} &= \left[\left(p_s v^{k+1}_{i-1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k+1}_{i-1/2,j}\right)\cdot\left(p_s u^{k+1}_{i-1,j-1/2} + (1-p_s)u^{k+1}_{i,j-1/2}\right)\right]\\
&\quad\cdot\left[p_s\left(p_s h^{k+1}_{i-1,j-1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i-1,j}\right) + (1-p_s)\left(p_s h^{k+1}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{+1k}_{i,j}\right)\right];\\
(vM)^{k+1}_{i+1/2,j-1/2} &= \left[\left(p_s v^{k+1}_{i+1/2,j-1} + (1-p_s)v^{k+1}_{i+1/2,j}\right)\cdot\left(p_s u^{k+1}_{i,j-1/2} + (1-p_s)u^{k+1}_{i+1,j-1/2}\right)\right]\\
&\quad\cdot\left[p_s\left(p_s h^{k+1}_{i,j-1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i,j}\right) + (1-p_s)\left(p_s h^{k+1}_{i+1,j-1} + (1-p_s)h^{k+1}_{i+1,j}\right)\right].
\end{aligned}
\qquad [5.15b]
$$

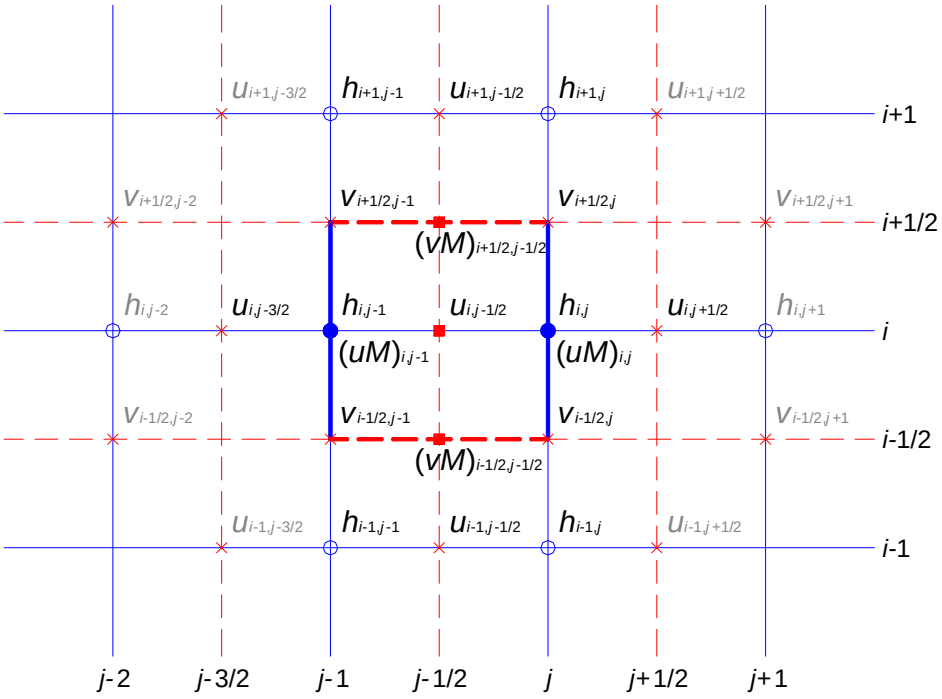


Figura 5-2 ï Griglia di calcolo equazione di moto lungo X

Infine, facendo riferimento allo schema di Figura 5-3, sono state utilizzate le seguenti formulazioni nellêequazione del moto nella direzione y:

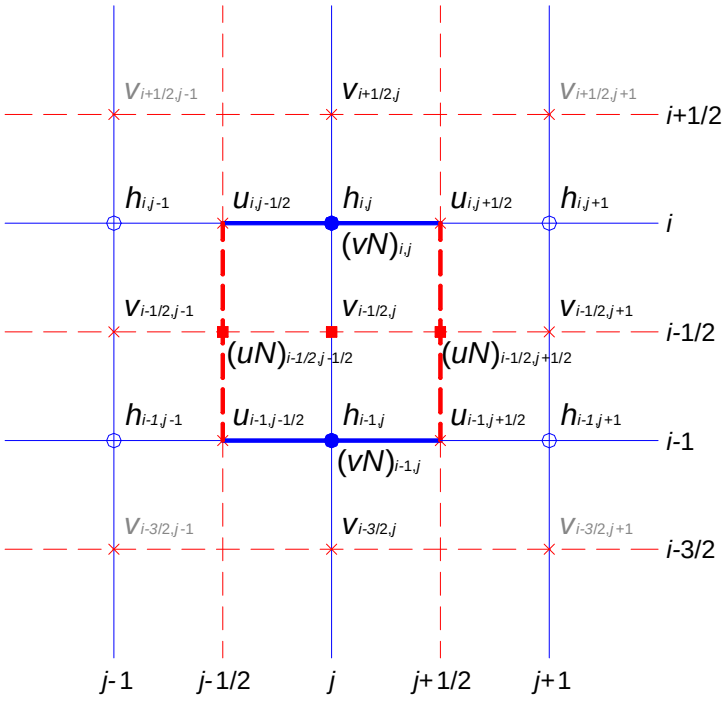


Figura 5-3 ï Griglia di calcolo equazione di moto lungo Y

$$
\begin{cases}
\dfrac{\partial N}{\partial t} = \dfrac{N_{i,j}^{k+1} - N_{i,j}^{k}}{\Delta t} = \dfrac{(vh)_{i,j}^{k+1} - (vh)_{i,j}^{k}}{\Delta t} \\
\dfrac{\partial (uN)}{\partial x} = p_t \left(\dfrac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k} - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k}}{\Delta x} \right) + (1-p_t) \left(\dfrac{(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} - (uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1}}{\Delta x} \right) \\
\dfrac{\partial (vN)}{\partial y} = p_t \left(\dfrac{(vN)_{i,j}^{k} - (vN)_{i-1,j}^{k}}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\dfrac{(vN)_{i,j}^{k+1} - (vN)_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \\
gh \dfrac{\partial H}{\partial y} = g \left[p_t \left(p_s h_{i-1,j}^{k} + (1-p_s) h_{i,j}^{k} \right) + (1-p_t) \left(p_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1} \right) \right] \cdot \\
\qquad \cdot \left[p_t \left(\dfrac{H_{i,j}^{k} - H_{i-1,j}^{k}}{\Delta y} \right) + (1-p_t) \left(\dfrac{H_{i,j}^{k+1} - H_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta y} \right) \right] \\
\dfrac{1}{\rho} \tau_y = g n^2 \left(p_t v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1-p_t) v_{i-1/2,j}^{k} \right) \cdot \left[p_t \left(p_s h_{i-1,j}^{k} + (1-p_s) h_{i,j}^{k} \right) + (1-p_t) \left(p_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1} \right) \right]^{-1/3} \cdot \\
\qquad \cdot \Big\langle \Big\{ p_t \left[p_s \left(p_s u_{i-1,j-1/2}^{k} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k} \right) + (1-p_s) \left(p_s u_{i-1,j+1/2}^{k} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k} \right) \right] + \\
\qquad + (1-p_t) \left[p_s \left(p_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k+1} \right) + (1-p_s) \left(p_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k+1} \right) \right] \Big\}^2 + \\
\qquad + \left(p_t v_{i-1/2,j}^{k} + (1-p_t) v_{i-1/2,j}^{k+1} \right)^2 \Big\rangle^{1/2}
\end{cases}
\qquad [5.16]
$$

in cui:

$$
\begin{aligned}
(uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k} &= \left[\left(p_s v_{i-1/2,j-1}^{k} + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^{k} \right) \cdot \left(p_s u_{i-1,j-1/2}^{k} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k} \right) \right] \cdot \\
&\quad \cdot \left[p_s \left(p_s h_{i-1,j-1}^{k} + (1-p_s) h_{i,j-1}^{k} \right) + (1-p_s) \left(p_s h_{i-1,j}^{k} + (1-p_s) h_{i,j}^{k} \right) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k} &= \left[\left(p_s v_{i-1/2,j}^{k} + (1-p_s) v_{i-1/2,j+1}^{k} \right) \cdot \left(p_s u_{i-1,j+1/2}^{k} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k} \right) \right] \\
&\quad \cdot \left[p_s \left(p_s h_{i-1,j}^{k} + (1-p_s) h_{i,j}^{k} \right) + (1-p_s) \left(p_s h_{i-1,j+1}^{k} + (1-p_s) h_{i,j+1}^{k} \right) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j-1/2}^{k+1} &= \left[\left(p_s v_{i-1/2,j-1}^{k+1} + (1-p_s) v_{i-1/2,j}^{k+1} \right) \cdot \left(p_s u_{i-1,j-1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j-1/2}^{k+1} \right) \right] \\
&\quad \cdot \left[p_s \left(p_s h_{i-1,j-1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j-1}^{k+1} \right) + (1-p_s) \left(p_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1} \right) \right]; \\
(uN)_{i-1/2,j+1/2}^{k+1} &= \left[\left(p_s v_{i-1/2,j}^{k+1} + (1-p_s) v_{i-1/2,j+1}^{k+1} \right) \cdot \left(p_s u_{i-1,j+1/2}^{k+1} + (1-p_s) u_{i,j+1/2}^{k+1} \right) \right] \\
&\quad \cdot \left[p_s \left(p_s h_{i-1,j}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j}^{k+1} \right) + (1-p_s) \left(p_s h_{i-1,j+1}^{k+1} + (1-p_s) h_{i,j+1}^{k+1} \right) \right].
\end{aligned}
\qquad [5.17a]
$$

$$
\begin{aligned}
(vN)^{k}_{i,j-1} &= \left[p_s v^{k}_{i-3/2,j} \cdot v^{k}_{i-3/2,j} + (1-p_s) v^{k}_{i-1/2,j} \cdot v^{k}_{i-1/2,j}\right] h^{k}_{i,j-1}; \\
(vN)^{k}_{i,j} &= \left[p_s v^{k}_{i-1/2,j} \cdot v^{k}_{i-1/2,j} + (1-p_s) v^{k}_{i+1/2,j} \cdot v^{k}_{i+1/2,j}\right] h^{k}_{i,j}; \\
(vN)^{k+1}_{i,j-1} &= \left[p_s v^{k+1}_{i-3/2,j} \cdot v^{k+1}_{i-3/2,j} + (1-p_s) v^{k+1}_{i-1/2,j} \cdot v^{k+1}_{i-1/2,j}\right] h^{k+1}_{i,j-1}; \\
(vN)^{k+1}_{i,j} &= \left[p_s v^{k+1}_{i-1/2,j} \cdot v^{k+1}_{i-1/2,j} + (1-p_s) v^{k+1}_{i+1/2,j} \cdot v^{k+1}_{i+1/2,j}\right] h^{k+1}_{i,j};
\end{aligned}
\qquad [5.17b]
$$

dove p_s è il peso della media spaziale e p_t il peso della media temporale (l'indice *k* è riferito al tempo, mentre gli indici *i* e *j* sono riferiti rispettivamente alle coordinate lungo x e y). I valori utilizzati per p_s e p_t sono rispettivamente di 0.5 e 0.45 che dalle prove effettuate risultano essere i più affidabili per la risoluzione del sistema.

Il modello fornisce la risoluzione delle equazioni in corrispondenza dei nodi di una griglia spazio-temporale ove, al variare del tempo, si ricavano i valori delle grandezze idrauliche (portata, velocità, carico piezometrico, etc). A ciascun passo il programma bilancia le equazioni di moto e di continuità in modo iterativo fino al raggiungimento di una correzione su portate e livelli inferiore a una soglia prefissata. La propagazione delle esondazioni avviene in condizioni di corrente lenta.

5.4 Il modello a fondo mobile

Nel modello a fondo mobile per ogni passo temporale alle equazioni di moto e di continuità dell'acqua si affianca l'equazione di continuità dei sedimenti nella forma:

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = -b(1-\eta)\frac{\partial z}{\partial t}$$

in cui

Qs capacità di trasporto solido [mc/s];
b larghezza alveo attivo [m];
η porosità;
z quota del fondo [m].

La precedente equazione può essere riscritta alle differenze finite come:

$$Q_{si+1} - Q_{si} = -\frac{(b_i + b_{i+1})}{2}\frac{dx}{dt}dz_{i+1}$$

Il calcolo delle profondità di erosione (o di deposito) parte considerando un dz inizialmente nullo nella prima sezione di monte e procedendo verso valle.

La capacità di trasporto Qs viene stimata in ogni sezione con la formula di Ackers-White (1973) sulla base delle caratteristiche idrauliche (velocità media, raggio idraulico, velocità di attrito) e di quelle granulometriche (D35 del materiale dôalveo).

La variazione della quota di fondo alveo (scavo o rinterro) avviene a carico della sola parte di sezione considerata attiva ai fini del trasporto che viene delimitata preliminarmente.

5.4.1 Il modello di Ackers-White

Il calcolo del trasporto solido totale secondo Ackers-White necessita della definizione di una serie di parametri che caratterizzano la formazione delle forme di fondo in alvei a fondo mobile.

In primo luogo viene definito il parametro u* noto il raggio idraulico della sezione R e la pendenza motrice J (nel caso specifico la pendenza motrice viene ricavata per una data sezione come derivata tra la sezione di valle e quella di monte):

u*= ã (g R J)

dove g=9.81 m/s2.

La tensione tangenziale al fondo τ risulta:

$\tau=\rho$ u* con ρ=102 kg s2/m4

ovvero

$\tau=\gamma$ R J con γ=1000 kg/m3

Si calcola quindi il valore dei Dgr:

Dgr= d35 ((g (s - 1)) / (ν2)) 1 / 3

dove s= γs/γ = 2.45 (avendo assunto γs =2450 kg/m3) e ν=1e-6 m2/s.

La tensione adimensionale di Shields si definisce come:

θ= u*2/((s-1) g d35) = τ / ((ρs-ρ) g d35)

Nel modello di Ackers - White il valore di θcr si esprime come:

θcr=(0.23 / ã (Dgr) + 0.14)2 per Dgr<60

θcr=0.029 per Dgr>60

Gli autori individuano il parametro Fgr espresso come il prodotto di due fattori il primo connesso con la tensione totale u* e il secondo connesso con la tensione effettiva la fondo uð espressa come:

uð= U / (5.65 * log(10.6 R / d35))

dove U è la velocità media della corrente.

Il parametro Fgr si esprime quindi con la seguente espressione:

Fgr=(u*n uð(1-n))/ ã((s-1) g d35)

dove

n= 1-0.56 log (Dgr) per Dgr <60

n= 0.0 per Dgr >60

Con materiali molto fini Dgr tende a zero pertanto n tende a 1 ovvero il parametro Fgr dipende solo dalla tensione tangenziale totale ovvero per i materiali fini assumono importanza le forme di fondo rispetto alla scabrezza di superficie per il calcolo delle perdite. Con materiali grossolani n va a zero e quindi Fgr dipende dalla sola tensione effettiva al fondo in quanto minore importanza hanno le perdite legate alla formazione delle forme di fondo.

Il trasporto totale adimensionale Ggr può essere espresso come:

Ggr=(u* / U)n (Cp R)/(s d35)

dove Cp è la concentrazione in peso dei sedimenti trasportati.

Il parametro Ggr può essere messo in relazione con il parametro Fgr secondo la seguente espressione dove A=ã θcr:

Ggr=Kt (Fgr/A ï 1)m

dove per Dgr<60

Kt= 10 (2.86 log(Dgr) - (log(Dgr))2 - 3.53)

m = 9.66 / Dgr + 1.34

e per Dgr >60

Kt= 0.025

m = 1.5

Noto Cp è possibile calcolare il trasporto in peso:

Qsp = γ Cp Q [kg/s]

e il trasporto in volume:

Qs = Qsp / (s γ (1- η))

dove η è la porosità del materiale al fondo assunta pari a 0.4.

5.5 Implementazione del modello idraulico

In accordo con lôAllegato 5 alle norme di Piano e con le simulazioni condotte negli studi a supporto del PAI è stato adottato un parametro di scabrezza di G.S. di 24 [m1/3s-1] per il fiume Vara (alveo naturale con forte presenza di vegetazione arboree e sedimenti di media pezzatura) e un parametro di scabrezza di G.S. di 12 [m1/3s-1] che tiene conto della pendenza dell'alveo e della pezzatura dei sedimenti ricavata da una specifica analisi granulometrica.

Nella Figura 5-4 si riporta la curva granulometrica del torrente Gottero nel tratto di studio ricavata con il metodo del campionamento superficiale. Dalla curva granulometrica si ricava un D50 = 37 mm e un D35 = 25mm

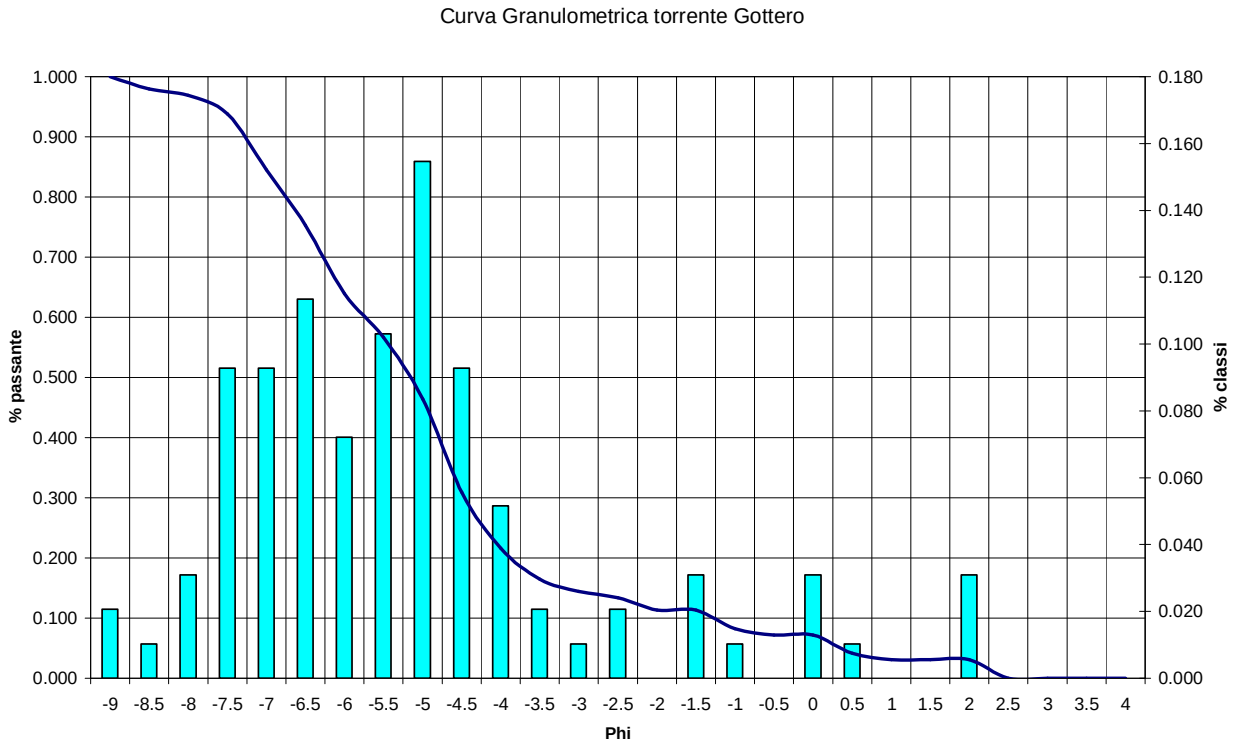


Figura 5-4 ï Curva granulometrica del torrente Gottero

I coefficienti delle perdite concentrate sono stati assunti in generale pari a 0.1 (contrazione) e 0.2 (espansione), in corrispondenza dei ponti sono stati utilizzati i coefficienti 0.3 (contrazione) e 0.5 (espansione).

Il modello digitale del terreno, ha una maglia di 10 m e un coefficiente di Manning pari a 0.1.

Come condizione al contorno di valle è stata calcolata una scala di deflusso nella sezione V90 sulla base dei risultati delle simulazioni condotte per il PAI.

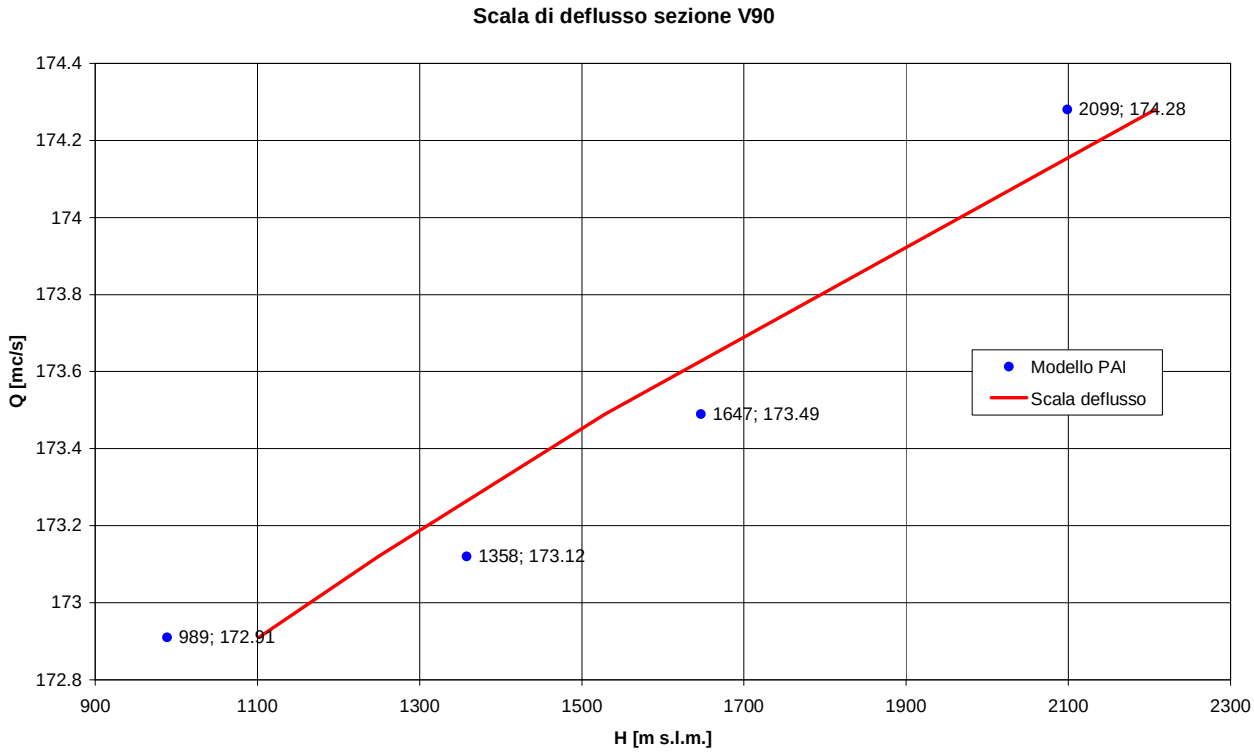


Figura 5-5 - Scala di deflusso nella sezione di valle

La simulazioni sono state condotte cautelativamente in condizioni di corrente lenta.

6 ANALISI IDRAULICA DELLO STATO ATTUALE

Lôanalisi idraulica è stata condotta con il modello in moto vario a fondo fisso per i tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni.

I tabulati delle verifica idraulica per ciascun tempo di ritorno sono riportati nellôAllegato A01.

Nell'Allegato A02 è riportato il profilo longitudinale e le sezioni fluviali con i livelli idrometrici.

Per ciascun tempo di ritorno è stata prodotta una mappa dei battenti e delle velocità nelle aree inondabili riportata nelle Figura 6-1, Figura 6-2, Figura 6-3, Figura 6-4.

Nella Figura 6-5 e Figura 6-6 si riportano le aree inondabili e la pericolosità allo stato attuale.

6.1 Analisi dei risultati

A monte del ponte per Casa Boera si registrano allagamenti in sponda destra e sinistra a partire dal tempo di ritorno di 30 anni. A valle del ponte per Casa Boera in sponda destra si hanno esondazioni a partire dal tempo di ritorno di 30 anni che aumentano in estensione e battenti all'aumentare del tempo di ritorno. Per il tempo di ritorno di 200 anni l'area di Fulli risulta completamente allagata con battenti nell'ordine di 1.0m -1.5m.

Le aree inondabili risultano meno estese rispetto al PAI nell'area di Pareto mentre lo sono in misura maggiore nell'area di Fulli.

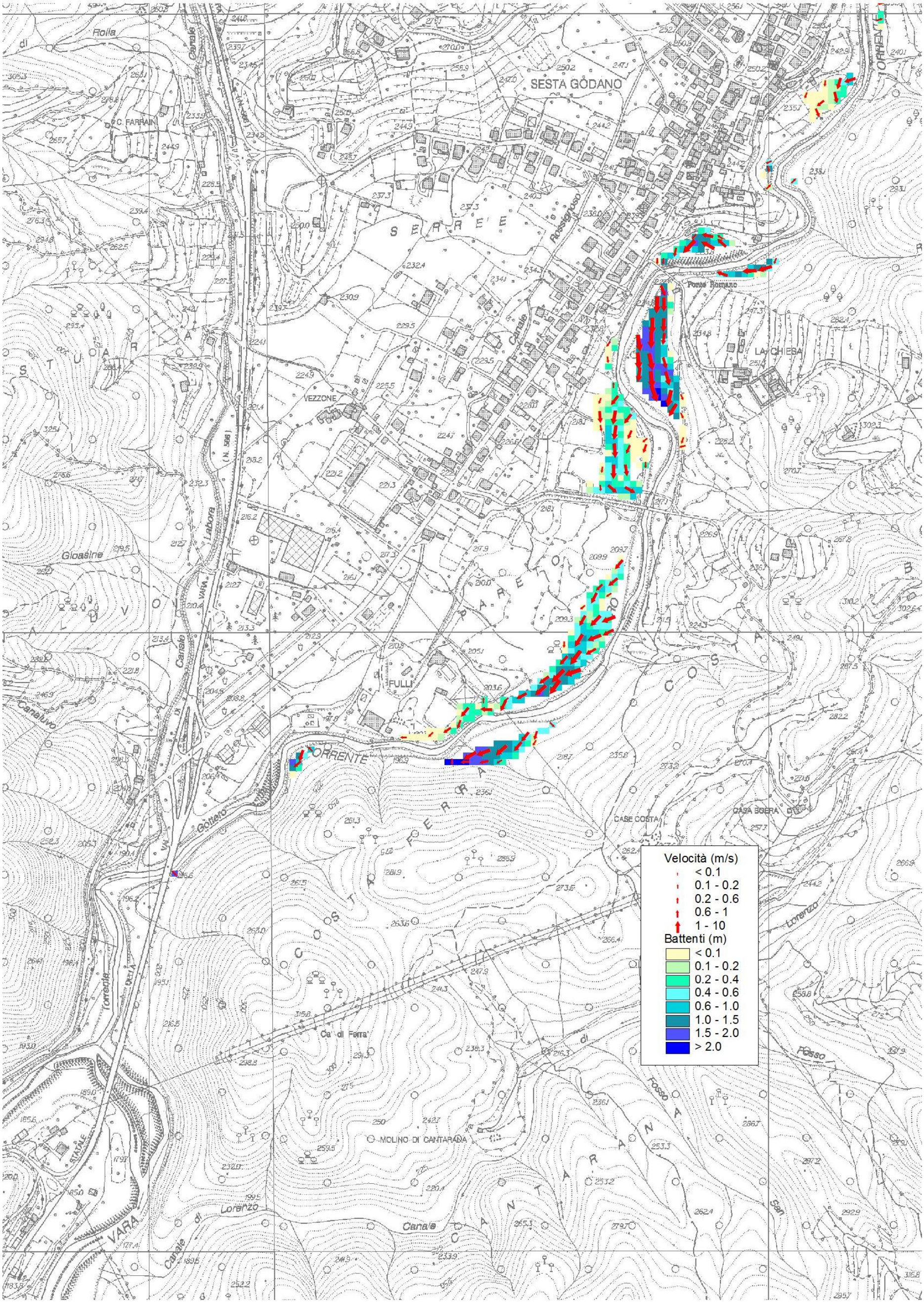


Figura 6-1 - Battenti e velocità Tr 30 attuale

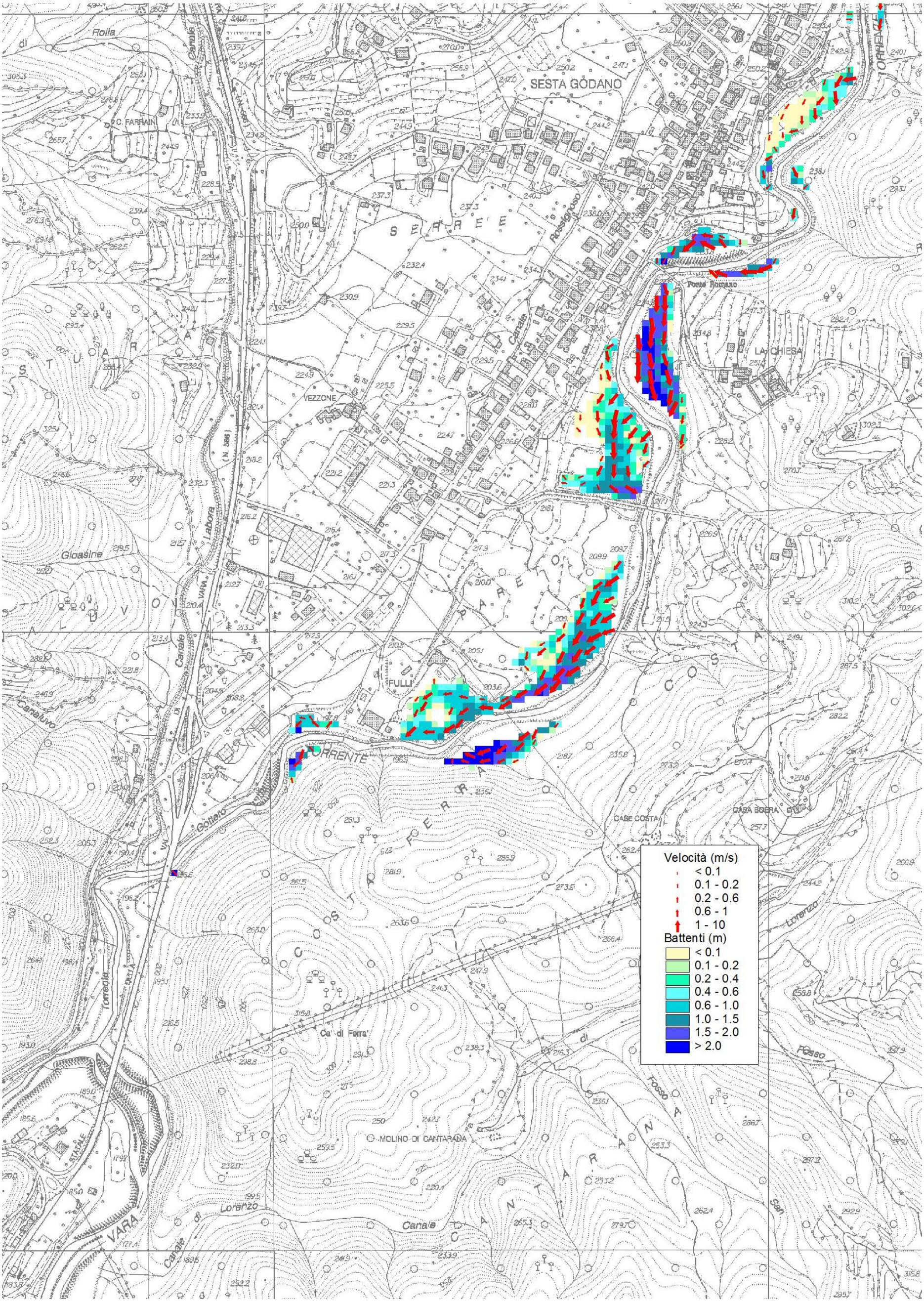


Figura 6-2 - Battenti e velocità Tr 100 attuale

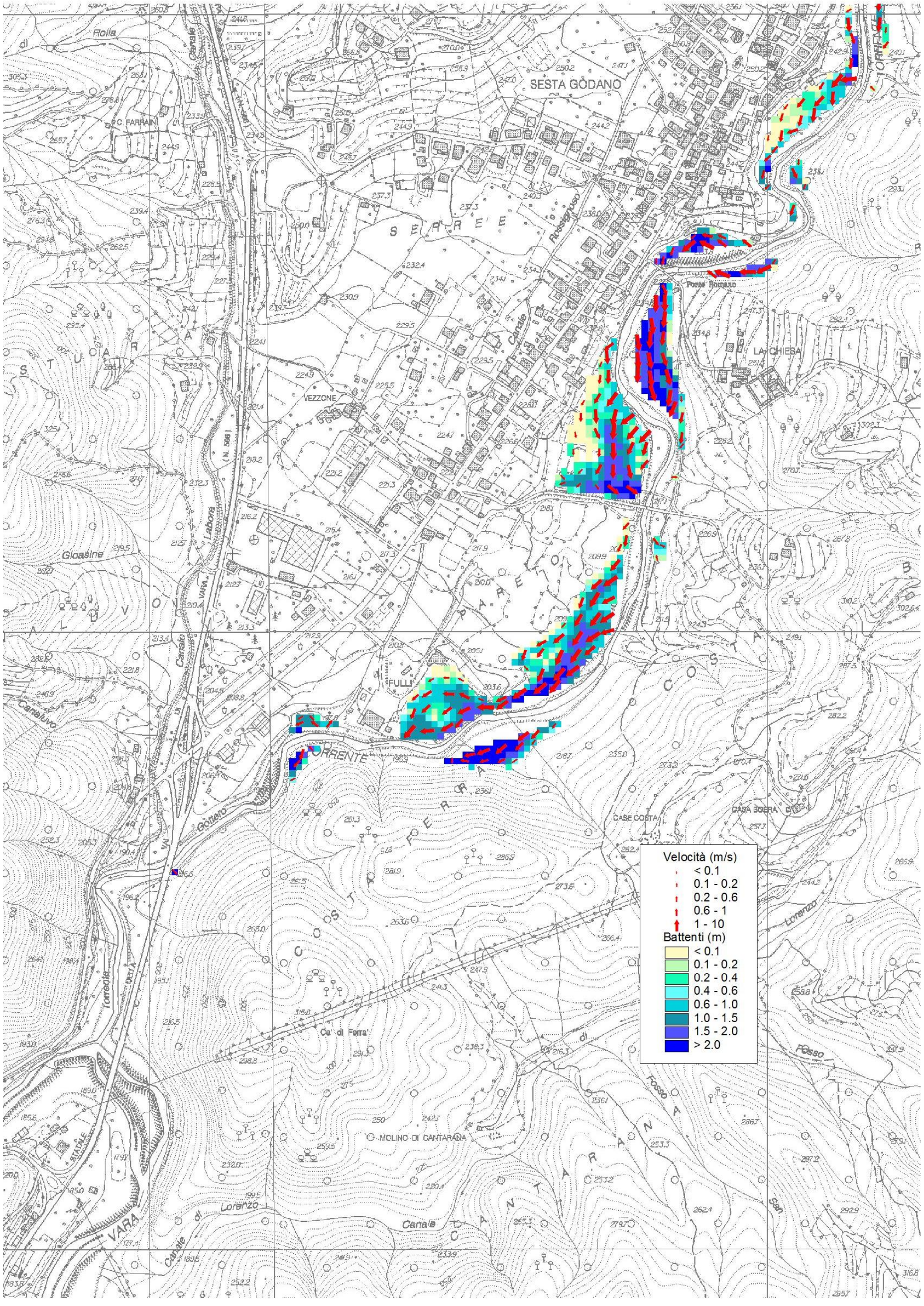


Figura 6-3 - Battenti e velocità Tr 200 attuale

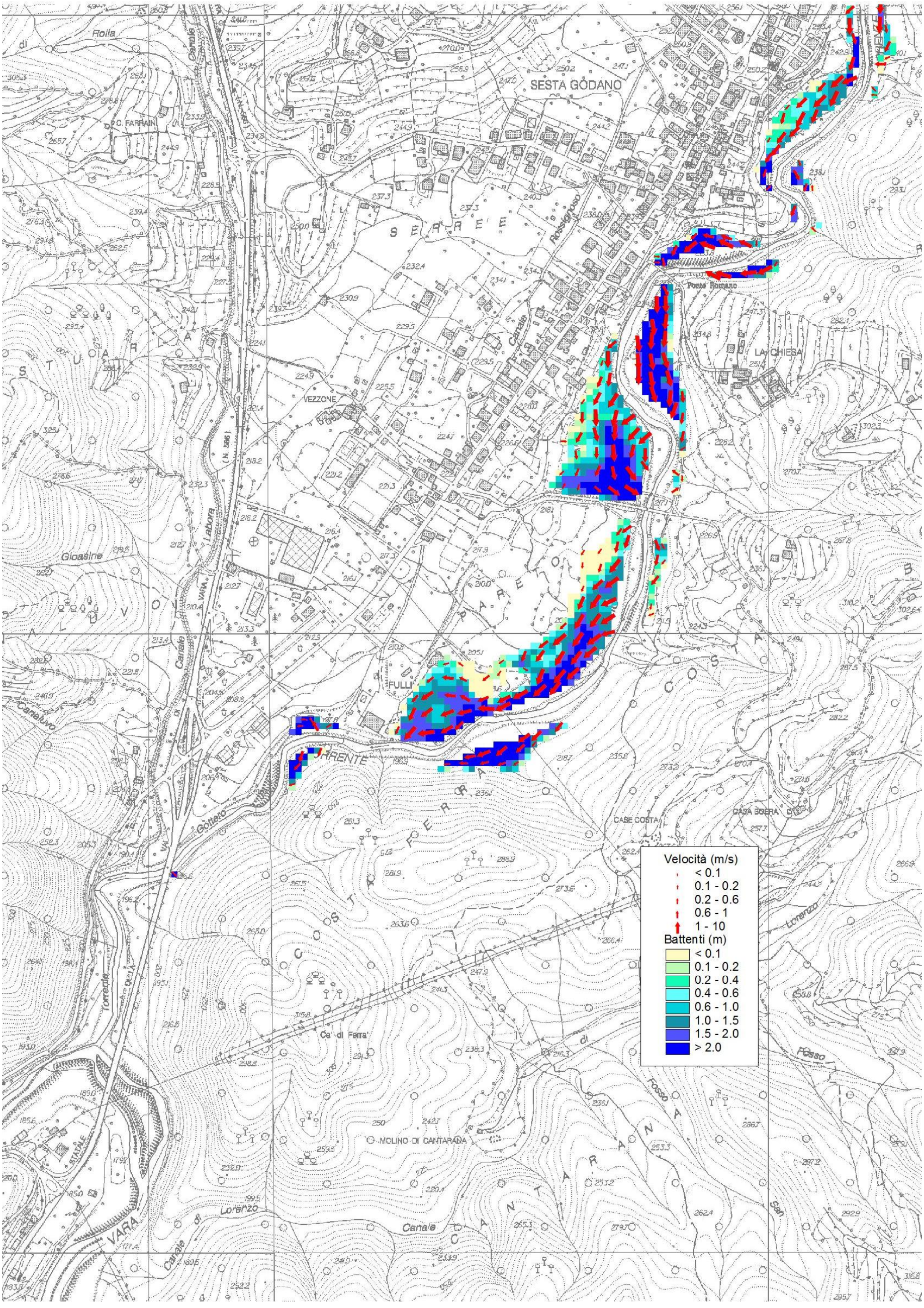


Figura 6-4 - Battenti e velocità Tr 500 attuale

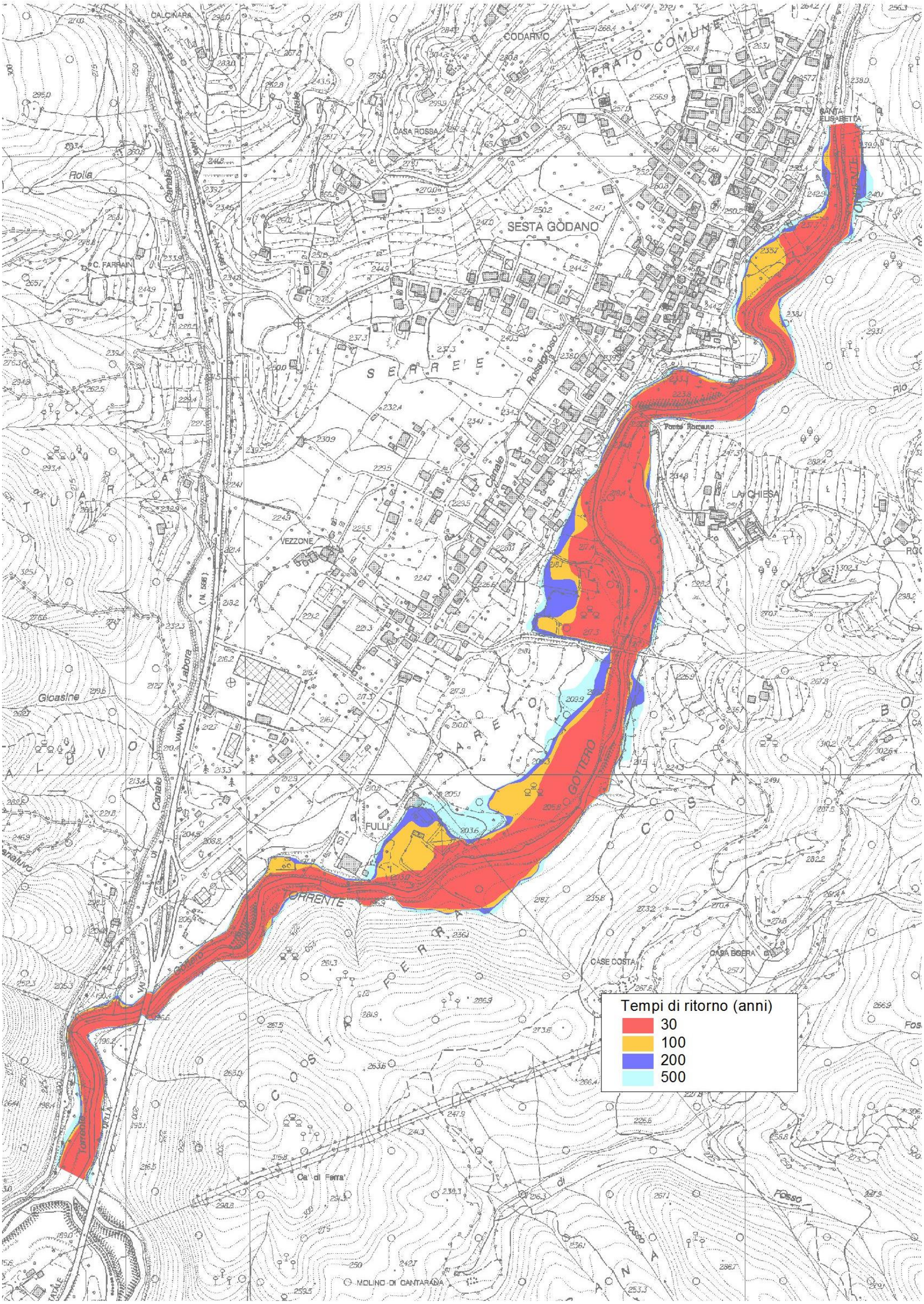


Figura 6-5 - Aree inondabili attuale

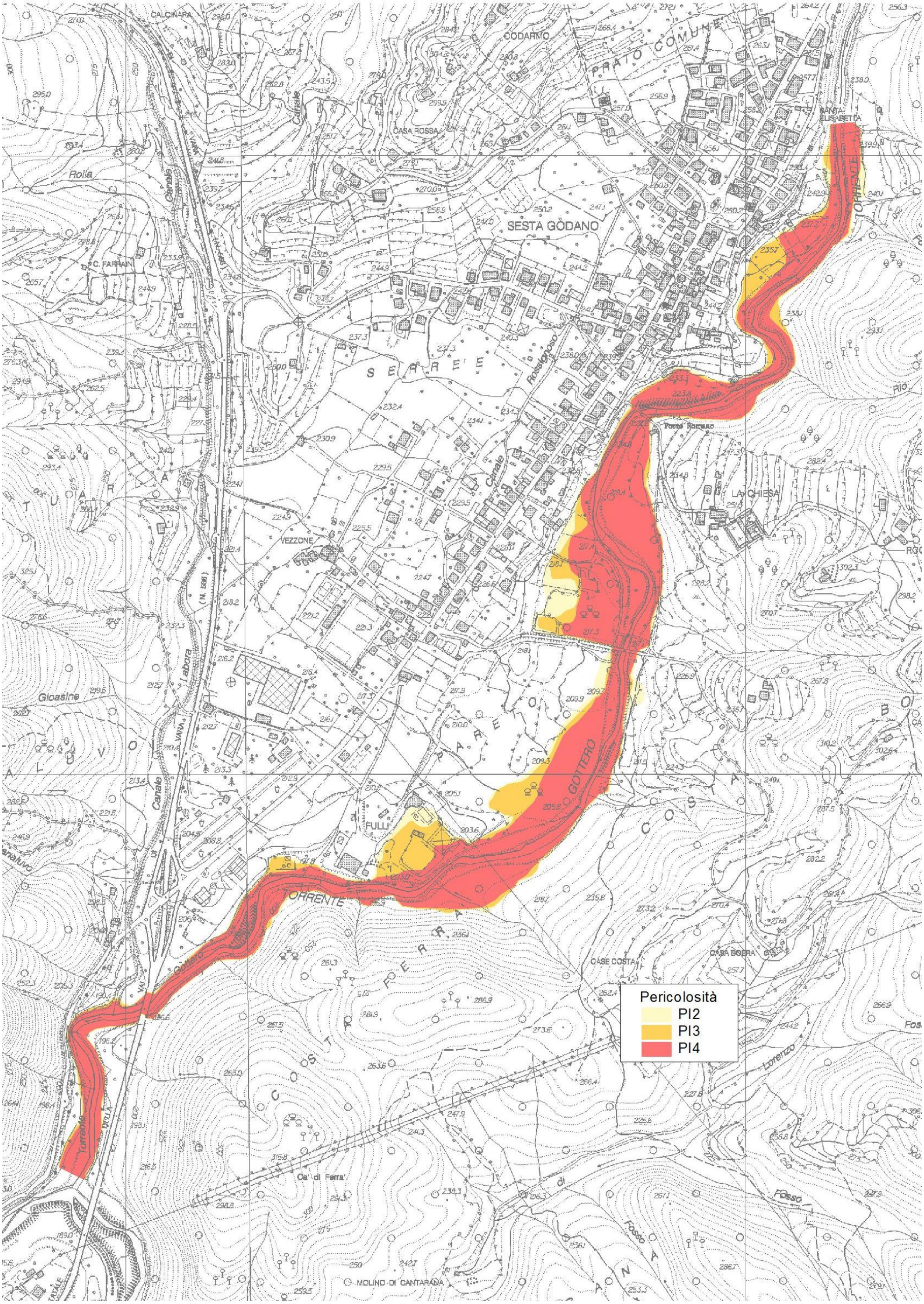


Figura 6-6 - Pericolosità attuale

7 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

L'intervento prevede la realizzazione di una arginatura in sponda destra a partire dal ponte per Casa Boera fino alla località Fulli.

L'argine corre al margine della fascia di riassetto per una lunghezza di circa 330m.

L'argine avrà una larghezza in sommità di 4.0m e una pendenza dei paramenti di 1:1.5.

A fiume è prevista la realizzazione di una scogliera di protezione e di stabilizzazione della sponda.

In corrispondenza della località Fulli l'argine si raccorda con la sponda esistente.

In questo tratto è previsto un allargamento della sezione in sponda destra tra la sezione GT3068__ e la sezione GT3070__.

La planimetria del modello nello stato di progetto con l'argine e la fascia di riassetto è riportata nella Figura 7-1.

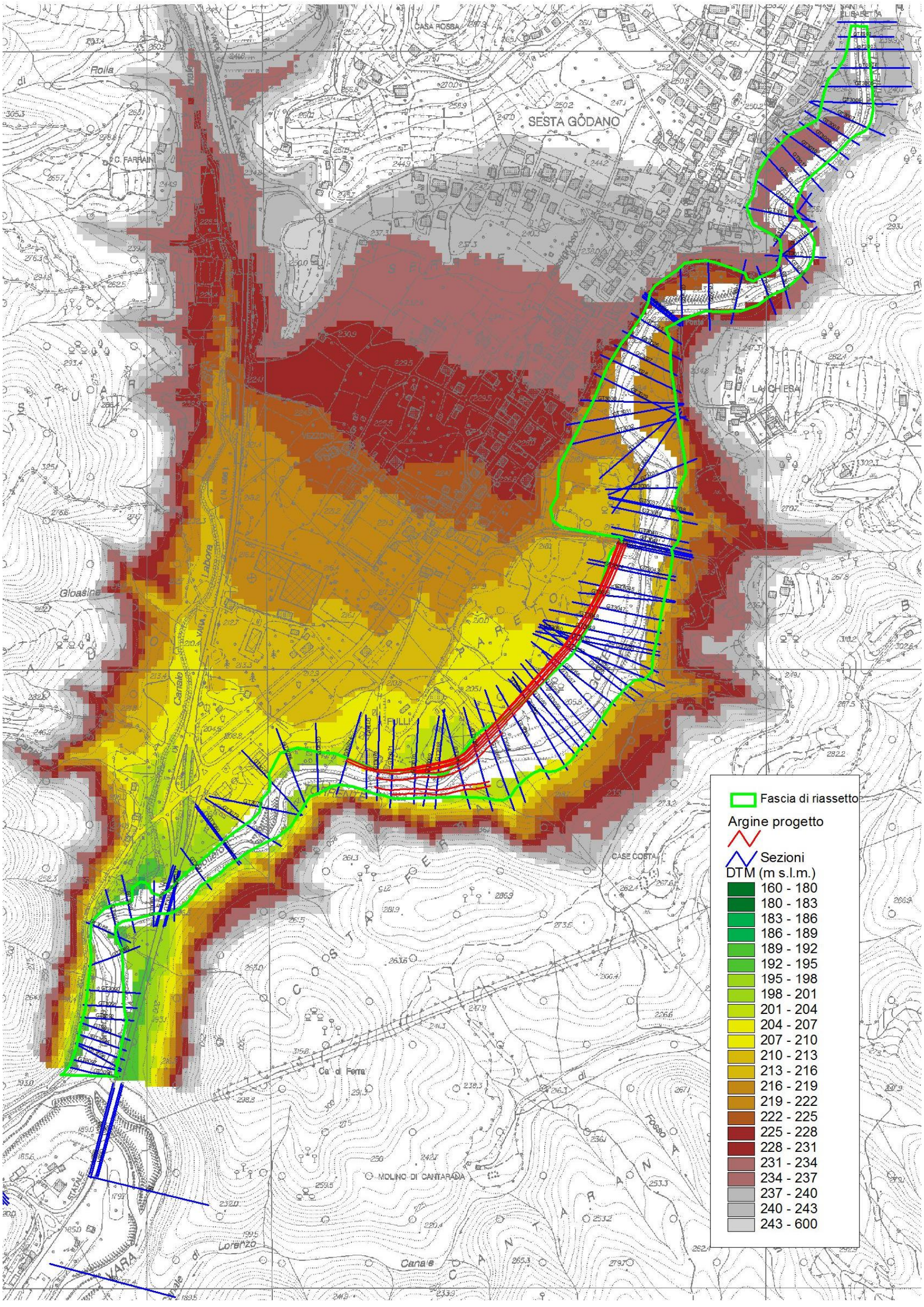


Figura 7-1 - Modello idraulico stato di progetto

8 ANALISI IDRAULICA DELLO STATO DI PROGETTO

Lâanalisi idraulica è stata condotta con il modello in moto vario a fondo fisso per i tempi di ritorno di 30, 100, 200 e 500 anni. E' stata inoltre condotta una verifica sul tratto di intervento a fondo mobile per gli stessi tempi di ritorno.

I tabulati delle verifica idraulica a fondo fisso per ciascun tempo di ritorno sono riportati nellâAllegato A03.

Nell'Allegato A04 è riportato il profilo longitudinale e le sezioni fluviali con i livelli idrometrici per la verifica a fondo fisso.

I tabulati delle verifica idraulica a fondo mobile per ciascun tempo di ritorno sono riportati nellâAllegato A05.

Nell'Allegato A06 è riportato il profilo longitudinale e le sezioni fluviali con i livelli idrometrici per la verifica a fondo mobile.

Per ciascun tempo di ritorno è stata prodotta una mappa dei battenti e delle velocità nelle aree inondabili riportata nelle Figura 8-1, Figura 8-2, Figura 8-3 e Figura 8-4.

Nella Figura 8-5 e nella Figura 8-6 si riportano rispettivamente le aree inodanbili e la pericolosità nello stato di progetto.

8.1 Analisi dei risultati

Nella stato di progetto l'area di Pareto e quella di Fulli non risultano inondate per nessun tempo di ritorno.

Il franco di sicurezza rispetta ampiamente quanto previsto al punto 3 dell'allegato 5 alle Norme di Piano. Il franco per il tempo di ritorno di 200 anni risulta sempre superiore a 1.00m o al carico cinetico della corrente come evidenziato nella Tabella 8-2 . Si osservi che l'argine è in grado di contenere anche l'evento con tempo d ritorno 500 anni.

Gli interventi non comportano aggravi a valle significativi come si evince dalla Tabella 8-1 dove si riportano le portate per i diversi tempi di ritorno allo stato attuale a in quello di progetto alla confluenza con il fiume Vara.

	Attuale	Progetto
Tr 30	317.4	317.2
Tr 100	440.4	440.6
Tr 200	536.9	537.3
Tr 500	683.5	686.2

Tabella 8-1 - Verifica aggravio a valle

La verifica a fondo mobile ha confermato i livelli ricavati con la verifica a fondo fisso. Il profilo longitudinale del fondo subisce variazioni di quota durante il passaggio delle piena duecentennale comprese tra ±70cm. I livelli idrici si presentano più regolari.

Codice	Arg_Dx_m	H 200 [m s.l.m.]	Ev 200 [m]	Franco 200 [m]	H 500 [m s.l.m.]	Ev 500 [m]	Franco 500 [m]
GT3042_D	216.25	213.79	0.82	2.46	214.32	0.94	1.93
GT3043__	214.98	212.46	1.17	2.52	212.87	1.37	2.11
GT3044__	214.86	212.21	0.69	2.65	212.77	0.78	2.09
GT3045__	214.27	211.52	0.81	2.75	212.12	0.88	2.15
GT3046__	214.14	211.44	0.74	2.70	212.01	0.84	2.13
GT3047__	213.64	211.13	0.56	2.51	211.74	0.64	1.90
GT3048__	213.25	210.90	0.53	2.35	211.53	0.61	1.72
GT3049__	212.90	210.71	0.48	2.19	211.38	0.52	1.52
GT3050__	212.68	210.66	0.39	2.02	211.34	0.42	1.34
GT3051__	212.54	210.53	0.44	2.01	211.25	0.45	1.29
GT3052__	212.28	210.37	0.45	1.91	211.07	0.49	1.21
GT3053__	211.96	209.92	0.66	2.04	210.61	0.73	1.35
GT3054__	211.75	209.86	0.51	1.89	210.59	0.55	1.16
GT3055__	211.51	209.51	0.68	2.00	210.17	0.79	1.34
GT3056__	210.99	209.01	0.77	1.98	209.67	0.89	1.32
GT3057__	210.48	208.33	0.95	2.15	208.86	1.17	1.62
GT3058__	209.95	208.24	0.53	1.71	208.78	0.68	1.17
GT3059__	209.66	206.99	1.33	2.67	207.48	1.51	2.18
GT3060__	209.44	206.13	1.18	3.31	206.54	1.44	2.90
GT3061__	209.18	205.86	0.99	3.32	206.30	1.20	2.88
GT3062__	208.89	205.82	0.55	3.07	206.32	0.66	2.57
GT3063__	208.29	205.62	0.34	2.67	206.16	0.41	2.13
GT3064__	207.52	205.04	0.44	2.48	205.64	0.48	1.88
GT3065__	207.16	204.85	0.36	2.31	205.46	0.42	1.70
GT3066__	206.58	204.46	0.50	2.12	205.13	0.49	1.45
GT3067__	205.97	203.89	0.57	2.08	204.51	0.66	1.46
GT3068__	205.20	203.35	0.61	1.85	204.10	0.61	1.10
GT3069__	204.95	203.14	0.66	1.81	203.89	0.65	1.06
GT3070__	204.55	202.77	0.70	1.78	203.43	0.82	1.12
GT3071__	203.83	201.97	0.90	1.86	202.75	0.93	1.08
GT3072__	204.94	201.19	1.15	3.75	201.80	1.36	3.14
GT3073__	205.69	200.78	1.14	4.91	201.34	1.38	4.35
GT3074__	204.59	200.04	0.90	4.55	200.61	1.09	3.98

Tabella 8-2 - Verifica del franco di sicurezza

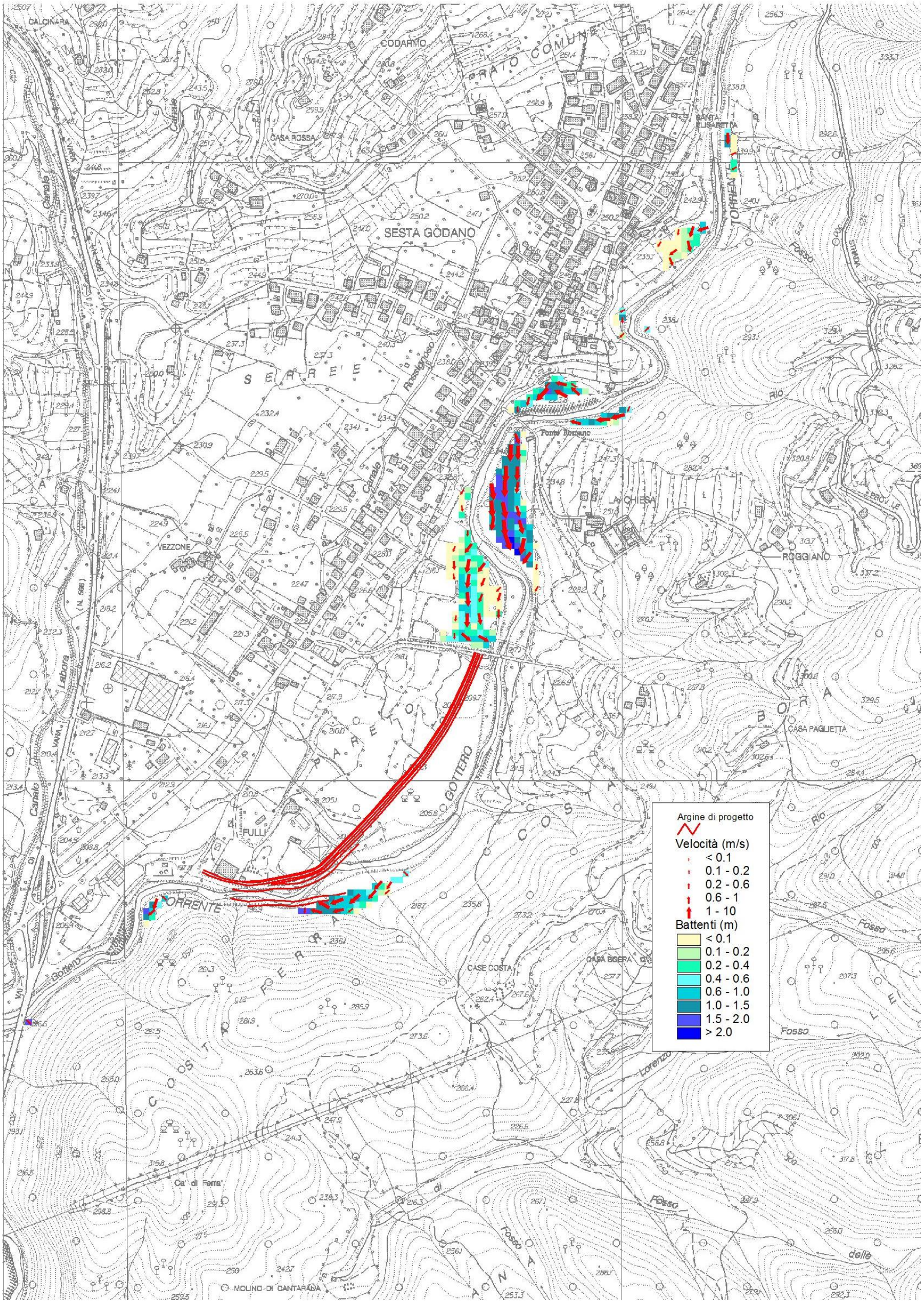


Figura 8-1 - Battenti Tr 30 progetto

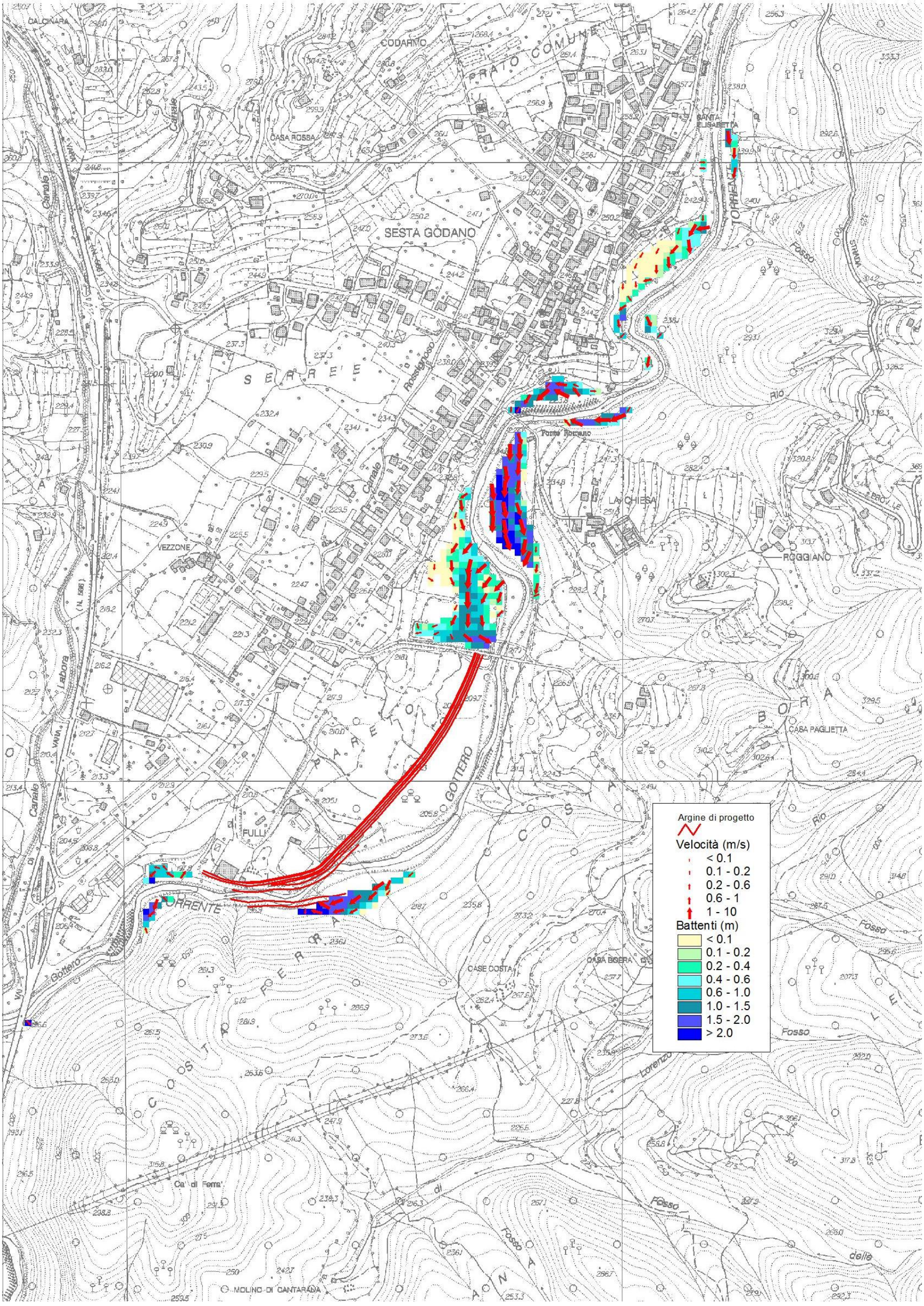


Figura 8-2 - Battenti Tr 100 progetto

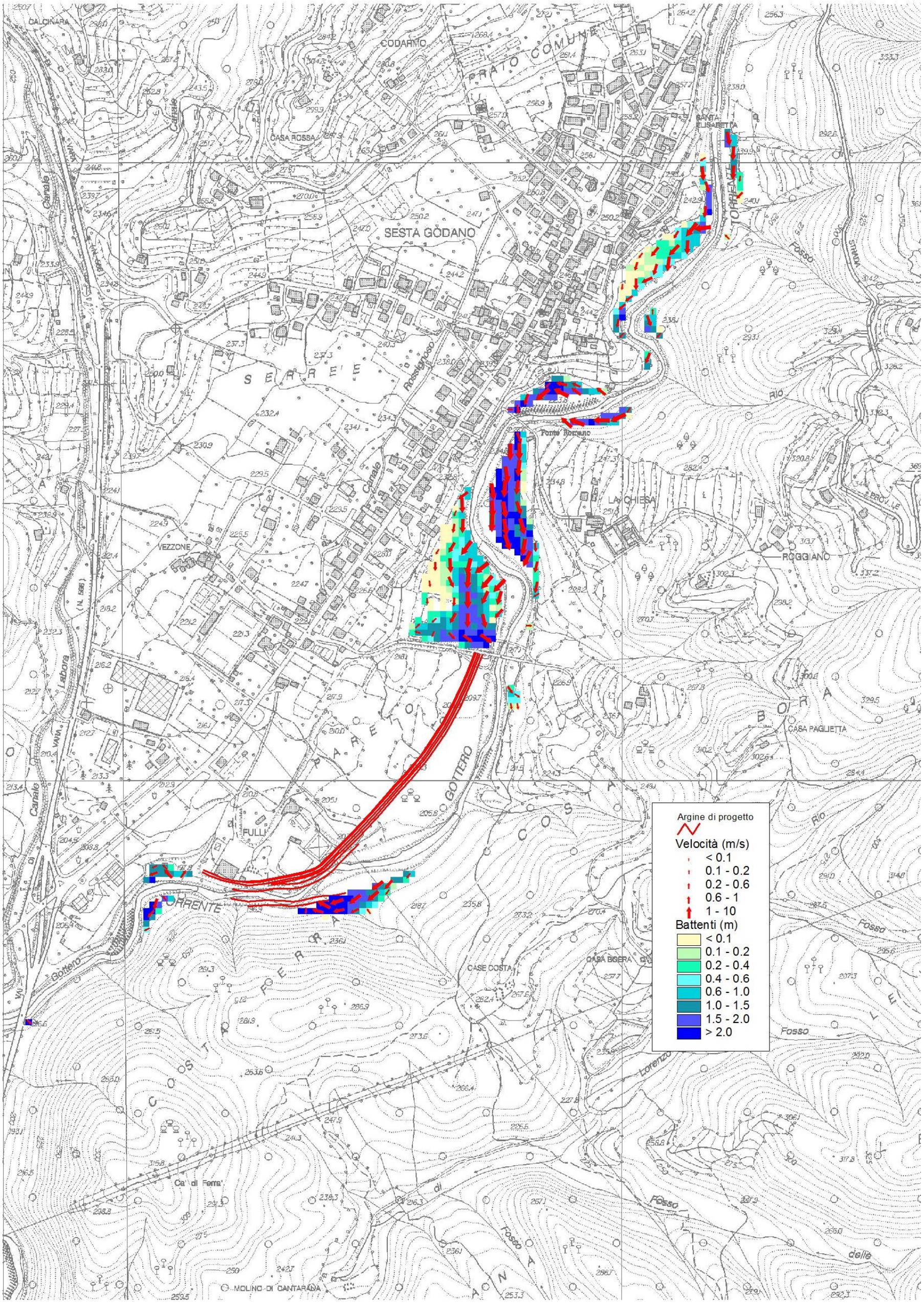


Figura 8-3 - Battenti Tr 200 progetto

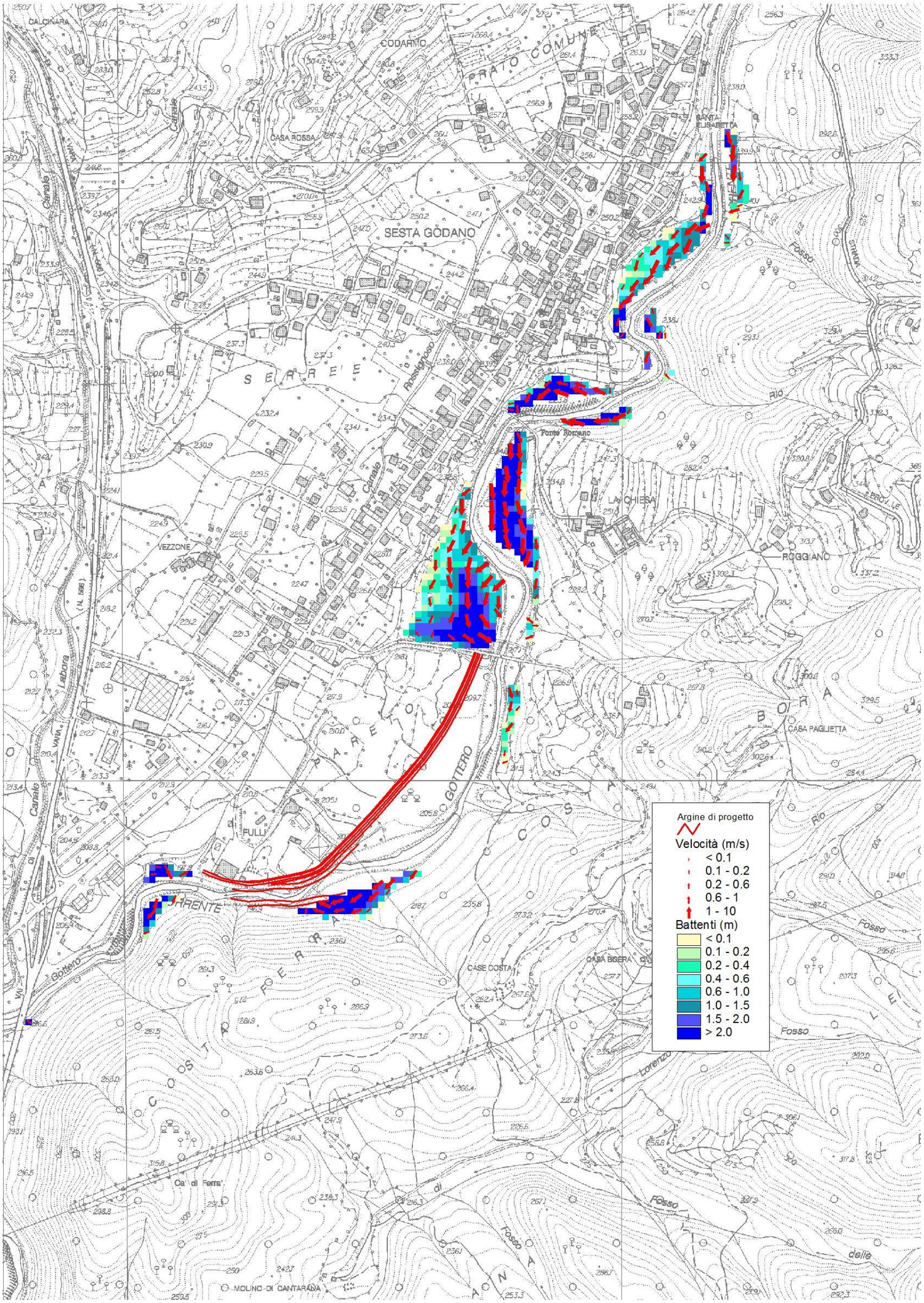


Figura 8-4 - Battenti Tr 500 progetto

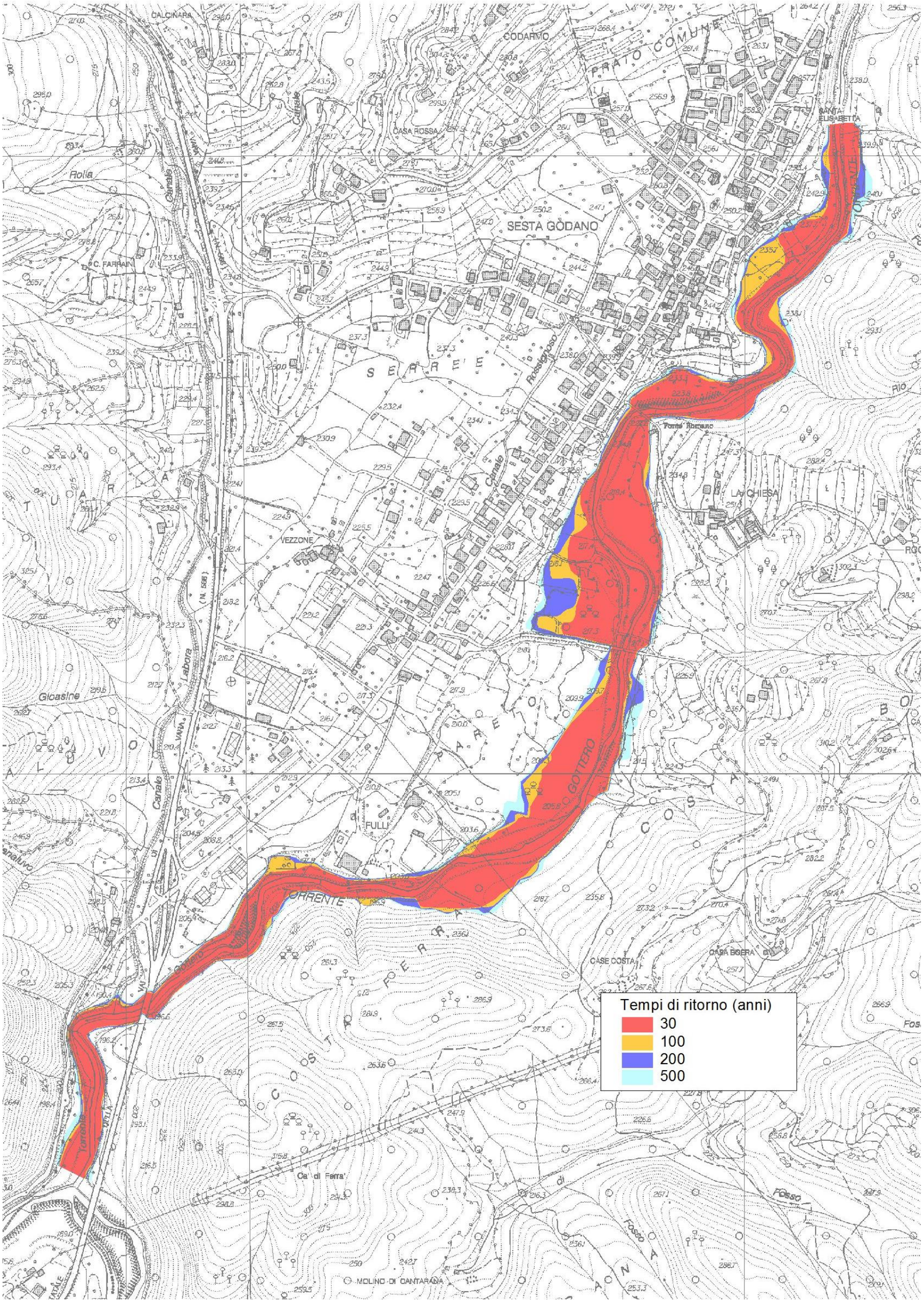


Figura 8-5 - Aree inondabili progetto

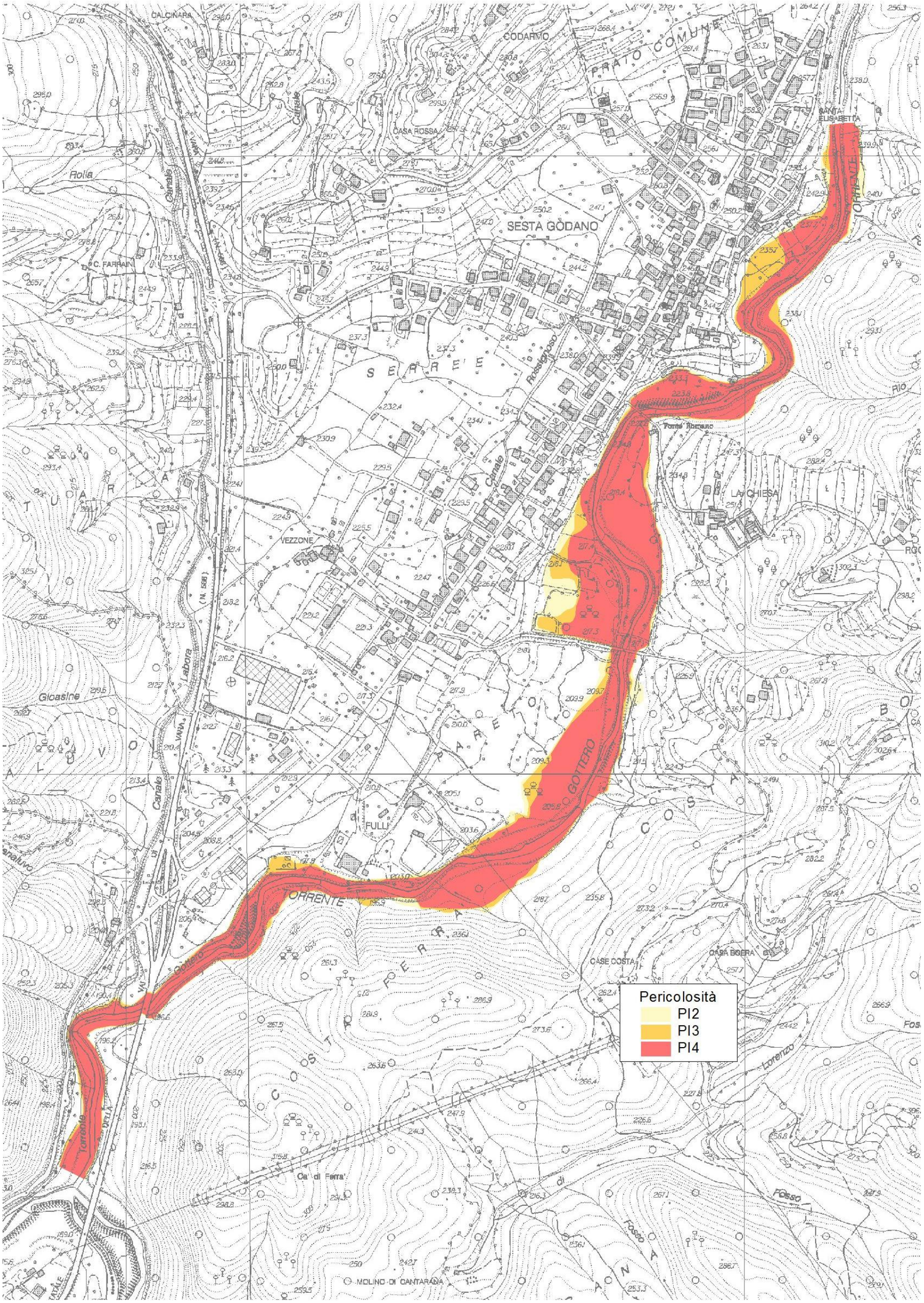


Figura 8-6 - Pericolosità progetto