



**UNIVERSITÀ
DI PARMA**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
E ARCHITETTURA



**Autorità di bacino distrettuale del
fiume Po**

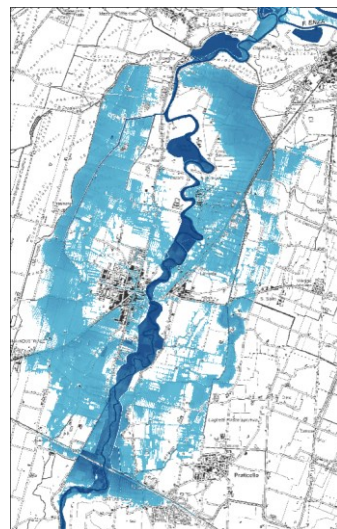
***APPROFONDIMENTO TECNICO-SCIENTIFICO DELLE
CONDIZIONI DI SICUREZZA IDRAULICA DEI
TERRITORI DI PIANURA LUNGO L'ASTA DEL FIUME
PO E DEI SUOI PRINCIPALI AFFLUENTI.
ASTA DEL TORRENTE ENZA***

SECONDO PIANO OPERATIVO ANNUALE (POA2019)

***RELAZIONE
SULLE ATTIVITÀ DI STUDIO 2 e 3***

***Simulazioni, mediante modello 2D, di
scenari di allagamento connessi a
cedimenti arginali***

***Simulazioni, mediante modello 2D, di
scenari di allagamento connessi a
tracimazioni su tratti di argini assunti
inerodibili***



Responsabile scientifico UniPr: Prof. Paolo Mignosa, Ing. Renato Vacondio

Gruppo di lavoro:

UniPr: Ing. Susanna Dazzi, Ing. Alessia Ferrari

AdBPo: Ing. Andrea Colombo, Ing. Laura Zoppi

Parma, ottobre 2020

Sommario

Introduzione	1
1 Richiami sul modello 2D dell'asta del torrente Enza	3
1.1 Premessa	3
1.2 Il modello numerico utilizzato	3
1.3 Il modello 2D dell'asta del torrente Enza	3
2 Costruzione del modello dei comparti in destra e sinistra idraulica del torrente Enza	5
2.1 Premessa	5
2.2 Inquadramento dell'area di studio	5
2.3 Rilievi disponibili e principali elaborazioni.....	7
2.4 Generazione della griglia multi-risoluzione	10
2.5 Scelta della scabrezza.....	12
2.6 Condizioni al contorno	12
3 Simulazioni di scenari di allagamento connessi a brecce arginali in posizioni prefissate.....	14
3.1 Posizioni e caratteristiche delle brecce	14
3.2 Metodologia utilizzata.....	15
3.3 Brecce in sinistra idraulica.....	17
3.4 Brecce in destra idraulica	23
3.5 Inviluppo di tutte le brecce e aree allagate	29
3.6 Velocità idriche	32
3.7 Pericolosità	34
3.8 Tempi di arrivo.....	36
3.9 Volumi esondati.....	37
3.10 Centri abitati.....	38
3.11 Considerazioni conclusive	40
4 Simulazioni di scenari di allagamento connessi a brecce arginali nell'ipotesi di argini inerodibili	44
4.1 Premessa	44
4.2 Idrogrammi sintetici SDH con argini inerodibili	45
4.3 Confronto con esondazioni nell'ipotesi di argini erodibili	48
4.4 Confronto con idrogrammi derivati dalle copule.....	51
4.5 Considerazioni conclusive	58
5 Conclusioni.....	61
6 Ringraziamenti	63
7 Bibliografia	64
APPENDICE A. Modello numerico.....	65
APPENDICE B. Mappe delle massime profondità idriche per le brecce con TR 200 e 20 anni	66
APPENDICE C. Mappe dei tempi di arrivo per le brecce con TR 500 anni	78
APPENDICE D. Elenco materiale allegato	84

Introduzione

Si riporta di seguito la relazione finale sulla seconda parte delle attività svolte nell'ambito del secondo Piano Operativo Annuale (POA 2019) di attuazione del protocollo d'intesa tra l'Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po (AdBPo) e il Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università degli Studi di Parma (DIA) per "l'approfondimento tecnico-scientifico delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta del fiume Po e dei suoi principali affluenti". Nel seguito questo sarà indicato come "presente POA" o "POA 2019", mentre eventuali riferimenti al POA relativo alla prima annualità [1] saranno indicati come "primo POA" o "precedente POA" o "POA 2018".

L'incarico prevedeva lo svolgimento delle seguenti attività:

1. Simulazioni, mediante modello 2D, degli scenari di arretramento delle arginature, di abbassamento dei piani golenali e di riduzione della scabrezza;
2. Simulazioni, mediante modello 2D, di scenari di allagamento connessi a cedimenti arginali;
3. Simulazioni, mediante modello 2D, di scenari di allagamento connessi a tracimazioni su tratti di argini assunti inderodibili.

Nel presente documento sono descritti i risultati delle attività relative attività 2 e 3 previste dal POA 2019, mentre l'attività 1 è stata oggetto di una relazione precedente [2].

Le analisi condotte nel POA 2018 hanno evidenziato che, allo stato attuale, il tratto arginato del torrente Enza non è in grado di convogliare in sicurezza le onde di piena con probabilità di accadimento medio-bassa (tempi di ritorno di 100, 200 e 500 anni). Per questi scenari si verificano infatti tracimazioni degli argini, che porterebbero con ogni probabilità alla progressiva erosione degli argini stessi e al conseguente rilascio della massa idrica a tergo, con allagamenti nelle aree circostanti, caratterizzate da quote soggiacenti a quelle corrispondenti ai livelli di piena del torrente. Per valutare il possibile impatto di scenari di questo tipo nei territori limitrofi e, soprattutto, per individuare i tiranti idrici massimi, le velocità ed i tempi di arrivo del fronte di allagamento, è necessario procedere

alla simulazione numerica del fenomeno di inondazione conseguente all'apertura di una o più brecce. Inoltre, anche per eventi di tempo di ritorno più basso (20-50 anni), si possono talvolta verificare cedimenti arginali per cause diverse dal sormonto, come è successo sul fiume Secchia in occasione dell'evento del 19 gennaio 2014 e come stava per accadere nella medesima giornata anche sul fiume Panaro [3]. Per questo motivo, non sono da trascurare le possibili esondazioni dovute a brecce che si innescano durante eventi di piena con probabilità di accadimento più alta.

Nell'ambito del presente studio è stato ampliato il modello idraulico bidimensionale disponibile per il torrente Enza, includendo le aree potenzialmente allagabili in destra e sinistra idraulica descritte sulla base dei più recenti dati topografici disponibili. Il modello è stato utilizzato per le successive simulazioni numeriche di allagamenti conseguenti a brecce arginali ipotetiche, che hanno la finalità di fornire una valutazione complessiva della pericolosità idraulica nei territori limitrofi al torrente Enza.

Inoltre, è stata simulata anche la propagazione di onde di piena con elevato tempo di ritorno (200 e 500 anni) nell'ipotesi di arginature inerodibili, al fine di quantificare i volumi effettivamente non contenibili in alveo e i conseguenti allagamenti sul territorio.

Nella presente relazione, in particolare, i Capitoli 1 e 2 sono dedicati alla descrizione del modello idraulico, mentre nel Capitolo 3 sono riportati i risultati delle simulazioni relative a posizioni di breccia prefissate. Nel Capitolo 4 sono invece mostrati i risultati delle simulazioni con argini inerodibili e confrontati con quelli di una simulazione effettuata nell'ipotesi di arginature erodibili in caso di sormonto (brecce non in posizioni predefinite) e con quelli di simulazioni effettuate utilizzando una diversa tipologia di idrogrammi a parità di tempo di ritorno. Le conclusioni sono tratte nell'ultimo Capitolo.

1 Richiami sul modello 2D dell'asta del torrente Enza

1.1 Premessa

Nel presente capitolo sono richiamate molto brevemente alcune informazioni sulla modellazione dell'asta del torrente Enza oggetto di studio, ossia il tratto che si estende per oltre 30 km a partire dall'uscita dal sistema di casse d'espansione fino alla confluenza in Po. Per maggiori dettagli si rimanda alla relazione tecnica relativa al POA precedente [1].

1.2 Il modello numerico utilizzato

Per effettuare tutte le simulazioni bidimensionali descritte nella presente relazione è stato utilizzato il codice PARFLOOD [4]-[5], sviluppato presso il DIA dell'Università degli Studi di Parma (si veda l'APPENDICE A per una breve descrizione del modello).

1.3 Il modello 2D dell'asta del torrente Enza

Nell'ambito del POA 2018 era già stato realizzato e tarato un modello bidimensionale del tratto di interesse del torrente Enza [1].

La batimetria era stata inizialmente ottenuta a partire dall'unione di tre diversi rilievi LiDAR a passo 1 m, risalenti al 2008 e al 2014 e realizzati per conto del Ministero dell'Ambiente (MATTM) e dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo). Al fine di ridurre il numero di celle di calcolo e di conseguenza l'onere computazionale delle simulazioni, il DTM complessivo così ottenuto era stato poi sotto-campionato su una griglia regolare di 2 m di lato. Erano state inoltre apportate alcune importanti correzioni alla batimetria, in particolare riguardanti:

- le quote terreno dell'alveo inciso (sulla base delle sezioni disponibili);
- le quote della golena in una ex-zona di cava (tra Casaltone e Sorbolo);
- le quote di contenimento arginale lungo tutta l'asta di interesse (sulla base di un recente rilievo topografico di AIPo).

I valori dei coefficienti di scabrezza da adottare per la modellazione erano stati definiti a seguito di una procedura di calibrazione sulla base dell'evento del dicembre 2017, e successivamente verificati sulla base dell'evento del marzo 2018. Il set così determinato è il seguente (coefficienti secondo Strickler):

- 1° tratto (valle cassa – S. Ilario/ferrovia): alveo $k_s = 25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 17 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $13 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- 2° tratto (ferrovia – valle Sorbolo): alveo $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $11.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$;
- 3° tratto (valle Sorbolo – golena Po): alveo $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene non vegetate $k_s = 11 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, golene vegetate $8.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Nella prima parte del presente POA [2] sono stati analizzati alcuni scenari di progetto per il miglioramento dell'efficienza idraulica dell'asta del torrente Enza, a seguito di modifiche alla batimetria e alla scabrezza. Per gli scenari considerati in questa fase, invece, si farà riferimento unicamente allo "stato attuale".

2 Costruzione del modello dei comparti in destra e sinistra idraulica del torrente Enza

2.1 Premessa

Al fine di mappare diversi scenari di allagamento conseguenti a rotte arginali tramite modellazione numerica 2D, è necessario costruire un modello comprendente sia l'asta del torrente Enza sia i comparti allagabili esterni. Nel presente capitolo, sono descritte nel dettaglio le principali elaborazioni effettuate al fine di allestire tale modello.

2.2 Inquadramento dell'area di studio

L'area di studio (Figura 2-1) comprende i comparti in sinistra e destra idraulica del torrente Enza, da valle dell'uscita delle casse d'espansione.

In sinistra idraulica, il comparto è delimitato a Ovest dalle arginature del torrente Parma e a Nord da quelle del fiume Po e comprende l'intero territorio del Comune di Sorbolo-Mezzani e parte dei territori dei Comuni di Parma, Torrile e Colorno (Provincia di Parma). L'estensione complessiva è attorno a 200 km².

In destra idraulica, il comparto è delimitato a Nord dalle arginature maestre del fiume Po e a Est da quelle del torrente Crostolo. I Comuni interessati sono: Brescello, Boretto, Gualtieri, Poviglio, Castelnovo di Sotto, Gattatico, Campegine, Sant'Ilario d'Enza (Provincia di Reggio Emilia). L'estensione complessiva è attorno a 250 km².

Buona parte di questo ampio territorio ricade all'interno della perimetrazione dell'Area a Potenziale Rischio Significativo di Alluvione (Areas of Potential Significant Flood Risk – APSFR) del fiume Enza per lo scenario di scarsa probabilità (chiamato anche Scenario L o P1; alluvioni rare), come definito dall'Art. 6 della Direttiva Europea 2007/60/CE "Alluvioni". L'APSFR è identificata nella Figura 2-1.

Negli ultimi decenni, il territorio è stato colpito da eventi alluvionali significativi in due occasioni. Il 10-11 settembre 1972, un'onda di piena originata da piogge di breve durata ma di elevatissima intensità nella parte alta del bacino ha

provocato la tracimazione di entrambi gli argini maestri all'altezza di Casaltone, con conseguenti estesi allagamenti nelle campagne circostanti (circa 5 km² in sinistra idraulica e 13 km² in destra). Più recentemente, il 12 dicembre 2017, il torrente Enza ha rotto l'argine in destra idraulica a Lentigione di Brescello, durante il transito di un'onda di piena di notevole entità (che ha fatto registrare il massimo storico all'idrometro di Sorbolo, pari a 12.47 m), originata dalle piogge intense e prolungate sul bacino idrografico nei due giorni precedenti. L'estensione dell'area allagata è stata di circa 6 km².

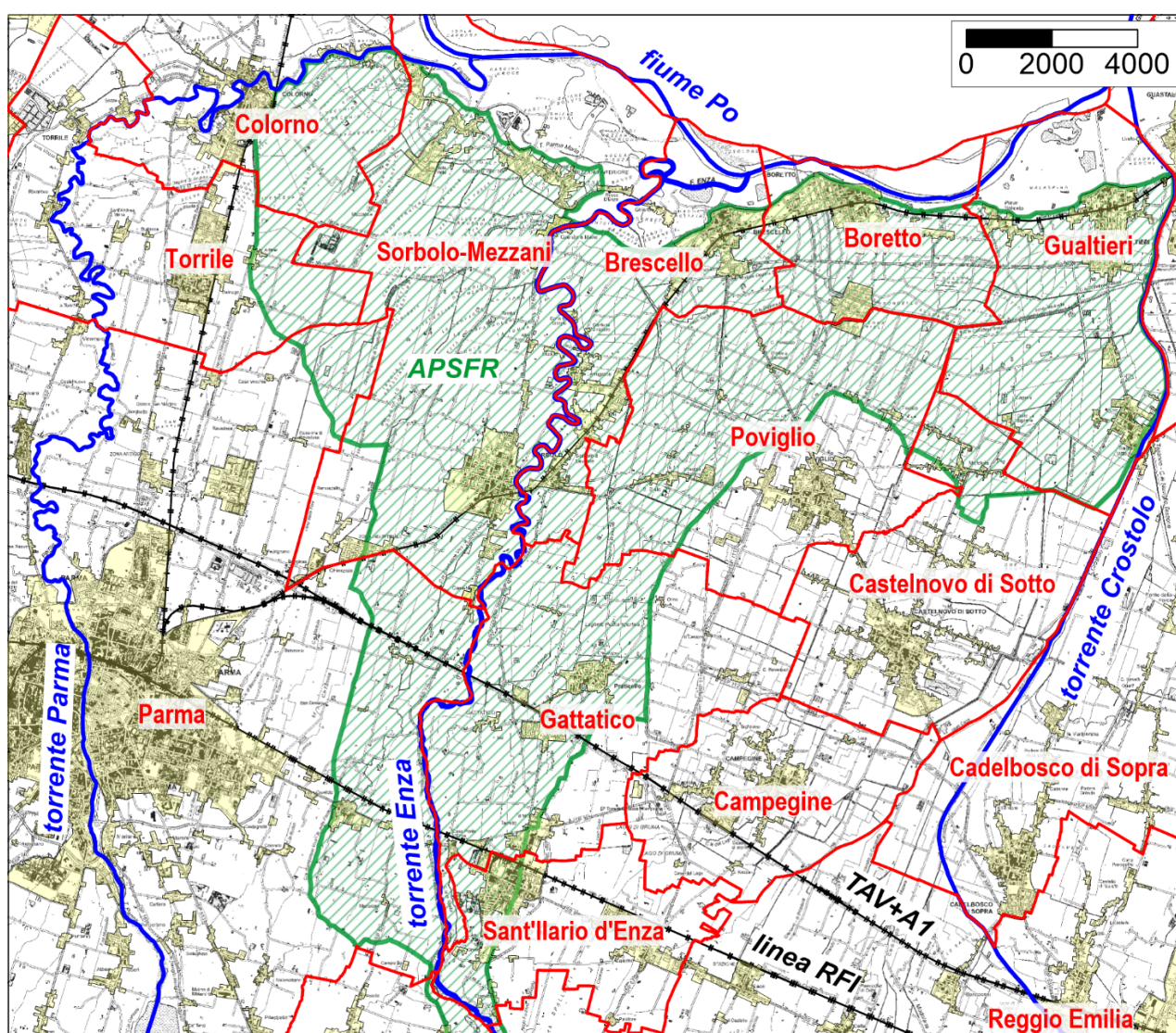


Figura 2-1. Inquadramento dei comparti in destra e sinistra Enza. Sono indicati in rosso i confini comunali, in blu i corsi d'acqua, in giallo i centri urbani principali, e in nero le infrastrutture ferroviarie presenti nel territorio (si noti che l'Autostrada A1 corre parallela alla linea dell'Alta Velocità TAV). L'area verde invece indica l'attuale perimetrazione dell'APSFR del torrente Enza.

2.3 Rilievi disponibili e principali elaborazioni

Come base di partenza è stato utilizzato il DTM derivante dal rilievo Lidar effettuato nel 2008 dal Ministero per l'Ambiente (MATTM), peraltro già impiegato nel POA precedente. Tuttavia, tale rilievo non garantisce una completa copertura del comparto oggetto di studio. In sinistra idraulica del torrente Enza si è quindi fatto ricorso ai DTM derivanti da rilievi Lidar lungo i torrenti Parma e Baganza, commissionati da AIPo nel 2016. In destra idraulica, è stato invece utilizzato il DTM derivante da un rilievo Lidar effettuato nel 2019, sempre per conto di AIPo per studi relativi al torrente Crostolo. Nelle zone di sovrapposizione tra rilievi recenti e DTM "MATTM 2008" sono state privilegiate le informazioni più aggiornate. Infine, in una piccola area a monte dell'attraversamento della SS9 (Via Emilia) è stato utilizzato il DTM di integrazione al rilievo MATTM (risalente al 2014 e anch'esso già impiegato nel POA precedente). Una sintesi della copertura dei rilievi Lidar utilizzati nel presente studio è rappresentata nella Figura 2-2. Il modello 2D esistente per il torrente Enza, derivante dal POA precedente e già opportunamente corretto, è stato unito ai rilievi sopracitati per ottenere un unico DTM dell'intera area di studio. La batimetria risultante è rappresentata nella Figura 2-3. Si noti che sono state escluse alcune aree a monte, ritenute non allagabili in base alle quote del terreno.

Al fine di ridurre l'onere computazionale delle simulazioni, il DTM originario (a passo 1 m) è stato re-interpolato su una griglia regolare a passo 2 m. L'algoritmo adottato per il diradamento consente però di preservare le quote di coronamento degli argini di fiumi e canali e delle infrastrutture in rilevato, in modo da descrivere correttamente questi elementi, che possono rappresentare un ostacolo alla propagazione degli allagamenti.

Infine, è stato riservato un trattamento specifico alle zone urbane ricadenti nell'area di studio. In particolare, è stata adottata la metodologia denominata "Building Hole" [6], che consiste nel rappresentare gli edifici come blocchi impenetrabili, ossia nell'escludere dal dominio le celle della griglia di calcolo ricadenti all'interno dell'impronta al suolo di ciascun edificio. In questo modo, l'allagamento potrà propagarsi solo lungo strade, piazze, parchi e giardini

presenti nel centro abitato. L'adozione di questo metodo è peraltro piuttosto cautelativa poiché trascura il fatto che una quota parte del volume esondato possa penetrare negli edifici e riempire cantine, garage e piani interrati. Nel presente studio sono stati presi in considerazione tutti gli edifici dei principali centri abitati del comparto, mentre sono state trascurate le case sparse. Per l'individuazione dell'impronta al suolo degli edifici si è fatto riferimento ai dati disponibili sul Geoportale della Regione Emilia-Romagna. La Figura 2-4 mostra a titolo di esempio il risultato della procedura di eliminazione degli edifici dal DTM per il centro abitato di Sorbolo.

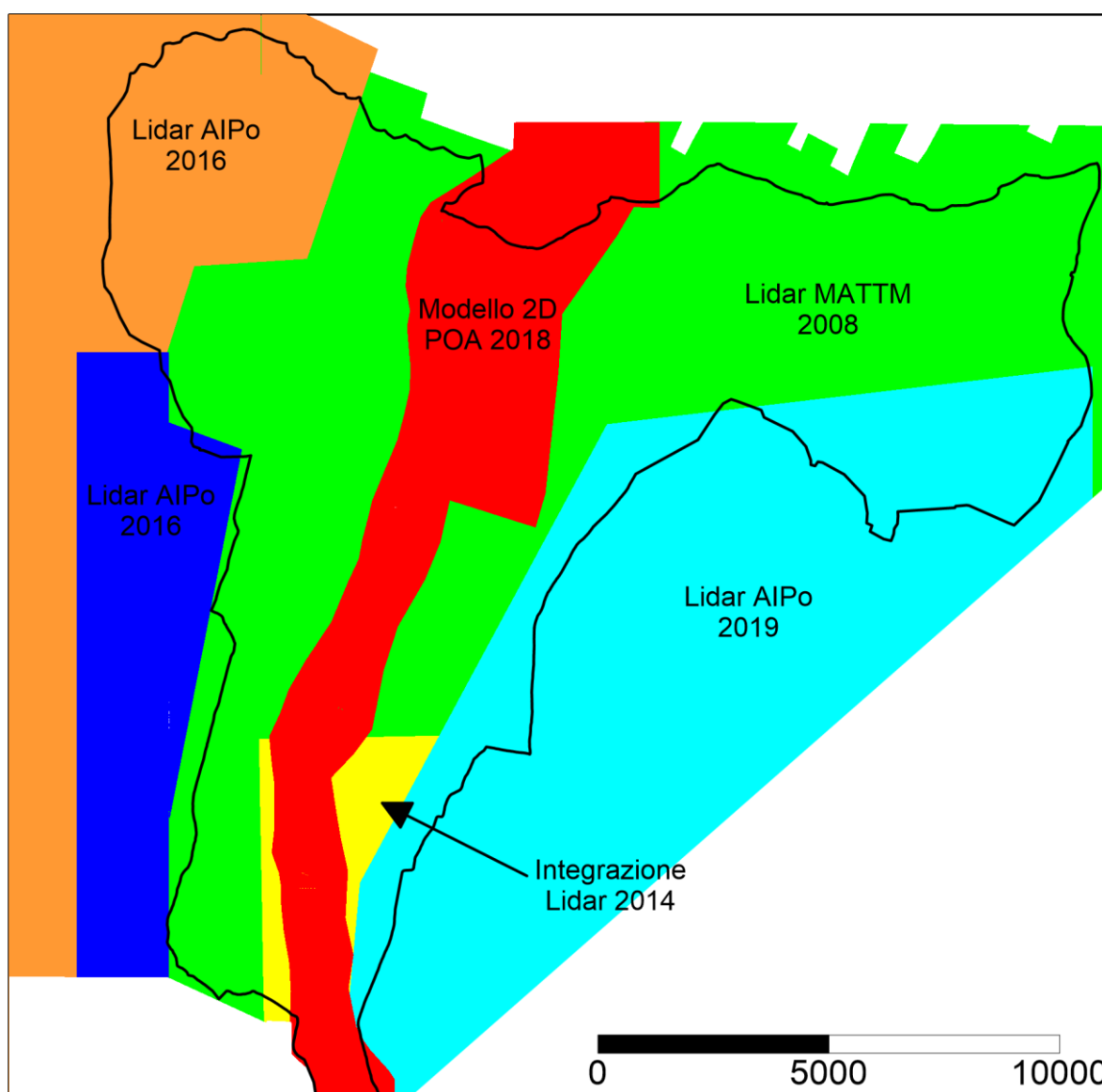


Figura 2-2. Rilievi Lidar nei comparti in destra e sinistra Enza. La linea nera richiama la perimetrazione dell'APSFR del torrente Enza.

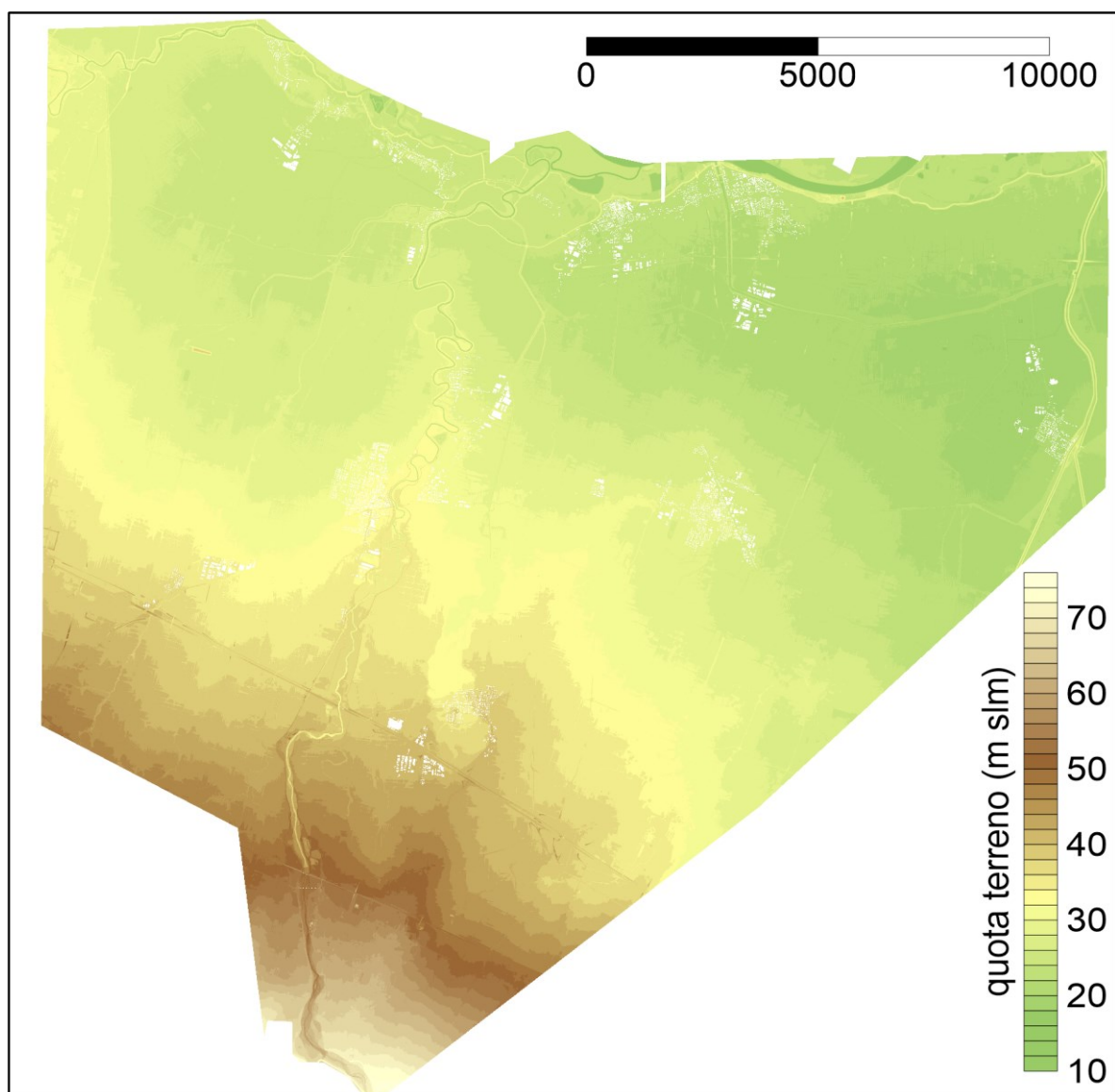


Figura 2-3. Batimetria complessiva dell'area di studio.

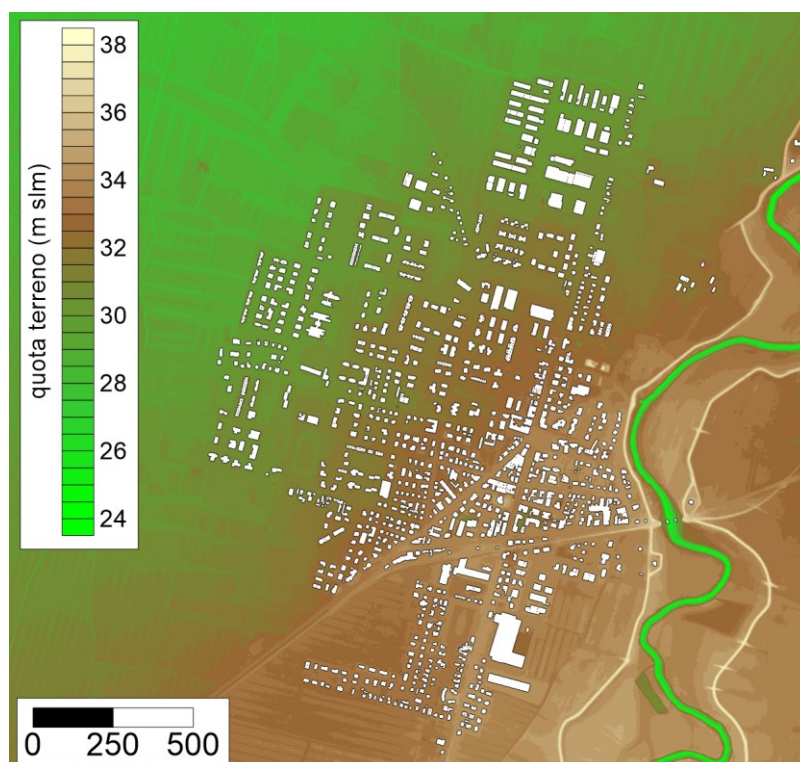


Figura 2-4. Trattamento della zona urbana tramite esclusione degli edifici (in bianco) dal dominio di calcolo: esempio del DTM nel centro abitato di Sorbolo.

2.4 Generazione della griglia multi-risoluzione

La griglia di partenza presenta una risoluzione spaziale uniforme pari a 2 m e comprende circa 88 milioni di celle. Il modello numerico impiegato consente però di generare una griglia di calcolo con una risoluzione spaziale non uniforme, che assecondi il grado di dettaglio desiderato dall'utente nelle diverse parti del dominio. È piuttosto evidente che aree caratterizzate da quote altimetriche poco variabili, quali ad esempio aree agricole, potranno essere discretizzate con celle di dimensioni anche di molto superiori a 2 m (con una quota altimetrica media) senza sostanzialmente modificare i risultati della simulazione.

Per questo motivo, la griglia di calcolo impiegata per le simulazioni del presente studio è caratterizzata da una risoluzione non uniforme, variabile tra 2 m e 16 m, e comprende in totale circa 27 milioni di celle. La griglia è stata ottenuta imponendo il mantenimento della massima risoluzione (2 m) in corrispondenza dei seguenti elementi:

- alveo del torrente Enza, comprese le golene e le arginature;
- centri abitati;
- argini dei canali di bonifica;
- principali rilevati stradali e ferroviari presenti nel comparto;
- area nell'intorno della breccia (per ciascuna simulazione singolarmente).

Nel resto del dominio, il modello genera in automatico una transizione graduale verso le zone a risoluzione più bassa, secondo opportuni criteri [5]. La griglia complessiva è mostrata nella Figura 2-5.

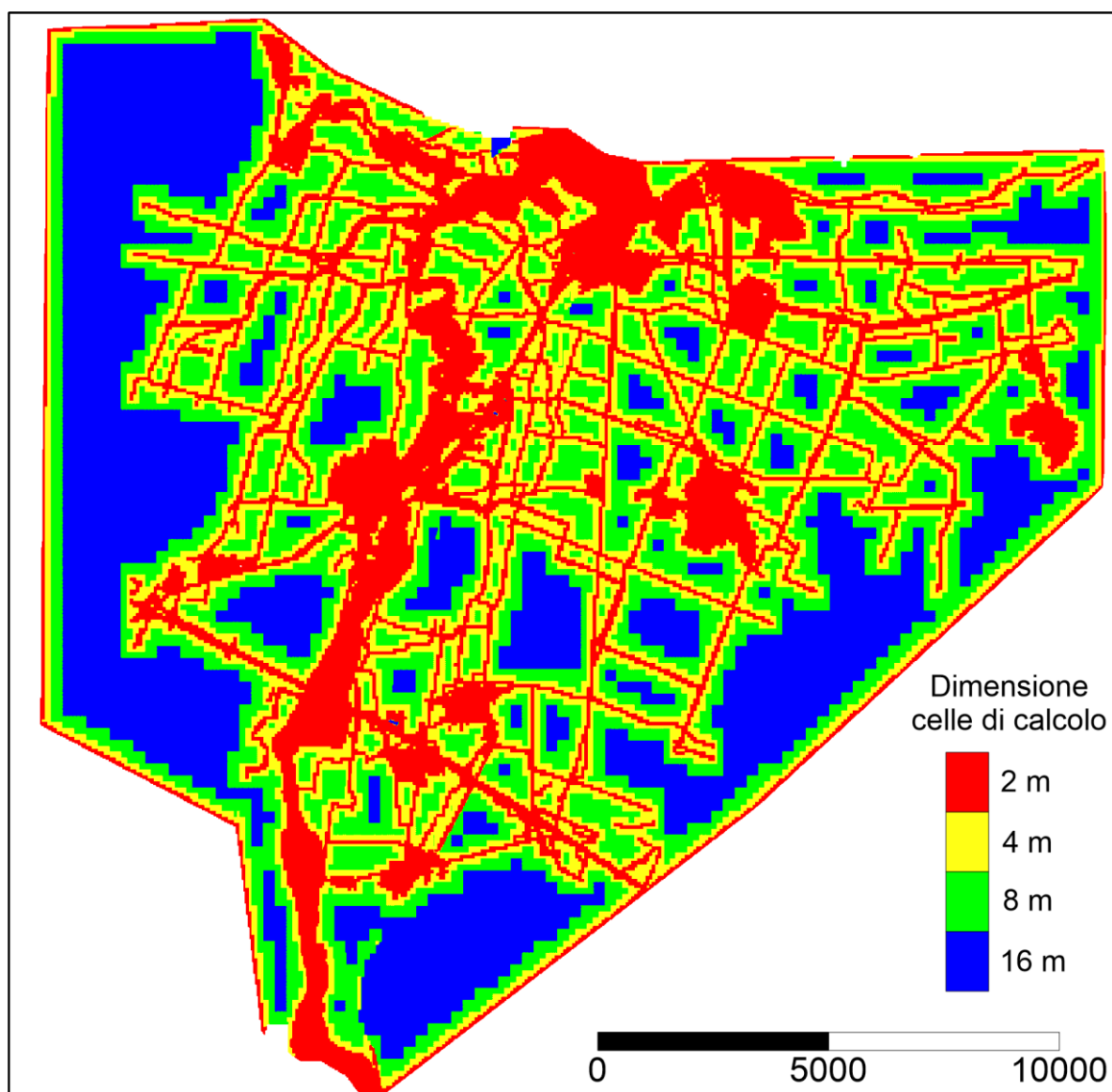


Figura 2-5. Griglia di calcolo multirisoluzione.

2.5 Scelta della scabrezza

Le aree allagabili esterne alle arginature del torrente Enza sono caratterizzate da un uso del suolo simile a quello degli altri comparti di pianura emiliani (aree prevalentemente agricole). Studi precedenti hanno indicato che un valore del coefficiente di scabrezza secondo Strickler k_s pari a $20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ era in grado di garantire una buona riproduzione dell'allagamento conseguente alla rotta arginale del fiume Secchia del gennaio 2014 [7]. Si è quindi ritenuto di poter adottare, anche per l'area oggetto di studio, il medesimo coefficiente di scabrezza, che ricade nel range indicativo di valori forniti in letteratura sulla base dell'uso del suolo. Peraltro, la stessa assunzione era stata fatta nel POA 2018 per la ricostruzione dell'evento del dicembre 2017 [1].

Per le aree urbanizzate la resistenza aggiuntiva causata dalla presenza degli edifici è tenuta in conto intrinsecamente dal metodo "Building Hole", senza la necessità di incrementare il coefficiente di scabrezza.

2.6 Condizioni al contorno

Per le simulazioni delle brecce sul torrente Enza, la condizione al contorno di monte è rappresentata dagli idrogrammi di portata a valle delle casse d'espansione con tempo di ritorno pari a 20, 200 e 500 anni (Figura 2-6). Tali idrogrammi sono stati desunti dalle attività del POA 2018 [1]: in breve, sono stati ricavati dalla simulazione 1D della propagazione e laminazione, attraverso il sistema di casse d'espansione, degli idrogrammi sintetici (Synthetic Design Hydrographs, SDH), costruiti secondo il metodo proposto da Tomirotti e Mignosa (2017) [8] e forniti da ARPAE [9] per la sezione a valle della confluenza Termina-Masdone. La scelta dei tempi di ritorno è stata concordata con AdBPo.

A valle, si è imposto un livello di morbida del fiume Po, costante e pari a 22 m s.l.m., al fine di escluderne l'influenza sui risultati. Infatti, simulare l'effetto di una piena di Po su una breccia nel tratto terminale del torrente Enza richiederebbe di creare un modello idraulico del Po stesso, che esula dagli scopi di questo lavoro.

Per tutto il resto del contorno del dominio è stata assunta una condizione al contorno di parete insormontabile. Poiché tale contorno non viene mai raggiunto dal fronte di allagamento, questa condizione è irrilevante.

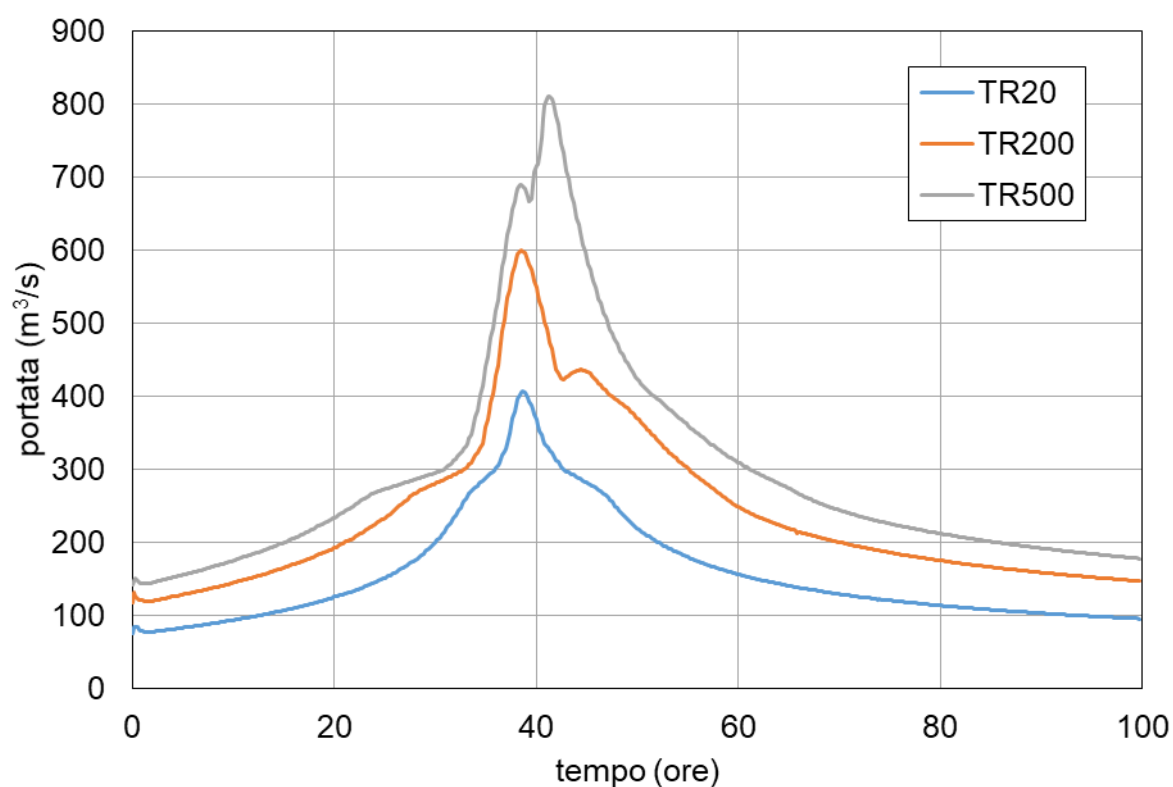


Figura 2-6. Idrogrammi sintetici con assegnato tempo di ritorno imposti come condizioni al contorno di monte.

3 Simulazioni di scenari di allagamento connessi a brecce arginali in posizioni prefissate

3.1 Posizioni e caratteristiche delle brecce

Sono state individuate 6 posizioni in corrispondenza delle quali ipotizzare l'apertura di una breccia in destra idraulica e altrettante in sinistra idraulica (totale 12 brecce). Le brecce sono numerate da 1 a 6 partendo da monte verso valle (con suffisso "SX" o "DX"), e la loro posizione è mostrata nella Figura 3-1. È stato considerato il tratto di torrente protetto da argini maestri, che si estende da monte dell'attraversamento dell'Autostrada A1 fino alla sezione di Coenzo (circa 16 km lungo le arginature).

Le brecce sono distanziate tra loro di circa 3-4 km, in modo da esplorare diversi possibili scenari di allagamento. Sia in destra sia in sinistra idraulica, la Breccia 1 è posizionata immediatamente a monte dell'attraversamento dell'A1, mentre la Breccia 2 è collocata nella zona di Casaltone. Le Brecce 3 e 4 sono poste rispettivamente a monte e a valle di Sorbolo, mentre la Breccia 5 è in corrispondenza di Lentigione (in destra coincide con la rotta del dicembre 2017). Infine, la Breccia 6 è collocata nel tratto terminale del torrente, a monte di Coenzo; in particolare, in sinistra idraulica la breccia si apre a valle dell'immissione del Canale Fumolenta.

Per tutte le brecce si è ipotizzata una forma trapezia, con una quota che varia gradualmente nel tempo a partire dalla quota del coronamento arginale fino a raggiungere quella del piano campagna circostante, e con una larghezza finale assunta pari a 100 m, in analogia con studi pregressi del DIA su altri affluenti emiliani del Po [10]. Anche per quanto riguarda l'evoluzione temporale della breccia, ossia il tempo necessario al raggiungimento della larghezza finale, si è fatto riferimento alle ipotesi effettuate in precedenti studi del DIA [10]: il tempo di apertura della breccia è stato assunto pari a 6 ore per lo scenario idrologico meno gravoso (20 anni) e pari a 3 ore per quelli più gravosi (200 e 500 anni). Inoltre, si è assunto che l'inizio dell'apertura di una generica breccia avvenisse nell'istante in cui il colmo della piena transita in corrispondenza della sezione della breccia stessa, oppure nell'istante dell'eventuale sormonto dell'arginatura.

Gli istanti di innesco (e le corrispondenti condizioni iniziali per le simulazioni degli scenari di allagamento conseguenti alle varie brecce) sono desunti dai risultati delle simulazioni preliminari già effettuate nel POA 2018 [1].

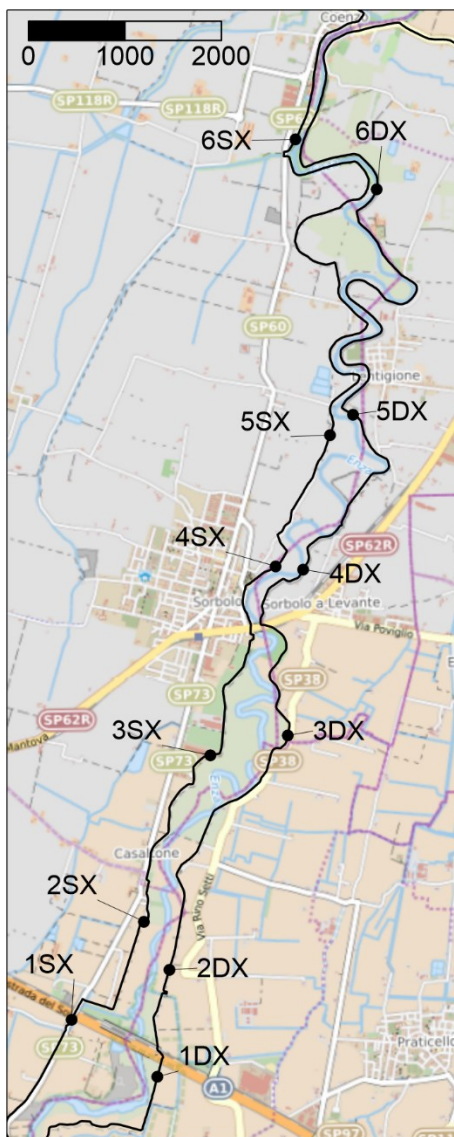


Figura 3-1. Posizione delle brecce lungo il torrente Enza.

3.2 Metodologia utilizzata

Per ciascuna simulazione, caratterizzata da una diversa posizione della breccia e tempo di ritorno, valgono le assunzioni modellistiche espresse in precedenza. Tutte le simulazioni sono state prolungate per 72 ore a partire dall'istante di

apertura della breccia, e i risultati sono stati restituiti con scansione oraria. Va sottolineato che nelle simulazioni non sono ovviamente stati tenuti in considerazione interventi emergenziali di alcun tipo (sacchettature, pompaggi, apertura di rotte di rientro in arginature di canali, interventi di ripristino delle arginature volti a ridurre la portata uscente della breccia, ecc.). Inoltre, è stata trascurata l'analisi dettagliata del comportamento del reticolo di bonifica, che dipende anche dalla configurazione degli organi manovrabili (paratoie), dal riempimento iniziale dei canali, dalla stagione (irrigua o meno). Infine, si è ipotizzato che, qualora uno o più tratti di argine vengano sormontati in una posizione diversa da quella della breccia ipotizzata, questi non generino ulteriori brecce, ossia si comportino come inderodibili (ipotesi di breccia singola); l'allagamento conseguente a tali eventuali tracimazioni non è stato analizzato nel dettaglio in questa fase, anche se può essere osservato nei risultati presentati. Si precisa che, in alcuni casi, l'ipotesi di mancata rottura in tali tratti è piuttosto irrealistica, alla luce dell'entità e durata dei sormonti. Sarebbe tuttavia ancora più irrealistico ipotizzare un contenimento fittizio dell'onda di piena lungo l'intera asta, dal momento che non sono previsti interventi di rialzo arginale nel prossimo futuro: in tal caso, si sovrastimerebbe il volume di piena che raggiunge la sezione della rotta simulata e che quindi può fuoriuscire dalla breccia.

Le simulazioni complessivamente effettuate sono 36, relative alle 12 posizioni di breccia individuate (6 in destra e 6 in sinistra) ed ai 3 diversi scenari idrologici. Per ciascuna simulazione, sono stati restituiti i seguenti prodotti (in formato digitale):

- a) Animazione dell'evoluzione temporale dell'allagamento, in cui vengono rappresentati con scansione oraria i tiranti idrici raggiunti sul territorio (il file allegato ha nome generico `Filmato_BRE_TR_Enza.mp4`);
- b) Mappa della massima profondità idrica, espressa in m (il file allegato ha nome generico `Enza_TR_Breccia_MAXTIRANTE.tif`);
- c) Mappa della massima velocità idrica in modulo, espressa in m/s (il file allegato ha nome generico `Enza_TR_Breccia_MAXVEL.tif`);

d) Mappa della massima profondità totale, espressa in m: tale grandezza è intesa come un indice sintetico di pericolosità idraulica complessiva, basato sulla combinazione dei valori contemporanei di altezza idrica e velocità, ed è meglio descritta al paragrafo 3.7 (il file allegato ha nome generico Enza_TR_Breccia_MAXPROFTOT.tif);

e) Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento, espressi in ore (il file allegato ha nome generico: Enza_TR_Breccia_TEMPOARR.tif).

Si noti che le mappe b-c-d non si riferiscono ad alcun istante temporale, ma rappresentano l'involuppo delle profondità idriche, velocità e profondità totali raggiunte, in generale, in istanti diversi.

Le mappe b-c-d-e relative a tutte le simulazioni effettuate sono disponibili in formato digitale come mappe raster (GeoTiff), georeferenziate nel sistema UTM32-ED50, e sono visualizzabili con l'ausilio di un qualsiasi applicativo GIS.

Oltre al materiale fornito in formato digitale, alcune mappe dei risultati sono restituite anche in formato grafico. Nella rappresentazione, le scale di colore sono state definite in modo da mettere in luce le differenze nel comparto allagato, trascurando invece una rappresentazione dettagliata del campo di moto all'interno del fiume. Ad esempio, nelle mappe relative alle profondità idriche, i valori superiori a 3 m, se presenti, sono stati tutti raggruppati in un unico colore rosso. Lo stesso vale per le profondità totali superiori a 2 m e per le velocità idriche superiori a 1.6 m/s. Sono inoltre limitate a 48 ore le scale di colore dei tempi d'arrivo.

Una selezione dei risultati principali è rappresentata anche nella presente relazione, mentre l'elenco completo del materiale allegato è riportato nell'APPENDICE D.

3.3 Brecce in sinistra idraulica

Nel presente paragrafo sono descritte in sintesi le principali caratteristiche degli allagamenti dovuti a brecce in sinistra idraulica.

L'area interessata dall'allagamento per la **Breccia 1 SX** è rappresentata nella Figura 3-2a in termini di mappa dei massimi tiranti idrici per lo scenario TR 500 anni. Il volume idrico che fuoriesce dalla breccia si addossa al rilevato dell'autostrada A1 in direzione Ovest e, una volta raggiunto un tirante idrico sufficiente, sormonta l'A1 (ma non la ferrovia TAV ad essa parallela). Una piccola parte di tale volume può però transitare a valle del rilevato attraverso i sottopassi presenti. L'allagamento si propaga poi in direzione Nord, "mescolandosi" con quanto tracima dall'arginatura sinistra nel tratto critico di Casaltone. Infatti, l'apertura della Breccia 1 SX non è sufficiente a scongiurare la tracimazione di tratti di arginatura più a valle: in particolare, si osservano sormonti in destra idraulica a monte dell'A1, a Casaltone in sinistra e a Lentigione in destra, oltre a qualche ulteriore piccola tracimazione all'altezza di Casaltone in destra, a Sorbolo e in alcuni altri punti isolati. Si rimanda al paragrafo 4.2 per una mappatura di dettaglio dei tratti di argine sormontati.

Per questo scenario, il rilevato della linea ferroviaria Parma-Suzzara (parallelo a Via Mantova) contribuisce a proteggere dall'allagamento la zona industriale di Bogolese e la parte settentrionale del centro abitato di Sorbolo, che viene solo lambito lungo i confini Sud e Ovest. Successivamente l'allagamento si incanala verso Nord, rimanendo confinato a Ovest dal Canale Naviglio, fino ad interessare il centro abitato di Coenzo; l'acqua si accumula infatti tra Canale Naviglio, Canalazzo Terrieri e Canale Fumolenta, con tiranti idrici fino a 1.5 m, oltre che a Sud del Canale Fumolenta.

Nel caso dello scenario TR 200 anni (Figura B-1 in APPENDICE B), l'area allagata è molto inferiore in virtù del minor volume esondato. La dinamica generale dell'allagamento è simile, ma le profondità idriche si mantengono di poco inferiori a 50-60 cm, ad eccezione delle aree a tergo del rilevato autostradale, dove si raggiungono valori massimi di 1.2-1.3 m. L'allagamento non raggiunge Coenzo a valle. Inoltre, le tracimazioni in altri tratti dell'arginatura sono modestissime. Per lo scenario con TR 20 anni (Figura B-1), il volume che fuoriesce dalla breccia (che non si apre per sormonto) è talmente esiguo che l'allagamento rimane confinato ad una piccola area a tergo dell'autostrada e può propagarsi verso

Nord solo tramite un fornice. I tiranti a valle del rilevato sono modesti, per cui la propagazione non supera la ferrovia Parma-Suzzara.

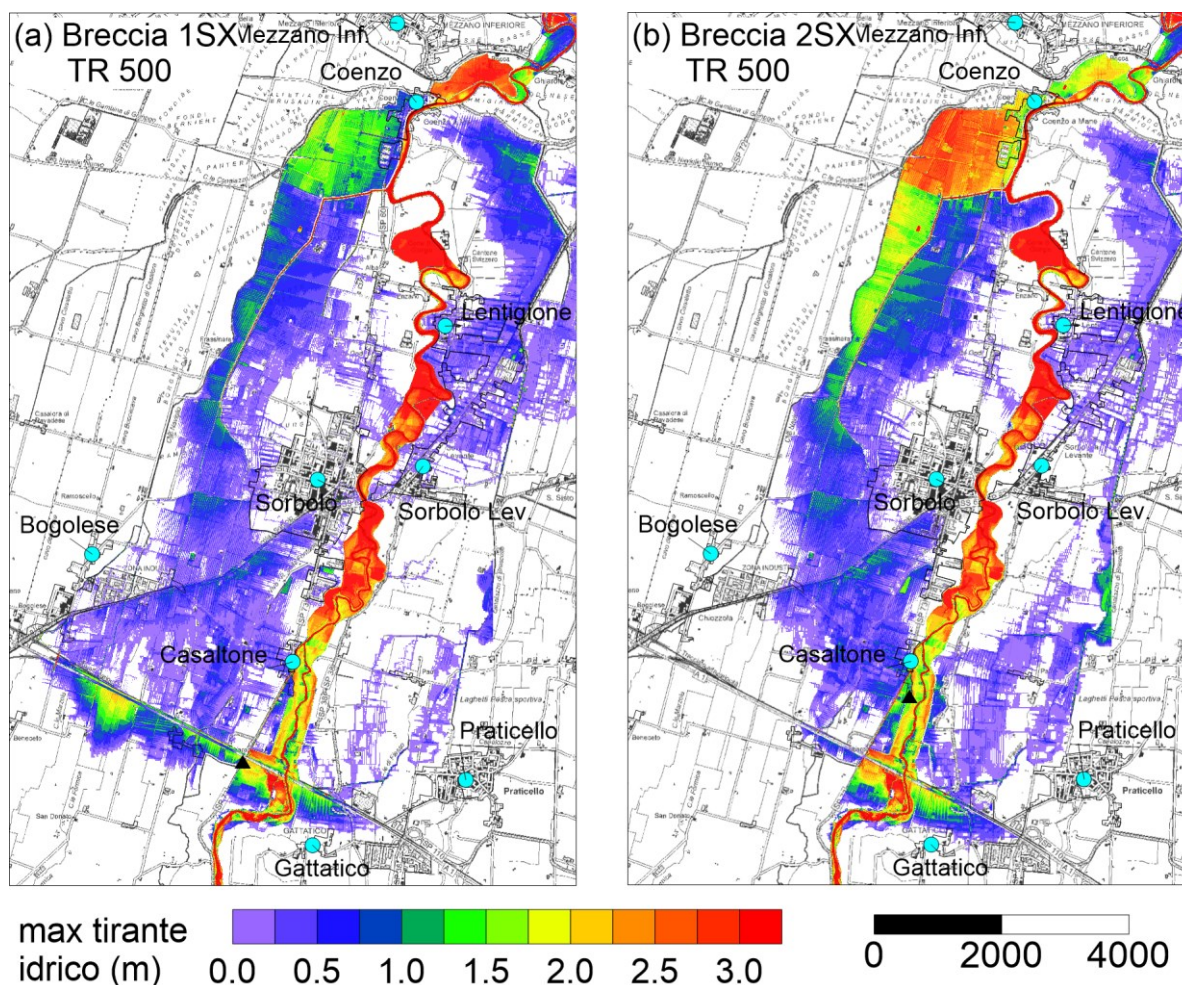


Figura 3-2. Mappa della massima profondità idrica per le Brecce (a) 1 SX e (b) 2 SX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

La Figura 3-2b rappresenta la mappa della massima profondità idrica ottenuta dalla simulazione relativa alla **Breccia 2 SX** per lo scenario TR 500 anni. L'acqua si accumula fra l'argine e il rilevato della SP73, fino a superare quest'ultimo. L'allagamento si propaga in direzione Nord, interessando il centro abitato di Casaltone, e risultando in parte ostacolato dal rilevato della linea ferroviaria Parma-Suzzara. La dinamica successiva è simile a quella riscontrata per la Breccia 1 SX, ma i livelli massimi risultano più elevati a causa del maggiore volume esondato: nella zona di accumulo tra gli argini dei canali del reticolo

idrografico minore si raggiungono tiranti di 2.5-3 m e viene interessato il centro abitato di Coenzo. Nonostante la breccia, si osservano comunque tracimazioni in destra idraulica.

Nel caso dello scenario con TR 200 anni (Figura B-2 in APPENDICE B), la simulazione fornisce risultati simili allo scenario precedente, ma con tiranti idrici inferiori e senza tracimazioni in sinistra. Infine, per lo scenario TR 20 anni (Figura B-2), il volume esondato è molto più modesto e viene in parte trattenuto a monte della ferrovia Parma-Suzzara e in parte da alcuni rilevati successivi.

La **Breccia 3 SX** è collocata poco a monte di Sorbolo e l'allagamento conseguente a tale rottura investe il centro abitato (si veda la Figura 3-3a, relativa ai massimi tiranti per lo scenario con TR 500 anni). Anche per questa breccia si riscontrano tiranti molto elevati (>3 m) nell'area delimitata dai Canali Naviglio, Terrieri e Fumolenta, al punto che l'acqua risale attraverso il reticolo idrografico minore ed esonda verso Ovest sia in destra sia in sinistra del Canalazzo Terrieri. Oltre a qualche modesto sormonto a Lentigione in destra permangono tracimazioni a monte della breccia ipotizzata, che vanno a mescolarsi con il volume esondato dalla breccia stessa.

Per gli scenari con tempo di ritorno inferiore (Figura B-3 in APPENDICE B), la dinamica è simile ma con il volume idrico trattenuto a Est del Canale Naviglio e tiranti inferiori (solo leggermente minori per TR 200 anni; molto inferiori per TR 20 anni).

La Figura 3-3b rappresenta la mappa delle massime profondità idriche per la **Breccia 4 SX** nello scenario TR 500 anni. L'allagamento è tale da formare, anche in questo caso, un "lago" nell'area delimitata dagli argini dei Canali Naviglio e Terrieri e dall'argine sinistro dell'Enza, con tiranti idrici fino a 3 m nei punti più depressi. Risulta inoltre interessata la zona Nord del centro abitato di Sorbolo. Si riscontrano comunque notevoli tracimazioni in molti tratti a monte della breccia e anche in destra idraulica.

Per lo scenario con TR 200 anni (Figura B-4 in APPENDICE B), i tiranti idrici massimi si raggiungono nell'area in destra del Canale Fumolenta, mentre tra quest'ultimo e il Canale Naviglio le profondità si mantengono inferiori a 1 m.

Adirittura, per lo scenario con TR 20 anni (Figura B-4), l'allagamento è completamente confinato dal Canale Fumolenta.

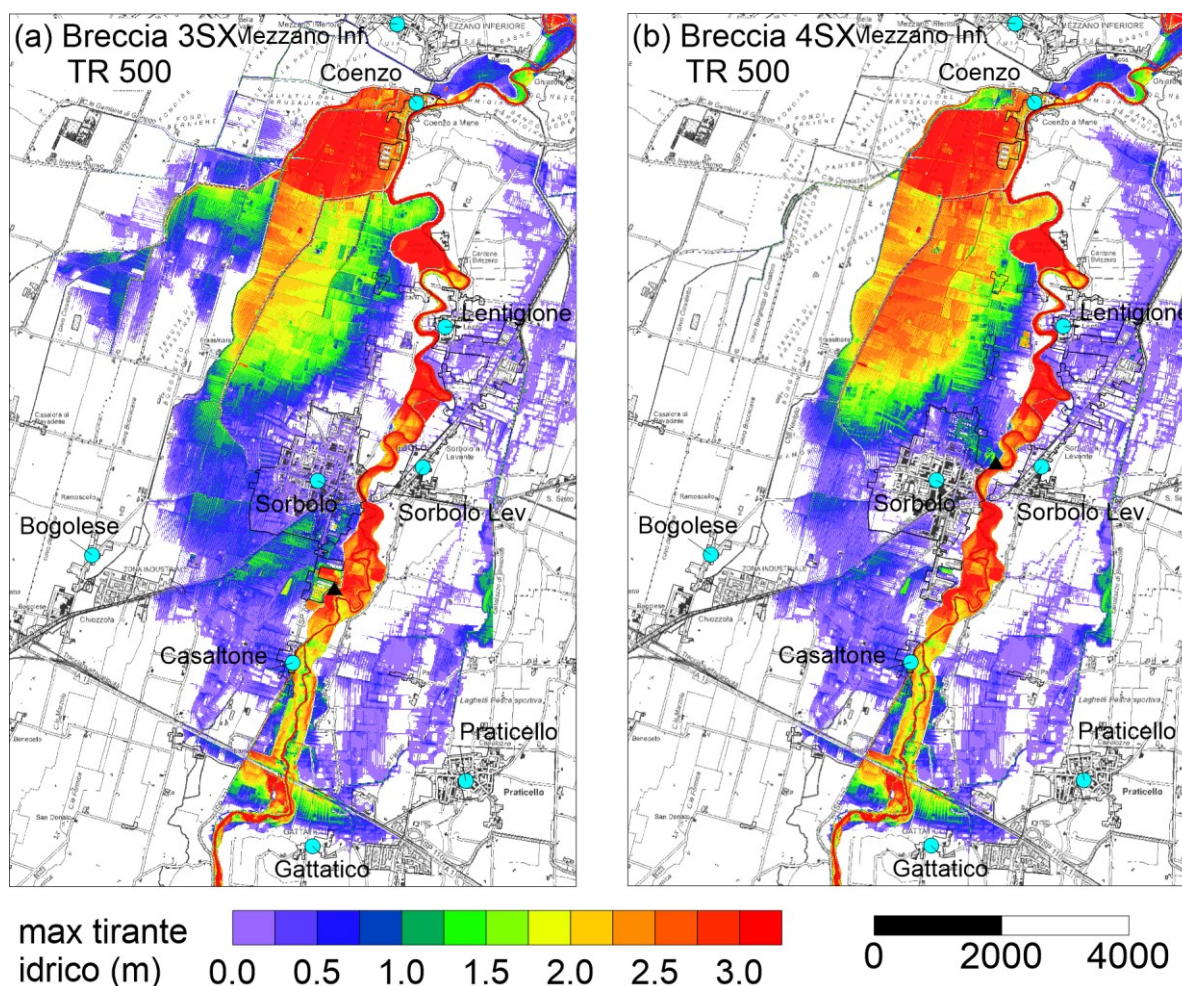


Figura 3-3. Mappa della massima profondità idrica per le Breccie (a) 3 SX e (b) 4 SX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

La mappa dei massimi tiranti idrici per lo scenario TR 500 anni a seguito della **Breccia 5 SX** è riportata nella Figura 3-4a. La dinamica è simile a quella delle due breccie precedenti, ma non risulta interessato il centro abitato di Sorbolo e inoltre viene allagata un'ampia area agricola a Ovest del Canale Naviglio. Si osservano anche in questo caso diversi sormonti a monte della breccia e in destra idraulica.

Per lo scenario TR 200 anni (Figura B-5 in APPENDICE B), l'allagamento rimane confinato in destra idraulica dei Canali Naviglio e Terrieri, con tiranti idrici inferiori rispetto allo scenario cinquecentennale, mentre per lo scenario TR 20 anni (Figura B-5) la propagazione si arresta a Nord e Ovest contro gli argini del Canale Fumolenta.

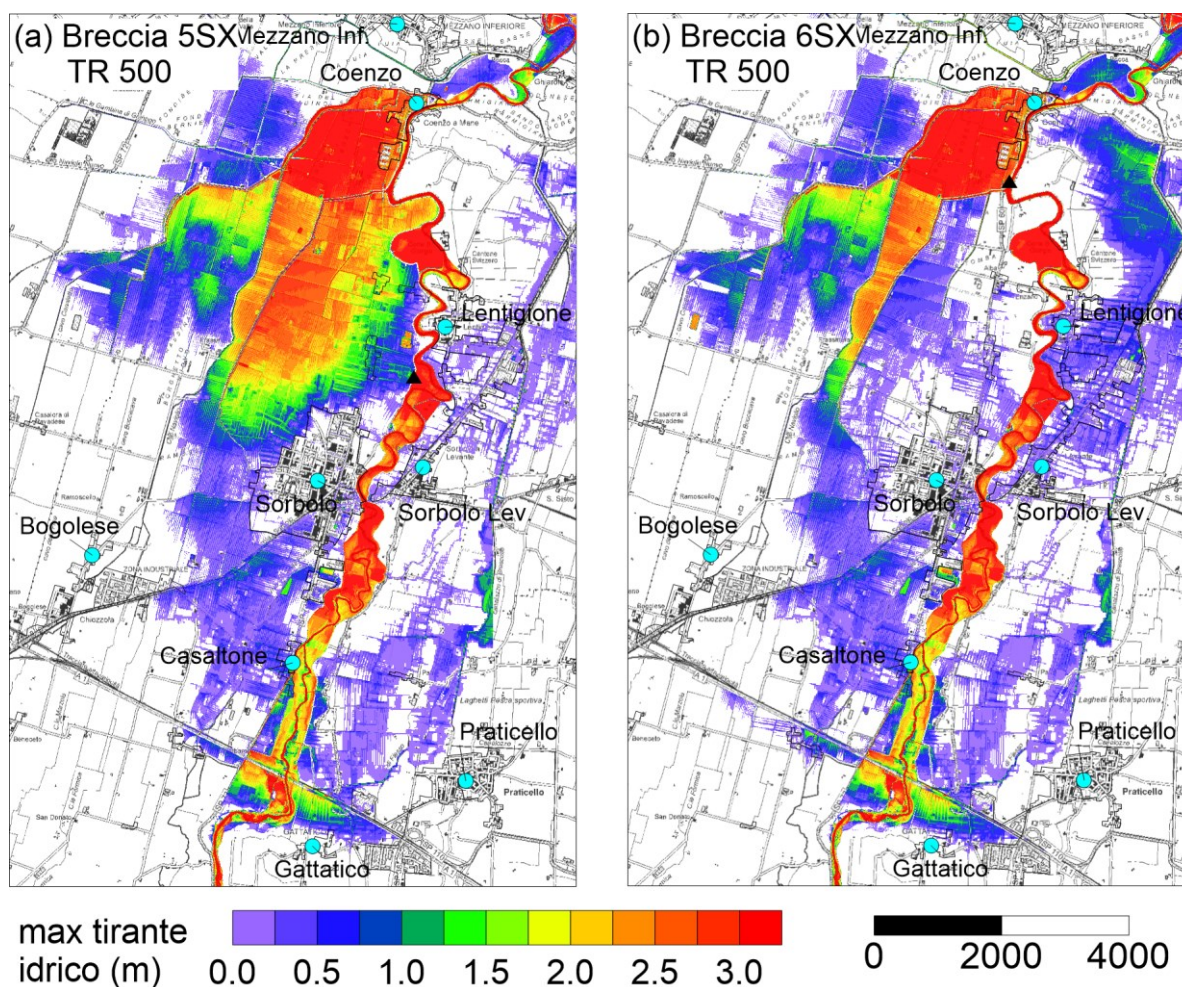


Figura 3-4. Mappa della massima profondità idrica per le Breccie (a) 5 SX e (b) 6 SX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

Infine, la mappa dei massimi tiranti idrici per lo scenario TR 500 anni relativa alla **Breccia 6 SX** è riportata nella Figura 3-4b. Poiché il volume idrico fuoriuscito dalla breccia si accumula a causa della presenza di alcuni rilevati (gli argini del reticolo idrografico minore), si assiste in questo caso al rientro in alveo di una

parte del volume esondato nel momento in cui i livelli fuori alveo superano quelli di esaurimento della piena nel torrente. I massimi tiranti superano comunque i 3 m e viene coinvolto anche in questo caso il centro abitato di Coenzo; anche a Ovest del Canale Naviglio si riscontrano diffusi allagamenti. Chiaramente permangono anche in questo caso le tracimazioni in tratti dell'argine più a monte e in destra idraulica.

L'allagamento è molto più confinato per gli scenari TR 20 e 200 anni (Figura B-6 in APPENDICE B). In entrambi i casi si osserva un rientro in alveo di parte del volume esondato.

3.4 Brecce in destra idraulica

Nel presente paragrafo sono descritte in sintesi le principali caratteristiche degli allagamenti dovuti a brecce in destra idraulica.

La **Breccia 1 DX** è collocata a monte dell'attraversamento dell'autostrada A1. Le acque fuoriuscite dalla breccia (la mappa dei massimi tiranti idrici è rappresentata nella Figura 3-5a per lo scenario TR 500 anni) si addossano al rilevato autostradale e poi lo sormontano; la propagazione verso valle è consentita dai fornicci che sottopassano il rilevato della TAV. A Nord dell'autostrada, l'allagamento prosegue verso valle con tiranti piuttosto bassi e si mescola con i piccoli volumi fuoriusciti per tracimazione in destra Enza; infine, raggiunge un paleoalveo dell'Enza, caratterizzato da quote terreno ribassate rispetto alla campagna circostante. Ulteriori allagamenti derivano dal sormonto degli argini dell'Enza in destra, all'altezza di Lentigione, e in sinistra. Si rimanda al paragrafo 4.2 per una mappatura di dettaglio dei tratti di argine sormontati. L'analisi dello scenario TR 200 anni (Figura B-7 in APPENDICE B) mostra una dinamica molto simile, anche se sono quasi assenti tracimazioni in altri tratti di argine dell'Enza. Per lo scenario TR 20 anni (Figura B-7), invece, l'allagamento risulta limitato a monte del rilevato dell'autostrada.

La Figura 3-5b riporta la mappa dei massimi tiranti idrici per la **Breccia 2 DX** nel caso dello scenario TR 500 anni. Il volume fuoriuscito dalla breccia è di gran

lunga maggiore rispetto alla breccia precedente e dà origine ad un allagamento notevolmente più esteso. In particolare, l'acqua si propaga seguendo la particolare morfologia del terreno, incanalandosi lungo il paleoalveo dell'Enza in direzione Nord/Nord-Est e mantenendosi ad una certa distanza dall'arginatura di destra, con una dinamica simile a quella verificatasi per l'evento storico del 1972. Le frazioni di Sorbolo a Levante e S. Sisto risultano entrambe lambite perifericamente dall'allagamento. Successivamente, l'acqua si propaga verso Nord e si ripartisce sulle due sponde del Canalazzo di Brescello: in sinistra si accumula tra questo e l'argine di Po, raggiungendo anche la zona industriale di Lentigione, mentre in destra si muove verso Est, lambendo l'abitato di Brescello e la zona Ovest di Boretto con profondità idriche contenute. In particolare, la propagazione si arresta contro il rilevato della linea ferroviaria Parma-Suzzara che attraversa gli abitati di Brescello e Boretto. Anche il rilevato di Via Argine Mola contribuisce a trattenere in parte l'allagamento. A Est, l'arginatura del Canale Derivatore ostacola la propagazione delle acque esondate e contribuisce a proteggere gran parte dell'abitato di Boretto, nonché quello di Gualtieri. Ulteriori canali di bonifica secondari (Canale Risalita, Cavo Signora) trattengono ulteriormente l'allagamento, che non raggiunge l'argine sinistro del Crostolo. Per lo scenario TR 200 anni (Figura B-8 in APPENDICE B), la dinamica è molto simile, anche se l'allagamento è meno esteso verso Est e i tiranti massimi sono più limitati. Per lo scenario TR 20 anni (Figura B-8), l'allagamento è ancora più contenuto.

La **Breccia 3 DX**, la cui mappa delle massime profondità idriche è rappresentata nella Figura 3-6a per lo scenario TR 500 anni, dà luogo ad una dinamica di allagamento simile a quella della breccia precedente. Si osservano tuttavia alcuni sormonti nel tratto di arginatura a monte della breccia, sia in destra sia in sinistra. È inoltre maggiore il coinvolgimento dell'abitato di Sorbolo a Levante. Anche per gli scenari TR 20 e 200 anni (Figura B-9 in APPENDICE B), la dinamica è paragonabile a quella della breccia precedente.

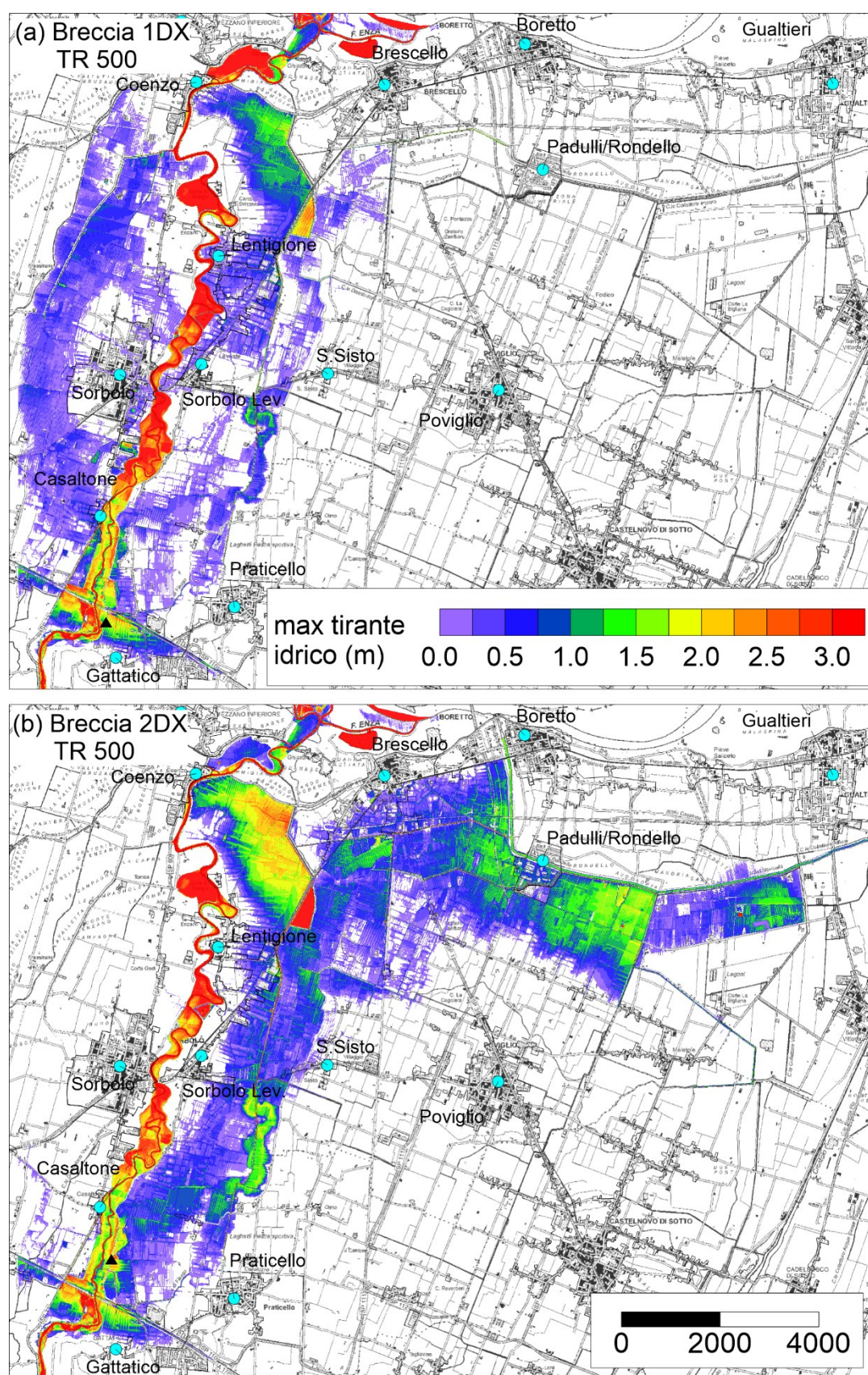


Figura 3-5. Mappa della massima profondità idrica per le Breccie (a) 1 DX e (b) 2 DX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

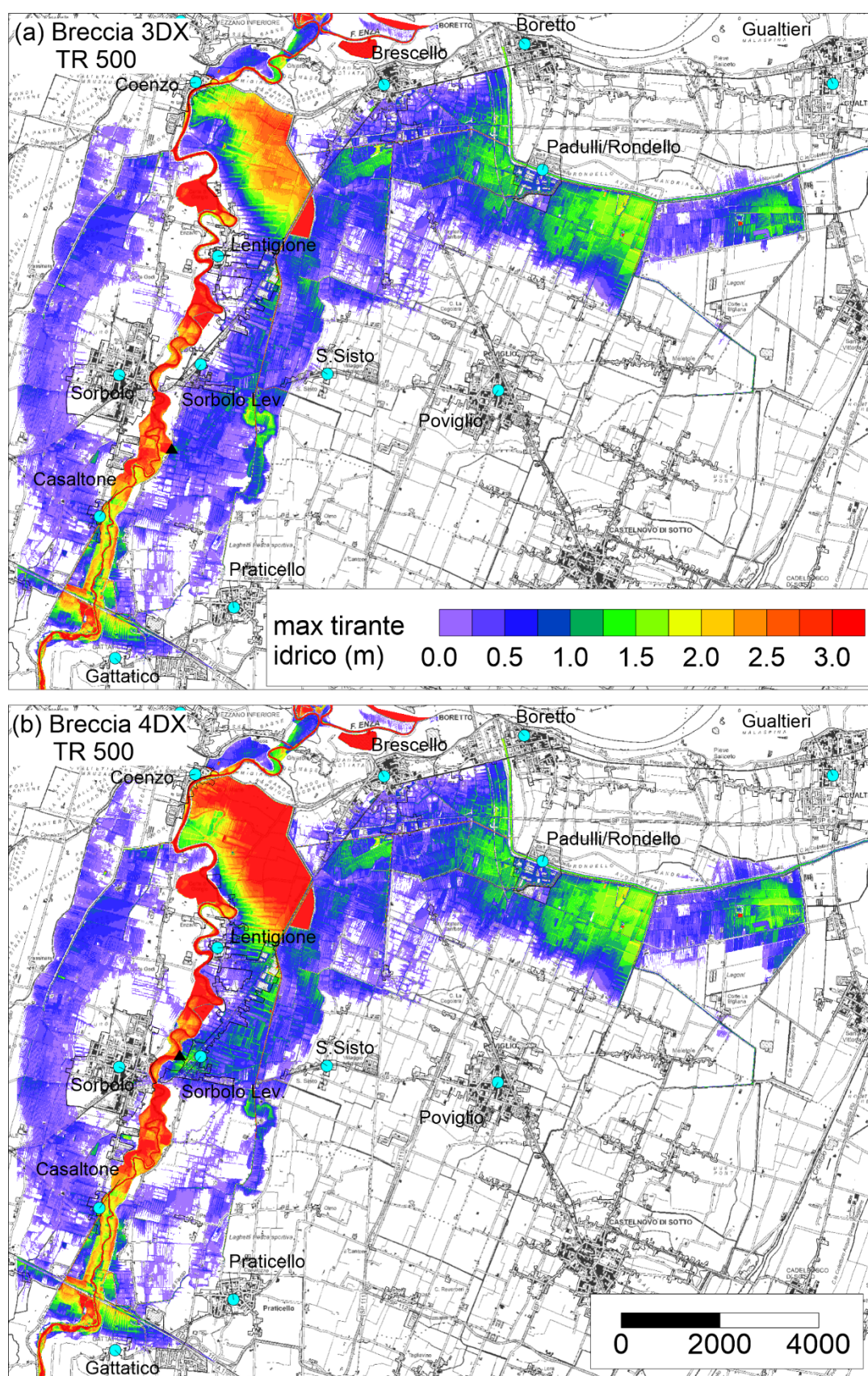


Figura 3-6. Mappa della massima profondità idrica per le Breccie (a) 3 DX e (b) 4 DX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

La **Breccia 4 DX**, la cui mappa delle massime profondità idriche è rappresentata nella Figura 3-6b per lo scenario TR 500 anni, è collocata in corrispondenza del centro abitato di Sorbolo a Levante, che viene quindi immediatamente investito dall'allagamento. La dinamica successiva ricalca poi quella delle due brecce precedenti, anche se i tiranti massimi nella zona di accumulo tra argini maestri del Po e argine del Canalazzo di Brescello risultano più elevati (anche superiori a 3 m) rispetto alle altre brecce, così come più esteso è l'allagamento nel centro abitato di Lentigione.

Per quanto riguarda lo scenario con TR 200 anni (Figura B-10 in APPENDICE B), non si riscontrano particolari differenze rispetto allo scenario con TR 500 anni, ad eccezione della minor estensione dell'allagamento a Est. È invece notevolmente meno estesa l'area allagata per lo scenario con TR 20 anni (Figura B-10).

La **Breccia 5 DX** è situata in prossimità della rotta del dicembre 2017 e l'allagamento conseguente alla sua apertura è, nelle prime fasi, simile a quello relativo a tale evento storico. Tuttavia, a causa della maggior severità dell'onda di piena e, conseguentemente, del maggior volume esondato, il Canalazzo di Brescello non è sufficiente a contenere l'allagamento e viene tracimato dopo diverse ore dall'innescò della breccia (la mappa dei massimi tiranti è riportata nella Figura 3-7a per lo scenario TR 500 anni): la dinamica successiva dell'esondazione, in direzione Est, è simile a quella osservata per le brecce più a monte.

Anche in questo caso, l'area allagata è meno estesa a Est per lo scenario TR 200 anni (Figura B-11 in APPENDICE B), mentre per lo scenario TR 20 anni (Figura B-11) i livelli idrici non sono tali da superare il Canalazzo di Brescello.

Infine, la **Breccia 6 DX** ha una dinamica simile alla precedente, sia per quanto riguarda lo scenario TR 500 anni (Figura 3-7b), sia per i tempi di ritorno inferiori (Figura B-12 in APPENDICE B).

Si noti inoltre che, per tutte le posizioni di breccia 3-6, si riscontrano notevoli tracimazioni a monte sia in sinistra sia in destra idraulica; in questo secondo caso, il volume fuoriuscito si mescola con quello esondato dalla breccia.

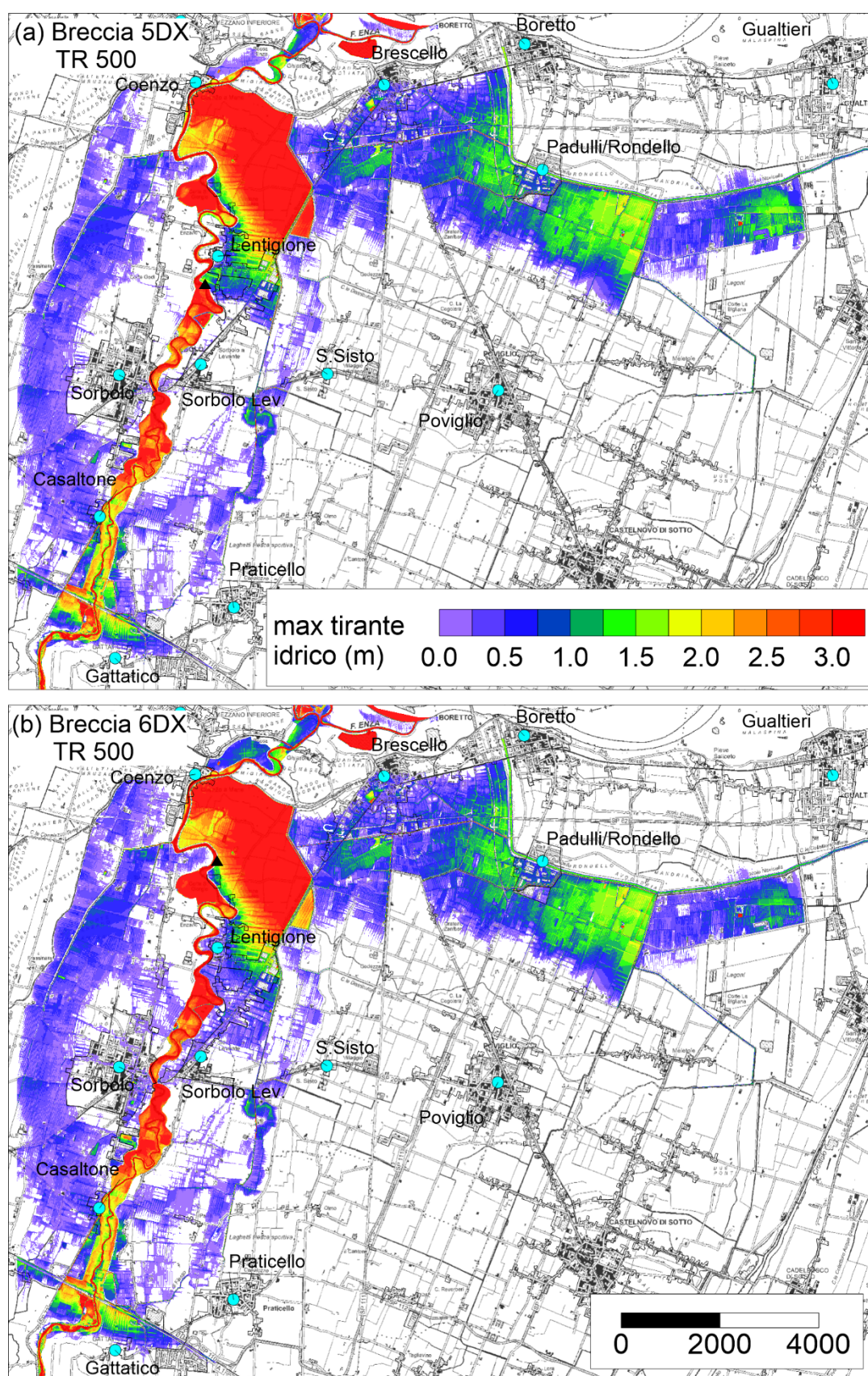


Figura 3-7. Mappa della massima profondità idrica per le Breccie (a) 5 DX e (b) 6 DX, per lo scenario con TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

3.5 Involuppo di tutte le brecce e aree allagate

I risultati relativi all'intera area indagata possono essere analizzati congiuntamente, al fine di fornire una valutazione complessiva dell'impatto sul territorio dei potenziali allagamenti conseguenti a brecce sul torrente Enza. A questo scopo è stata realizzata la mappa dell'involuppo delle massime profondità idriche ottenute dalle simulazioni delle varie brecce, per ciascuno dei tre scenari idrologici considerati. La mappa relativa allo scenario TR 500 anni è rappresentata nella Figura 3-8, mentre quelle relative ai tempi di ritorno di 200 e 20 anni sono riportate nella Figura 3-9.

La Tabella 3.1 riassume l'estensione dell'area allagata per i diversi tempi di ritorno nei comparti sinistro e destro. Complessivamente, risulta interessata dall'allagamento un'area di 84 km² per lo scenario TR 500 anni, di 64 km² per TR 200 anni e di 42 km² per TR 20 anni.

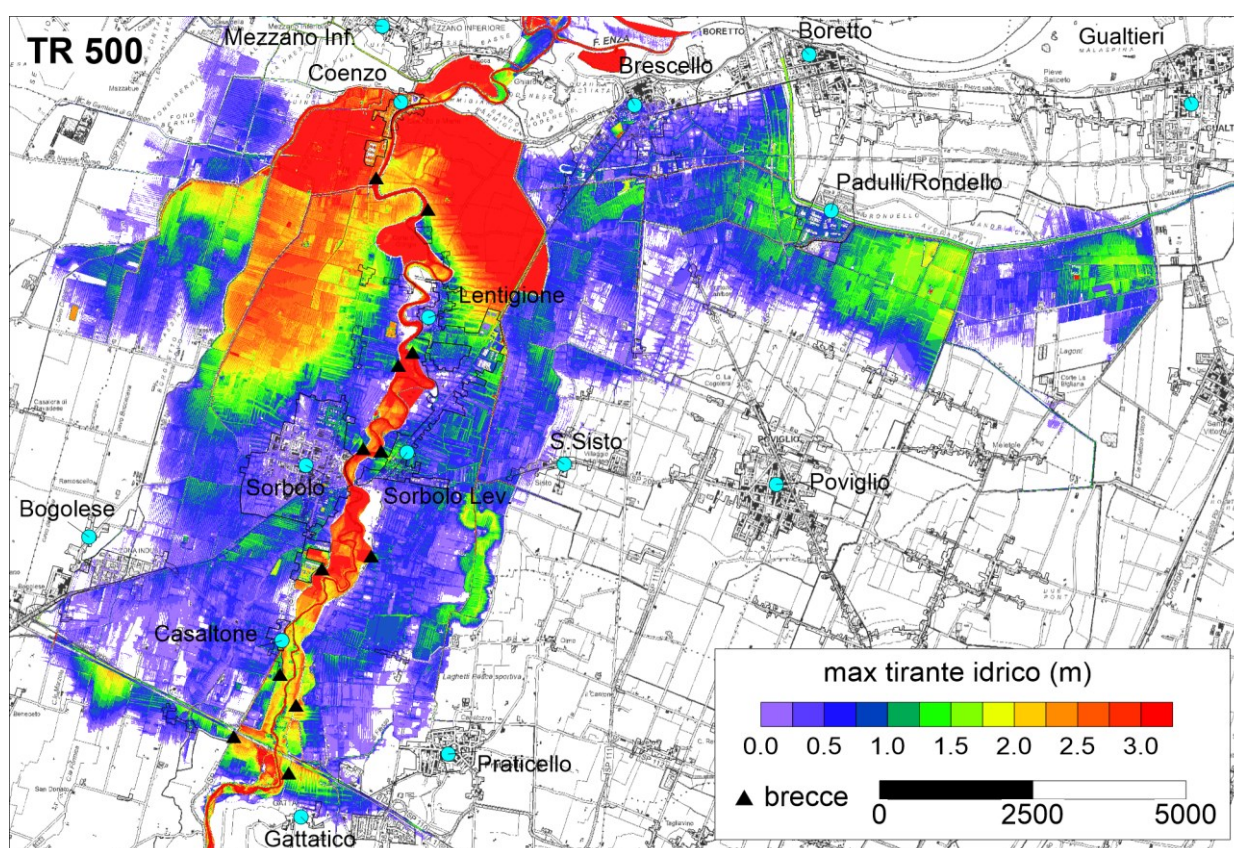


Figura 3-8. Involuppo delle massime profondità idriche per tutte le brecce simulate per il tempo di ritorno di 500 anni.

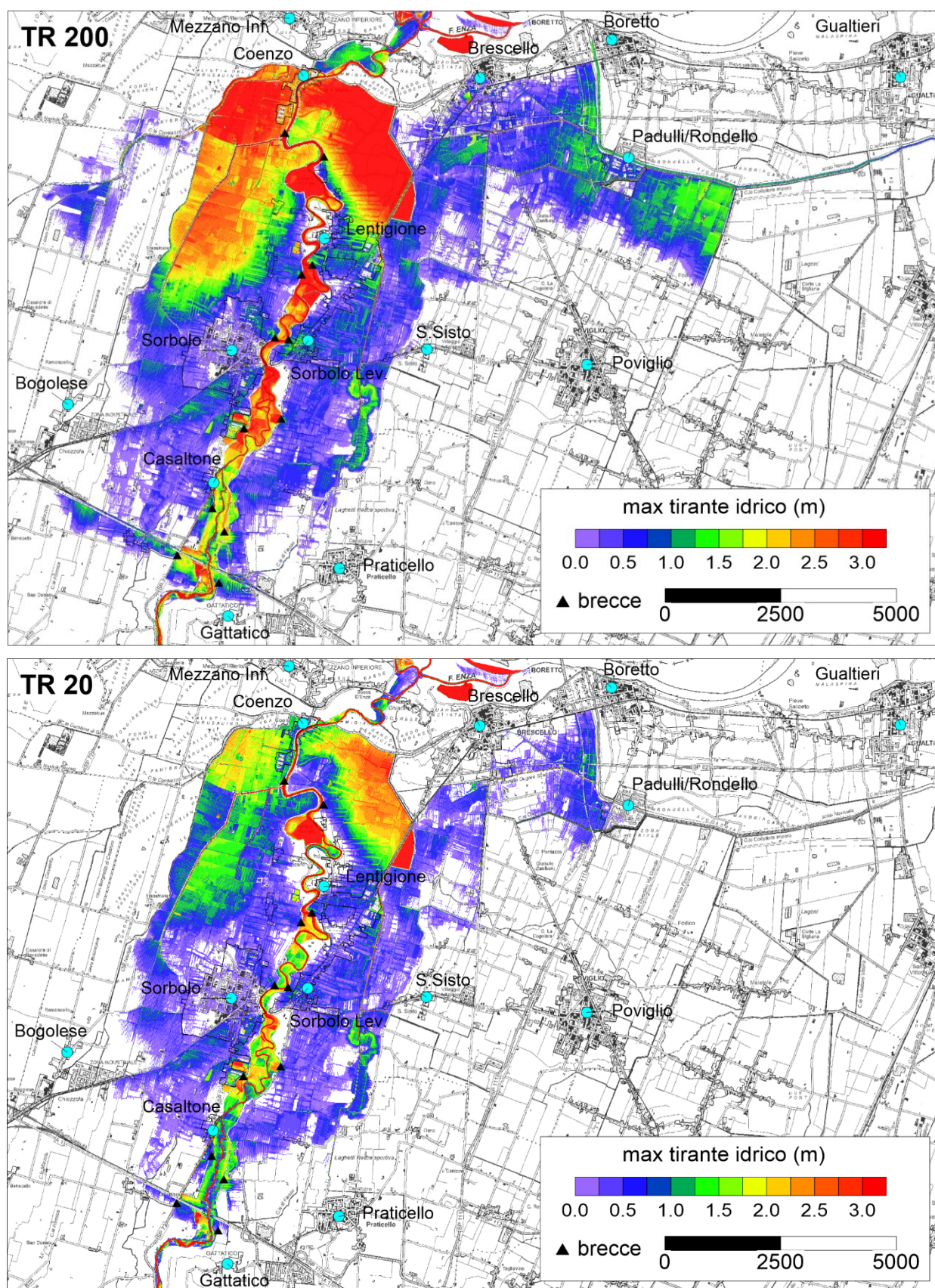


Figura 3-9. Involuppo delle massime profondità idriche per tutte le brecce simulate per i tempi di ritorno di 200 anni (in alto) e 20 anni (in basso).

Dall'analisi delle mappe qui riportate, si possono immediatamente individuare alcune aree caratterizzate da tiranti idrici elevati. In destra idraulica, le profondità massime (anche maggiori di 3 m) si registrano nella zona tra l'argine destro del torrente Enza, l'argine maestro di Po e l'argine del Canalazzo di Brescello. Profondità superiori a 1 m si riscontrano anche nel paleoalveo del torrente Enza e a tergo di alcuni rilevati (Canale Risalita, Cavo Signora) che intersecano il Canale Derivatore. In sinistra idraulica, invece, le aree a maggior pericolosità sono quelle a tergo dei Canali Naviglio, Terrieri e Fumolenta, dove si riscontrano elevati tiranti (>3 m). Si segnalano anche alcune aree con profondità massime superiori a 2 m a monte del rilevato autostradale.

È possibile notare che, in virtù della morfologia del terreno e della presenza di rilevati in grado di trattenere il volume esondato, l'area allagata non si estende né fino al torrente Parma a Ovest, né fino al torrente Crostolo a Est.

Per quanto riguarda invece alcune aree apparentemente asciutte a ridosso degli argini dell'Enza, sia in sinistra sia in destra, è importante evidenziare che tali aree potrebbero essere allagate in caso di innesco di una breccia nel tratto intermedio tra due delle posizioni qui considerate: non è dunque lecito attribuire a tutta la fascia esterna alle arginature una bassa pericolosità. L'estensione dell'area potenzialmente a rischio di esondazione riportata nella Tabella 3.1 è quindi leggermente sottostimata. Chiaramente, aumentando il numero degli scenari simulati (brecce più ravvicinate) sarebbe possibile migliorare la valutazione della pericolosità in vicinanza delle arginature, mentre nel resto del territorio la mappa di inviluppo rimarrebbe sostanzialmente invariata. Infine, si noti che, nelle mappe di inviluppo, gli allagamenti "spuri" (dovuti alle tracimazioni) presenti nei risultati delle singole brecce vengono "riassorbiti" dagli scenari di apertura di una breccia nei tratti sormontati (es. Brecce 2 SX o 5 DX).

Tabella 3.1. Aree complessivamente allagate.

Comparto	Area allagata (km ²)		
	TR500	TR200	TR20
SX	36.7	26.4	18.9
DX	47.4	37.2	22.9
TOT	84.1	63.6	41.8

3.6 Velocità idriche

In generale, per tutte le simulazioni, le velocità massime riscontrate sul territorio sono piuttosto basse, e si mantengono generalmente al di sotto di 0.5-0.6 m/s, ad eccezione di alcuni punti localizzati. In corrispondenza della breccia, le velocità possono raggiungere i 5-6 m/s; poco a valle della stessa, le velocità si mantengono superiori a 0.5 m/s, specialmente se il terreno è in pendenza. Altri punti "critici" sono i rilevati che vengono sormontati: immediatamente a valle degli stessi si riscontrano spesso velocità prossime o superiori a 1 m/s. A titolo di esempio, si riporta nella Figura 3-10 la mappa di inviluppo delle massime velocità idriche ottenute unendo i risultati delle diverse simulazioni di allagamenti conseguenti a brecce che si aprono per lo scenario TR 500 anni. Per i tempi di ritorno di 200 e 20 anni, le mappe sono invece rappresentate nella Figura 3-11. Le mappe delle massime velocità relative ad ogni singola breccia sono fornite nel materiale digitale allegato.

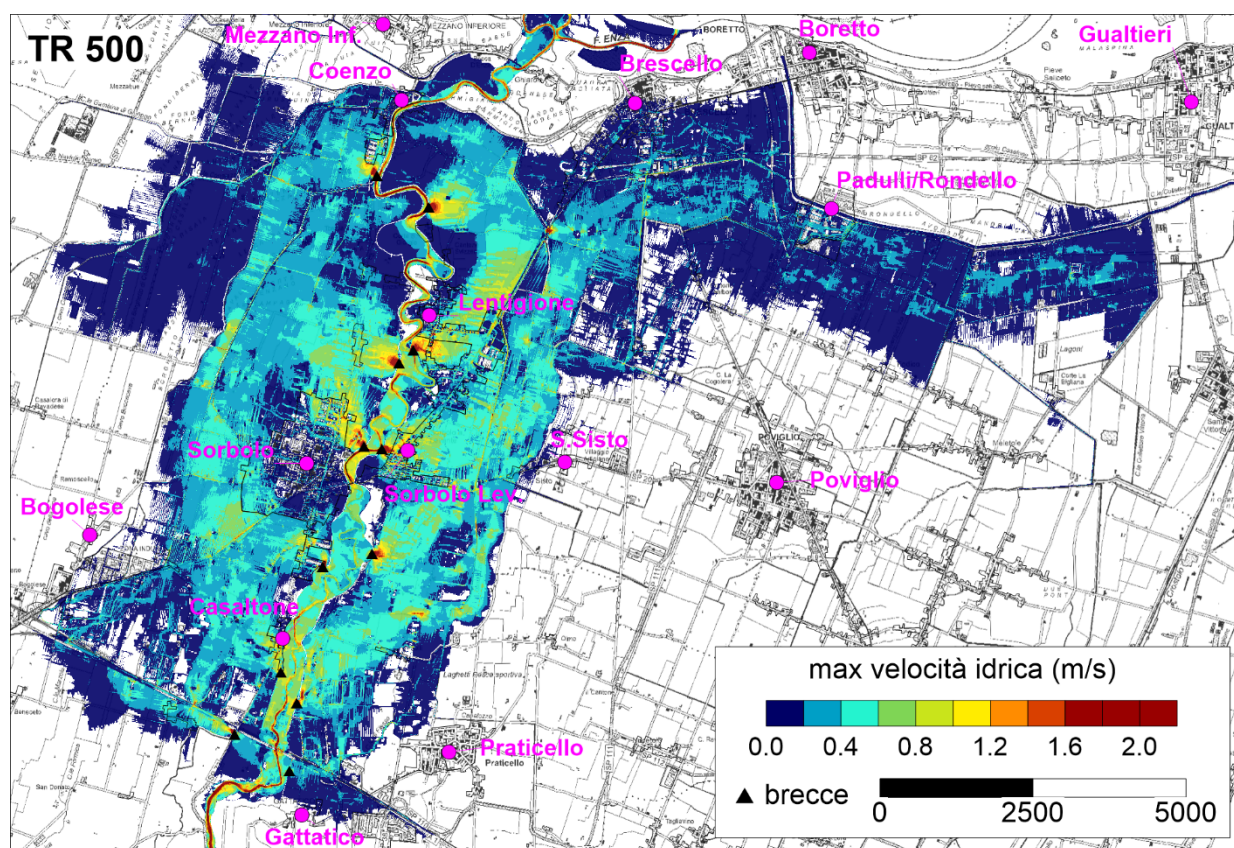


Figura 3-10. Mappa di inviluppo delle massime velocità idriche per tutte le brecce simulate per il tempo di ritorno di 500 anni.

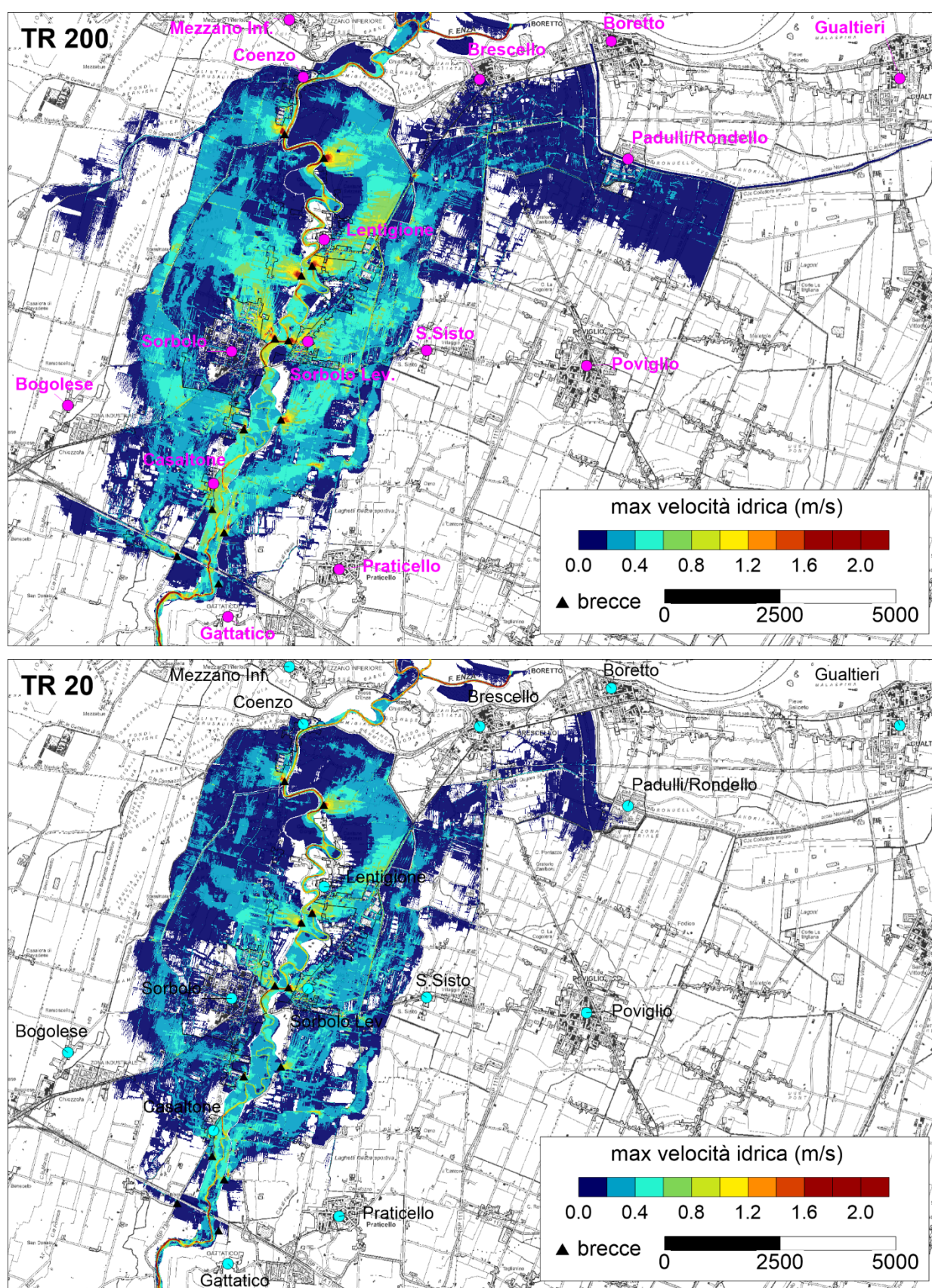


Figura 3-11. Mappa di inviluppo delle massime velocità idriche per tutte le brecce simulate per i tempi di ritorno di 200 anni (in alto) e 20 anni (in basso).

3.7 Pericolosità

Nonostante siano presenti alcune zone “critiche” con velocità elevate, in generale nel territorio le velocità si mantengono piuttosto basse; la pericolosità, che dipende dalla combinazione dei valori contemporanei di altezza idrica e velocità, risulta dunque principalmente legata al massimo livello idrico raggiunto.

Come indice sintetico della pericolosità idraulica si è utilizzata la “profondità totale”, definita come la profondità idrica che genera una spinta idrostatica equivalente alla spinta totale corrispondente ai valori effettivi (contemporanei) della profondità idrica h e della velocità v . La profondità totale H è calcolabile in base all’espressione:

$$H = h \sqrt{1 + \frac{2v^2}{gh}}$$

La Figura 3-12 rappresenta i campi di pericolosità idraulica assunti, suddivisa in bassa ($H \leq 0.5$ m), media ($0.5 < H \leq 1.0$ m), alta ($1.0 < H \leq 1.5$ m), e altissima ($H > 1.5$ m) nel piano v - h .

L’inviluppo delle massime profondità totali ottenute per le diverse posizioni di breccia per gli scenari TR 500 e 200 anni è mostrato nella Figura 3-13, mentre quello relativo allo scenario TR 20 anni è riportato nella Figura 3-14. Le aree ad altissima pericolosità coincidono sostanzialmente con quelle caratterizzate da elevati tiranti idrici, descritte in precedenza. Le mappe delle massime pericolosità relative ad ogni singola breccia sono fornite nel materiale allegato.

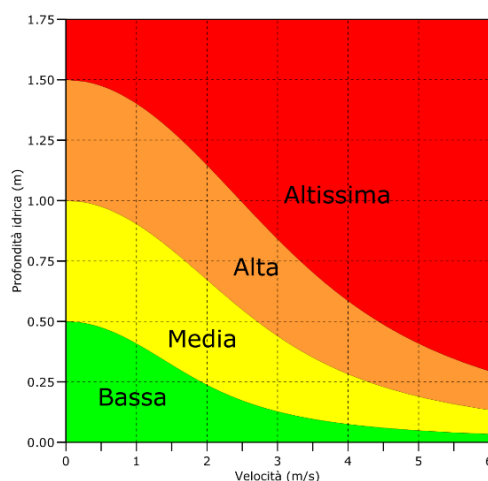


Figura 3-12. Piano v - h con campi di pericolosità idraulica.

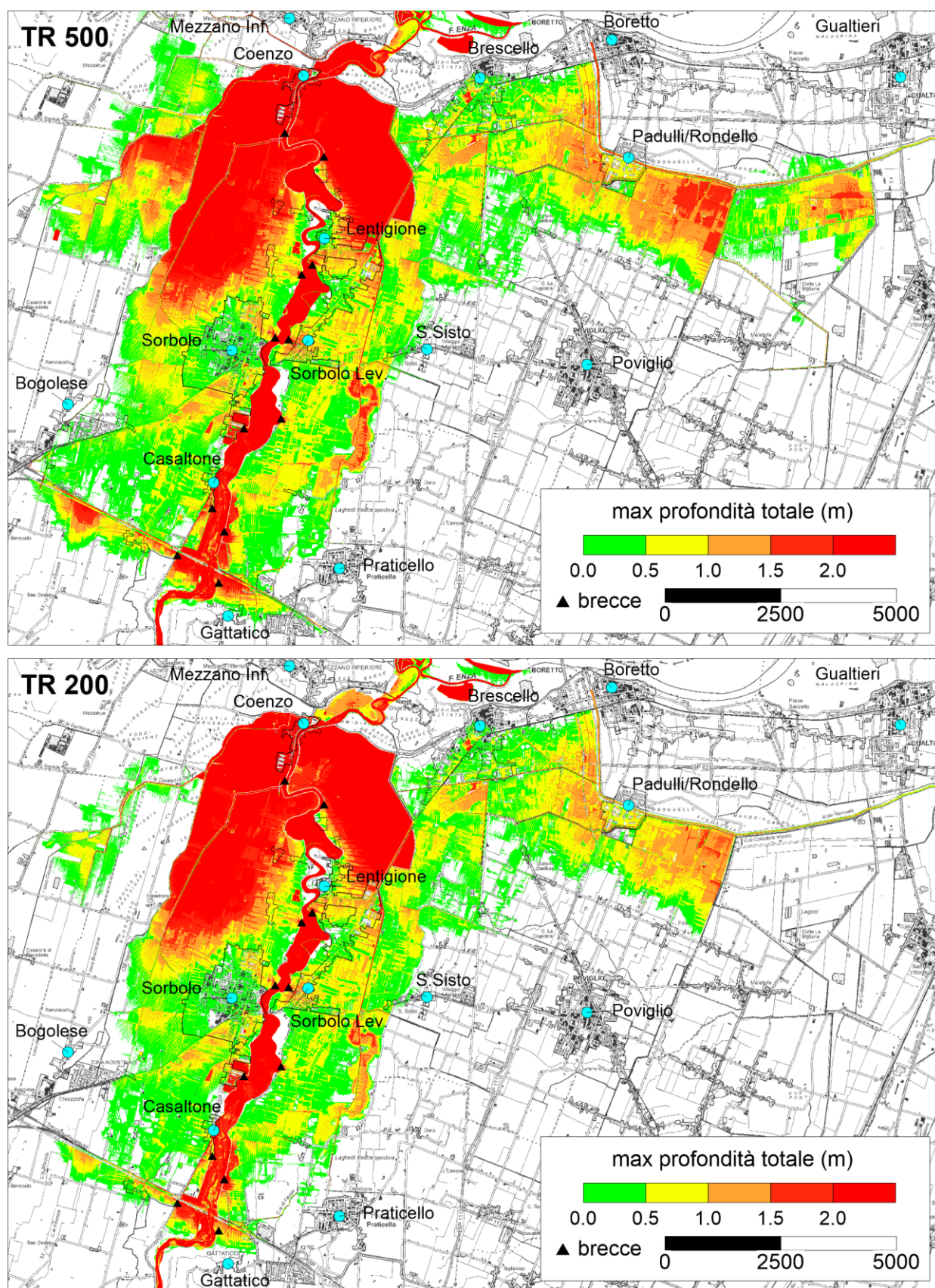


Figura 3-13. Mappa di inviluppo delle massime profondità totali (pericolosità) per tutte le brecce simulate per i tempi di ritorno di 500 (in alto) e 200 anni (in basso).

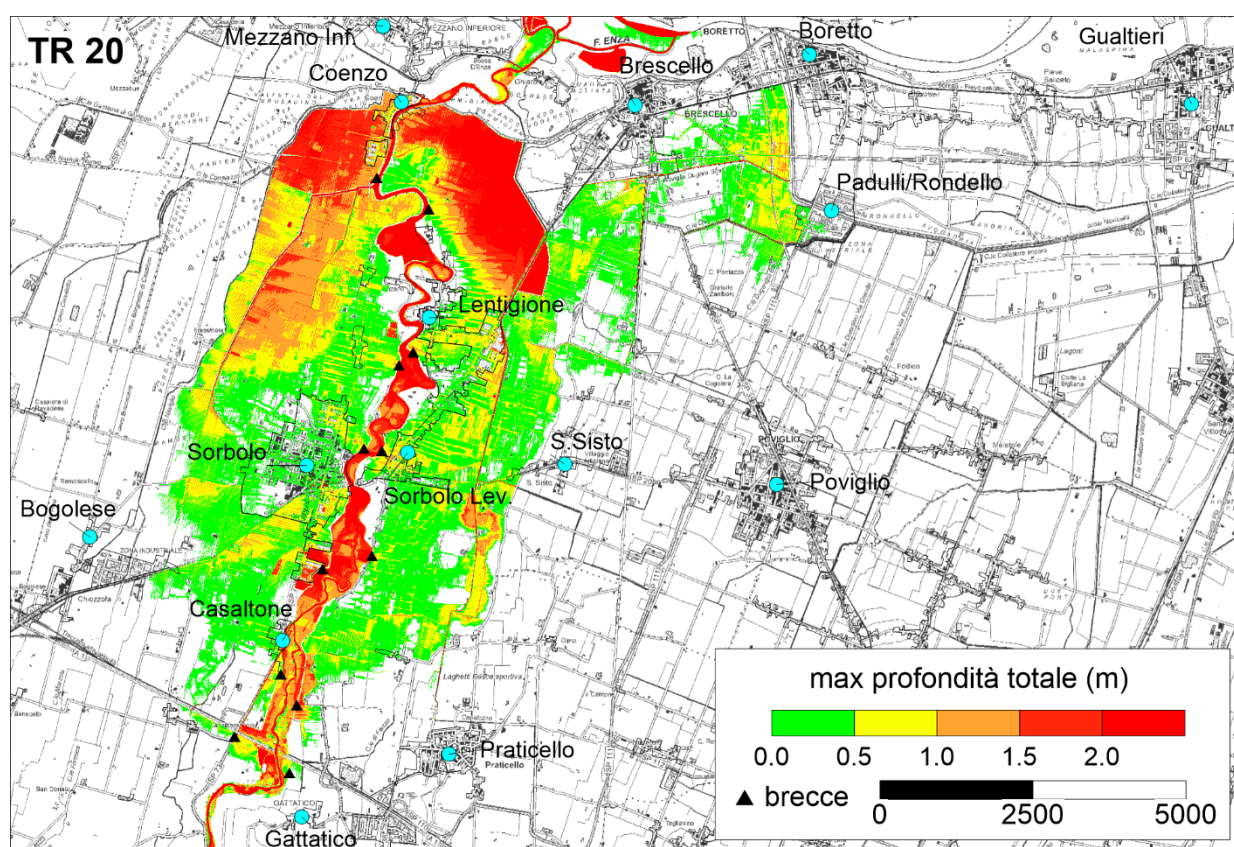


Figura 3-14. Mappa di inviluppo delle massime profondità totali (pericolosità) per tutte le brecce simulate per il tempo di ritorno di 20 anni.

3.8 Tempi di arrivo

La conoscenza del tempo di arrivo dell'allagamento rappresenta un indicatore fondamentale per la riduzione dei danni da alluvione, dal momento che consente di mettere in campo strategie emergenziali (allerte, evacuazioni, ecc.).

Le mappe dei tempi di arrivo dell'allagamento per le diverse posizioni di breccia sono rappresentate nell'APPENDICE C per lo scenario TR 500 anni.

Analizzando i tempi di arrivo per le brecce in destra idraulica poste più a monte (1-4 DX), è possibile notare che l'acqua scorre verso valle piuttosto rapidamente e raggiunge, entro le prime 12-15 ore dall'apertura della breccia, la parte Nord del comparto, compreso il centro abitato di Brescello. Per quanto riguarda le brecce più vallive (5-6 DX), nelle prime 12 ore tutto il volume esondato è trattenuto a Ovest del Canalazzo di Brescello; di conseguenza l'allagamento

verso Est si sviluppa più lentamente: ad esempio, l'abitato di Brescello è raggiunto dopo circa 24 ore. La zona a Est del Canale Risalita è invece sempre raggiunta dopo più di 48 ore.

Soffermandosi invece sulle brecce in sinistra idraulica, si può osservare che buona parte del territorio interessato (a tergo dei Canali Naviglio e Terrieri) si allaga entro le prime 9-12 ore per le brecce più a monte (1-3 SX). Per le brecce più vallive (4-5 SX), invece, il Canale Fumolenta trattiene l'allagamento per le prime ore e l'acqua arriva a Coenzo solo dopo 18-21 ore. Il territorio a Ovest del Canalazzo Terrieri viene raggiunto solo oltre le 36-48 ore. Infine, l'ultima breccia (6 SX) genera un allagamento che raggiunge immediatamente Coenzo, mentre i tempi di arrivo nei territori a Ovest sono più lunghi (oltre 15-18 ore).

Per i tempi di ritorno inferiori (si rimanda al materiale allegato per le mappe di ogni scenario), nella maggior parte dei casi la dinamica è più lenta.

3.9 Volumi esondati

La Tabella 3.2 riporta, per ciascuna breccia simulata, una stima indicativa del volume esondato, derivante dall'integrale della portata uscente dalla breccia. Si noti che, per i tempi di ritorno più elevati (200 e 500 anni), tale volume non coincide con quello effettivamente presente sul territorio al termine della simulazione, a causa delle tracimazioni riscontrate in alcuni tratti di arginatura, che determinano un volume aggiuntivo di allagamento.

Il volume fuoriuscito dalle brecce risulta piuttosto variabile. In particolare, l'altezza locale dell'argine sul piano campagna esterno risulta piuttosto influente. Infatti, ad esempio, le brecce ipotizzate a monte dell'attraversamento dell'autostrada (1 SX e 1 DX), dove gli argini sono alti circa 1-1.5 m, sono caratterizzate da volumi esondati di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle più vallive, che si aprono in argini alti alcuni metri.

Inoltre, la Breccia 2 SX è ubicata in un tratto caratterizzato dalla presenza di un rilevato stradale a ridosso dell'argine (SP 73), che riduce la portata in uscita dalla breccia stessa. Analogamente, per la Breccia 6 SX, la presenza degli argini

dei canali di bonifica genera un "lago" nella campagna esterna, in grado di ostacolare la fuoriuscita di acqua dalla breccia, e si assiste addirittura al rientro in alveo di una parte del volume esondato verso la fine dell'evento.

Al di là di questi casi particolari, il volume esondato è dell'ordine di $20 \div 30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per lo scenario TR 500 anni, di $10 \div 20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per lo scenario TR 200 anni e di $3 \div 6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per lo scenario TR 20 anni.

Tabella 3.2. Stima del volume esondato dalle diverse brecce simulate.

Breccia	Volume esondato (10^6 m^3)		
	TR500	TR200	TR20
1 SX	5	2	0.08
2 SX	11	6	1
3 SX	23	16	5
4 SX	22	15	4
5 SX	28	19	5
6 SX	14	11	5
1 DX	2	1	0.002
2 DX	20	11	3
3 DX	21	13	3
4 DX	31	22	6
5 DX	31	20	5
6 DX	28	21	8

3.10 Centri abitati

Il territorio colpito dagli allagamenti è prevalentemente ad uso agricolo. Tuttavia, l'analisi delle mappe riportate ai paragrafi precedenti permette di individuare quali centri abitati risultano potenzialmente interessati dagli allagamenti.

Le brecce in sponda destra possono colpire gli abitati di Sorbolo a Levante, Lentigione e Brescello, nonché lambire Gattatico e S. Sisto; vengono invece esclusi i centri di Poviglio (a causa della morfologia del terreno), Boretto e Gualtieri (protetti dalla presenza del Canale Derivatore e della ferrovia Parma-Suzzara). Sono da segnalare inoltre gli allagamenti nella zona industriale di Lentigione e in quella di Padulli/Rondello.

In sinistra idraulica, gli allagamenti riguardano gli abitati di Casalbaroncolo, Casaltone, Sorbolo, Enzano, Corte Godi, Alba, Strada Nuova e Coenzo. Sono da segnalare inoltre limitati allagamenti nella zona industriale di Bogolese. Risultano invece protetti dagli argini del reticolo idrografico minore i centri abitati di Mezzano Superiore e Inferiore e Colorno.

Grazie alla elevata risoluzione spaziale della griglia di calcolo (2 m) e all'adozione del metodo "Building Hole" per la descrizione delle zone urbane, è possibile ottenere un elevato grado di dettaglio nei risultati relativi agli allagamenti dei centri abitati. A titolo di esempio, nella Figura 3-15 si mostra un dettaglio delle mappe delle massime profondità e velocità idriche per la Breccia 4 DX (TR 500 anni) nella frazione di Sorbolo a Levante, immediatamente colpita dall'allagamento. Si riscontrano elevate velocità ($>1-1.5$ m/s) lungo alcune strade parallele alla direzione del moto. È inoltre possibile apprezzare il livello di dettaglio raggiunto grazie alla descrizione accurata degli edifici.

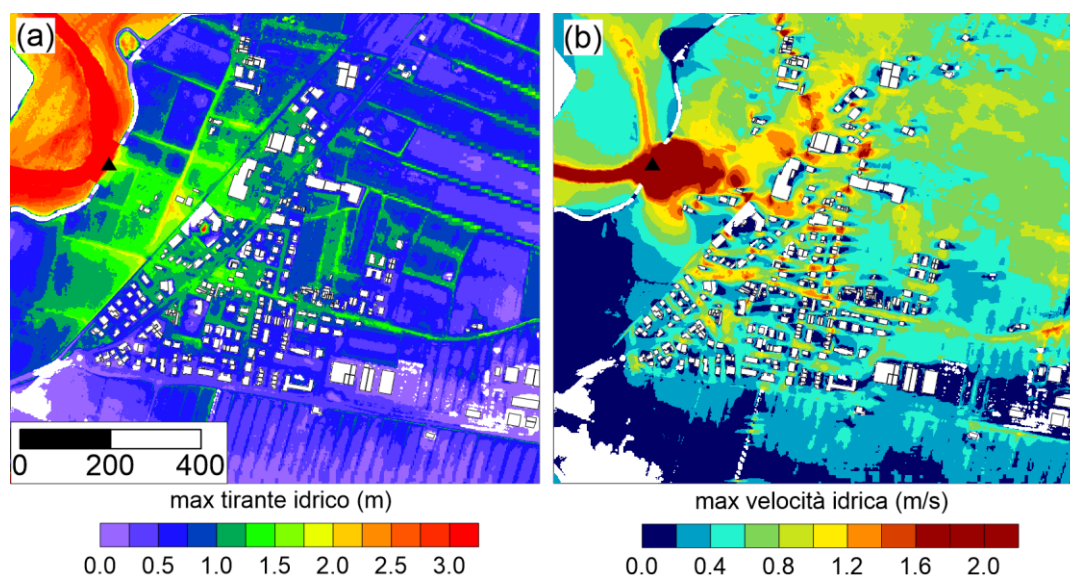


Figura 3-15. Mappa delle massime profondità idriche e velocità per la Breccia 4 DX (indicata dal triangolo nero) per TR 500 anni nel centro abitato di Sorbolo a Levante.

Negli altri centri abitati presenti in prossimità delle arginature (ad esempio Sorbolo e Lentigione) non si riscontrano velocità massime così elevate, dal

momento che le brecce simulate sono collocate ad una maggiore distanza. Tuttavia, un campo di moto simile a quello di Sorbolo a Levante, con velocità anche molto elevate, si potrebbe riscontrare in questi centri abitati qualora si aprisse una breccia nell'argine ad essi prospiciente (ad esempio, 500-600 m più a valle della Breccia 5 DX per Lentigione, oppure 1 km a valle della Breccia 3 SX per Sorbolo).

Infine, si segnalano tiranti idrici particolarmente elevati a Coenzo e Strada Nuova, a causa del progressivo accumulo di acqua a tergo degli argini dei canali di bonifica. Per quanto riguarda il centro abitato di Brescello, i tiranti massimi sono dell'ordine di 1 m d'acqua e le velocità massime sono piuttosto contenute.

3.11 Considerazioni conclusive

Le simulazioni qui presentate possono fornire un supporto utile all'aumento della resilienza nel territorio indagato in caso di alluvione, sia in fase di pianificazione di emergenza, sia come ausilio per le attività di protezione civile nell'eventualità di una rottura arginale futura.

L'inviluppo dei diversi scenari di allagamento conseguenti a brecce permette inoltre una mappatura più "realistica" delle aree a maggior pericolosità, per eventi a bassa probabilità (TR 500 anni), rispetto alle procedure semplificate finora adottate per la valutazione del rischio residuale.

La Figura 3-16 riporta l'attuale mappatura dei tiranti nell'APSFR del torrente Enza, con riferimento allo scenario di bassa probabilità. Nell'area al di fuori delle arginature i tiranti sono stati definiti sulla base del metodo semplificato proposto da [13], con un livello di affidabilità classificato come "basso". La Figura 3-17, invece, rappresenta la mappa dei massimi tiranti ottenuti dal presente studio come inviluppo dei diversi scenari di breccia con TR 500 anni. La figura è limitata al tratto di torrente Enza a partire dall'attraversamento dell'A1. Si noti che, a differenza della mappa del PGRA, in cui le zone non inondate (all'interno dell'APSFR) sono assimilate a quelle con tirante idrico nullo, in questo caso le aree "asciutte" non sono campite.

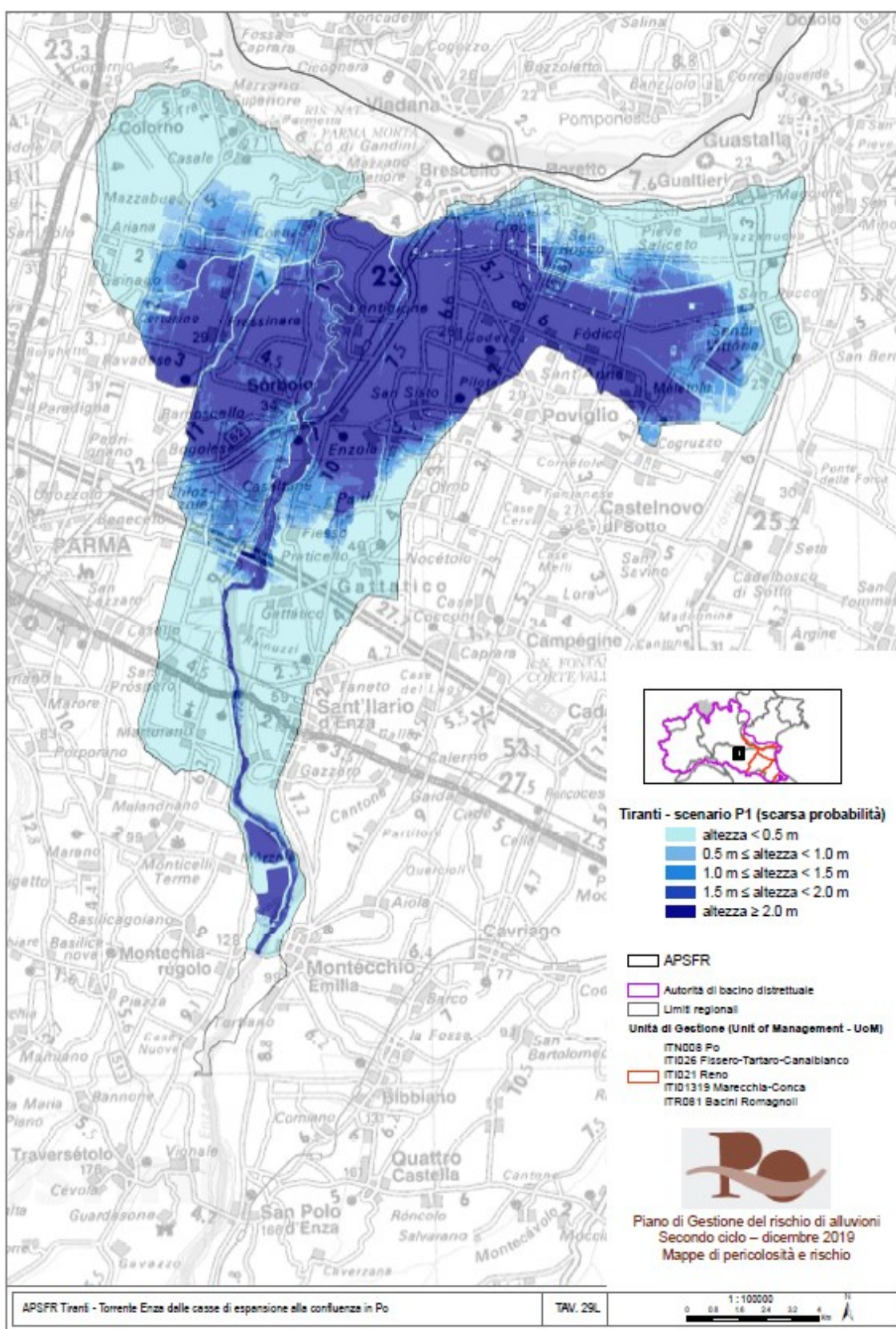


Figura 3-16. Mappa dei massimi tiranti per lo scenario di bassa probabilità, attualmente riportata nel PGRA (aggiornamento del dicembre 2019) per l'APSFR del torrente Enza.

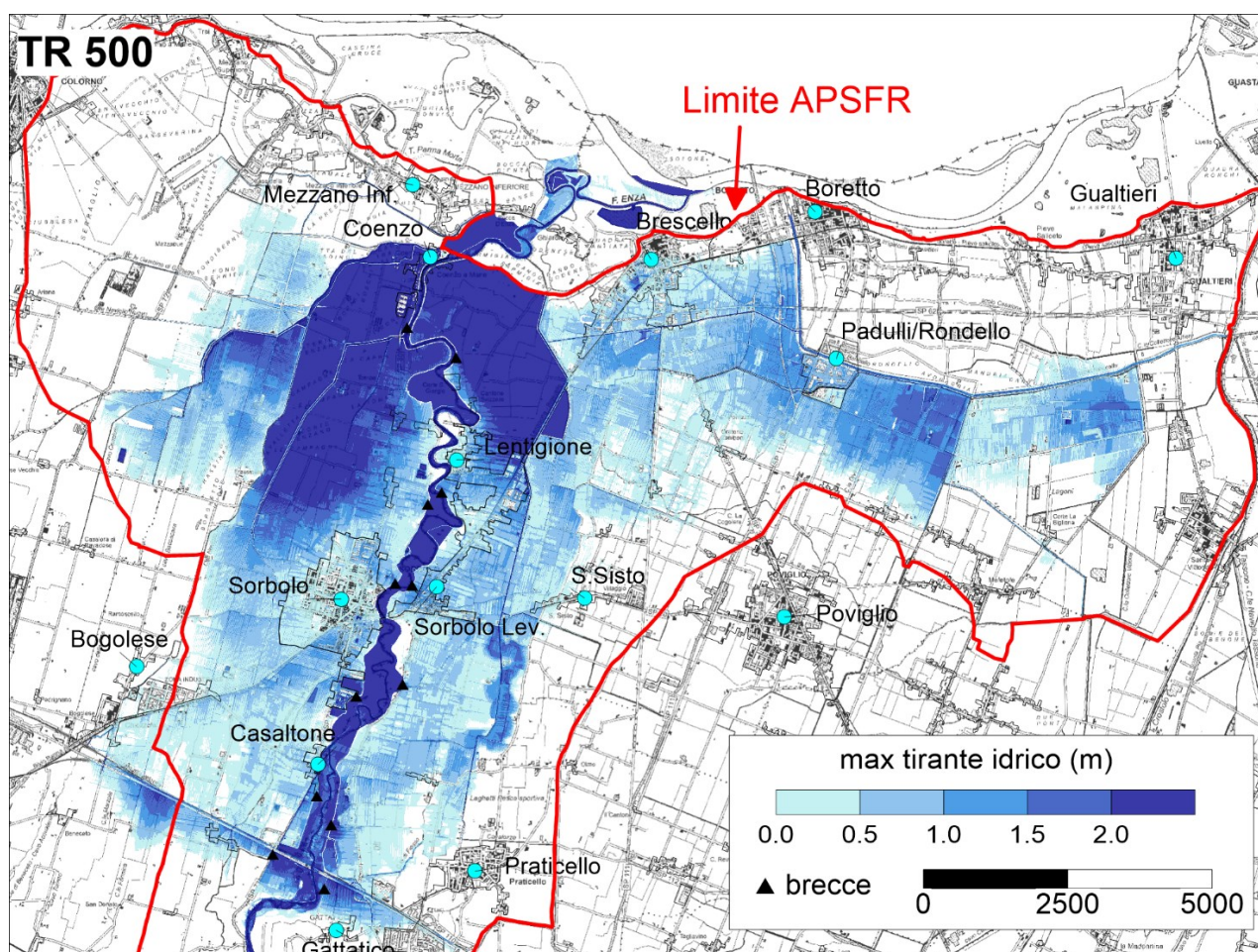


Figura 3-17. Mappa dei massimi tiranti ottenuta nel presente studio.

È possibile osservare che la procedura semplificata tende a sovrastimare il tirante massimo in alcune zone periferiche, sia in destra sia in sinistra, fin quasi al limite dell'APSFR (ad es. a Ovest di Sorbolo, a Est di S. Sisto e a Nord di Poviglio), mentre la metodologia del presente studio fornirebbe localmente valori di tiranti bassi o nulli in tali aree. Inoltre, si evidenzia che il presente studio individua come allagabile (anche con tiranti idrici non trascurabili) un'area in sinistra idraulica a cavallo dell'autostrada A1, immediatamente a Sud di Bogolese, che invece non risulta perimetrata nell'attuale PGRA. Risultano inoltre non inondate ampie porzioni di territorio attualmente incluse nella perimetrazione (vicino a Colorno in sinistra; Gualtieri e le aree a ridosso dell'argine del Crostolo in destra): in questo caso, va sottolineato che tali aree

potrebbero allagarsi per eventi più gravosi di quello considerato, oppure nel caso di collasso di uno dei rilevati che trattengono parte del volume esondato.

Infine, i risultati dimostrano che la dinamica di allagamento nel territorio oggetto di studio (e in generale nei territori di pianura) è fortemente influenzata dalla presenza di rilevati, quali strade, ferrovie, argini del reticolo idrografico minore. Quelli maggiormente significativi per i comparti in destra e sinistra Enza sono i seguenti: i rilevati dell'autostrada A1 e della TAV; la linea ferroviaria Parma-Suzzara, sia in sinistra nel tratto Chiozzola-Sorbolo, sia in destra nel tratto Lentigione-Brescello-Boretto; gli argini dei Canali Naviglio, Terrieri e Fumolenta in sinistra, e quelli del Canalazzo di Brescello, Canale Derivatore, Canali Risalita e Signora in destra; il rilevato di Via Argine Mola a Sud di Brescello.

4 Simulazioni di scenari di allagamento connessi a brecce arginali nell'ipotesi di argini inerodibili

4.1 Premessa

La propagazione di onde di piena con assegnato tempo di ritorno lungo l'asta dell'Enza era stata già simulata con il modello 2D nell'ambito delle attività del POA 2018 [1]. In tale occasione, tuttavia, si era trascurata l'analisi delle fuoriuscite per tracimazione che si riscontrano per i tempi di ritorno più elevati (200 e 500 anni), che viene invece proposta nel presente capitolo.

Inoltre, nel POA 2018 si era limitata la modellazione 2D al caso degli idrogrammi sintetici SDH. Lo studio idrologico di ARPAE [9] ha fornito, in alternativa alle onde di piena sintetiche SDH, gli idrogrammi equiprobabili caratterizzati da coppie portate al colmo-volume di pari tempo di ritorno (copule, [11]). Le forme d'onda proposte sono: triangolare, serbatoio lineare, Nash, idrogramma sintetico. Nel POA 2018 [1], una selezione di tali idrogrammi era stata propagata tramite modellazione 1D a partire dalla sezione a valle della confluenza Termina-Masdone, attraverso le casse d'espansione e successivamente lungo l'asta di valle. Si era evidenziato come le onde ricavate dalle copule presentino valori del volume sopra soglia sempre superiori a quelli degli idrogrammi SDH, con ripercussioni sulle valutazioni relative all'efficienza del sistema di casse di espansione. Inoltre, i risultati presentano una certa variabilità in funzione della forma d'onda scelta (il caso peggiore per l'asta di valle era sempre l'onda alla Nash). Peraltro, in alcuni casi, i valori dei colmi di portata ottenuti per questo tipo di idrogrammi superano quelli che si ottengono per l'idrogramma sintetico con tempo di ritorno superiore. Si sottolineava infine la crucialità della scelta dell'idrogramma "di progetto". Nel presente capitolo sono quindi presentati i risultati della modellazione 2D della propagazione di due idrogrammi derivati dalle copule per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni (sempre nell'ipotesi di argini sormontabili ma non erodibili).

Infine, dal momento che l'assunzione di argini inerodibili è a sfavore di sicurezza, oltre che piuttosto irrealistica (specialmente per gli eventi più gravosi, con franchi ampiamente negativi e prolungati sormonti), è stata simulata la

propagazione delle onde di piena sintetiche SDH nell'ipotesi di argini erodibili a seguito di tracimazione, secondo un modello morfologico di erosione recentemente sviluppato [12].

4.2 Idrogrammi sintetici SDH con argini inerodibili

Le simulazioni sono condotte per 120 ore (circa 72 ore dopo il transito del colmo dalle sezioni più vallive) e prevedono di valutare la dinamica di allagamento esterna alle arginature in caso di tracimazioni.

Le mappe delle massime profondità idriche ottenute per i due tempi di ritorno sono riportate nella Figura 4-1, mentre la Figura 4-2 riporta indicazioni sui tratti di argine tracimati. Per lo scenario TR 200 anni (Figura 4-1a), si osservano modeste fuoriuscite a monte dell'attraversamento dell'autostrada (all'incirca nelle posizioni corrispondenti alle Brecce 1 SX e 1 DX), trattenute dal rilevato dell'A1. In sinistra idraulica si riscontra una tracimazione a Casaltone (circa nella posizione della Breccia 2 SX), non tale però da superare il rilevato della SP 73: l'allagamento rimane quindi all'interno della Fascia B, che localmente coincide con il rilevato stradale. Più a valle, la piena sormonta localmente l'arginatura in un brevissimo tratto a valle di Sorbolo (circa 500 m a monte della posizione della Breccia 5 SX). In destra idraulica, invece, si osservano discrete tracimazioni in diversi tratti nella zona di Lentigione (sia nella posizione della Breccia 5 DX e della rotta storica del 2017, sia in alcune posizioni più a monte e più a valle). L'allagamento si propaga verso valle con tiranti modesti, mantenendosi in sinistra del Canalazzo di Brescello e interessando Lentigione e la sua area industriale.

Per lo scenario TR 500 anni (Figura 4-1b), si osservano ancora tracimazioni a monte dell'autostrada che, a causa della maggior severità della piena, determinano allagamenti tali da superare il rilevato dell'A1 (anche per sormonto) e della TAV (solo tramite i fornicci presenti). La propagazione di questi allagamenti si "mescola" poi con quelli causati dai sormonti nel tratto successivo, a Casaltone, su entrambe le sponde. Se in destra idraulica le fuoriuscite sono

modeste e tendono ad incanalarsi lungo il paleoalveo dell'Enza, in sinistra il volume fuoriuscito è più ingente: l'allagamento si propaga verso valle, trattenuto in parte dal rilevato della ferrovia Parma-Suzzara e limitato verso Ovest dal Canale Naviglio. Complessivamente, i tiranti idrici sono inferiori a 1 m. Ulteriori sormonti si verificano a Sorbolo, su entrambe le sponde, e ancora più a valle. In sinistra, l'acqua fuoriesce all'incirca nella stessa posizione già individuata per lo scenario TR 200 anni; in destra, si riscontrano diffuse tracimazioni in tutto il tratto che va da Sorbolo a Lentigione. Queste danno origine all'allagamento del centro abitato, della sua zona industriale e di una estesa zona agricola tra argine maestro di Po e Canalazzo di Brescello, con tiranti che raggiungono 1.5 m. Nel tratto terminale non si osservano ulteriori fuoriuscite.

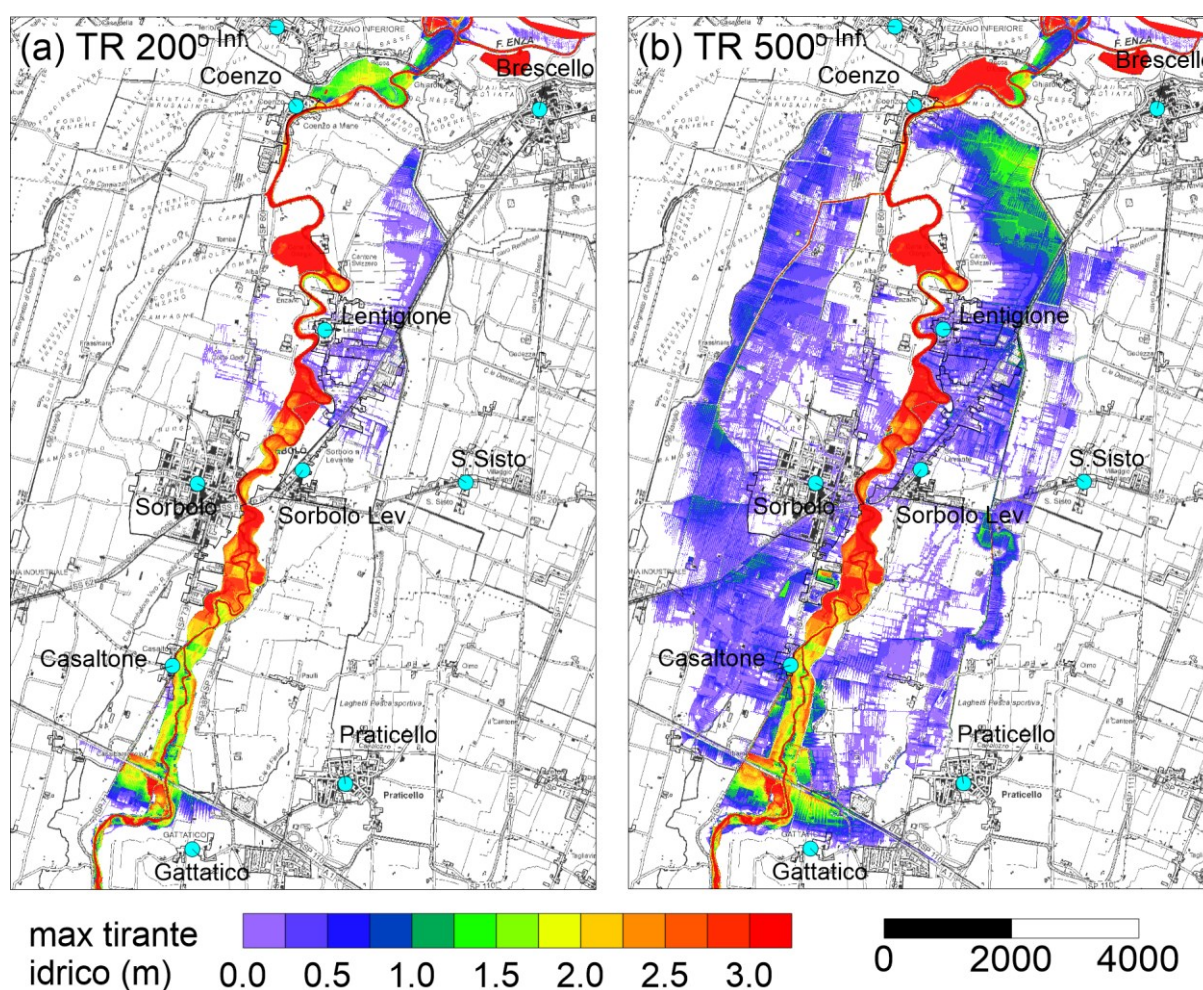


Figura 4-1. Mappe della massima profondità idrica per gli idrogrammi sintetici con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni nell'ipotesi di argini inerodibili.

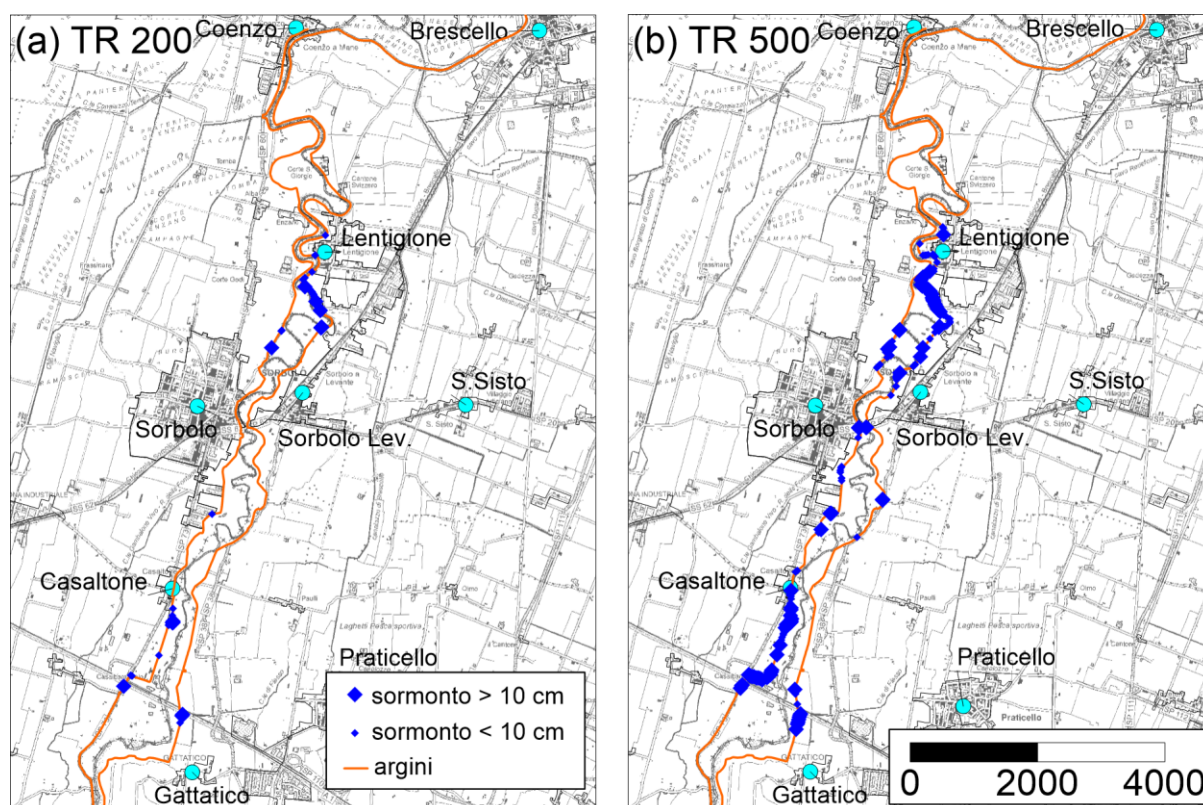


Figura 4-2. Indicazioni dei tratti di argine sormontati con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni, con idrogrammi sintetici nell'ipotesi di argini inerodibili.

La Tabella 4.1 riporta una stima dei volumi esondati per questi due scenari: per TR 200 anni, il volume complessivo che fuoriesce è modesto ($0.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$), mentre per TR 500 anni si superano i $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Tabella 4.1. Stima di volumi esondati e aree allagate nell'ipotesi di argini inerodibili.

Comparto	Area allagata (km^2)		Volume esondato ($\cdot 10^6 \text{ m}^3$)	
	TR500	TR200	TR500	TR200
SX	14.3	0.4	3.2	0.06
DX	13.8	2.3	4.5	0.34
TOT	28.1	2.7	7.7	0.4

4.3 Confronto con esondazioni nell'ipotesi di argini erodibili

Le simulazioni degli eventi con TR 200 e 500 anni (SDH) sono state ripetute utilizzando un'estensione del codice PARFLOOD che implementa un modello di erosione, in grado di simulare l'apertura graduale di una o più brecce nel caso di sormonto dell'arginatura [12]. Tale modello è peraltro già stato utilizzato per la ricostruzione dell'evento del dicembre 2017 nel POA precedente [1].

Prima di presentare i risultati delle simulazioni, è necessario precisare quali sono le ipotesi semplificative alla base del modello e le sue limitazioni. Il modello prevede l'innescò di una breccia, solo nel caso di sormonto, qualora lo sforzo tangenziale esercitato dalla corrente sulla sommità arginale superi un valore critico; in tal caso, il tasso di erosione del terreno è calcolato adottando una legge lineare in funzione di un parametro (il coefficiente di erodibilità) che dipende dal tipo di materiale che costituisce l'argine. Questo approccio ha quindi il vantaggio di garantire che la posizione e l'ampiezza della breccia (o di più brecce), la sua forma e l'evoluzione nel tempo, anziché essere impostati come parametri di input del modello, derivino automaticamente dalle caratteristiche dell'argine e dalle condizioni idrodinamiche della corrente. Una prima limitazione è però costituita dall'ipotesi di distribuzione idrostatica delle pressioni tipica delle equazioni alle acque basse, che potrebbe non essere localmente soddisfatta durante l'apertura di una breccia (pendenze elevate, accelerazioni verticali non trascurabili). Si assume poi che il materiale che costituisce tutte le arginature sia omogeneo, mentre spesso nella pratica si riscontrano argini stratificati, zonati o con caratteristiche diverse da un tratto all'altro. Queste assunzioni possono influire sull'evoluzione delle eventuali brecce. Peraltro, la larghezza finale della breccia risulta in parte dipendente dal valore del coefficiente di erodibilità, mentre la portata in uscita dalla breccia ne è solo debolmente influenzata. Inoltre, il modello non tiene conto della possibilità di innescò di brecce per piping o altri meccanismi, limitandosi al sormonto, e trascura i processi di deposito, di infiltrazione e di trasporto solido in sospensione. Infine, l'individuazione dei tratti sormontati può risentire delle incertezze sulle quote delle sommità arginali

(dell'ordine di 15 cm per i rilievi Lidar), oltre che chiaramente di tutte le altre incertezze della modellazione idrodinamica (condizioni al contorno, scabrezza, geometria dell'alveo, ecc.).

Ciò premesso, si può tuttavia ritenere il modello di erosione uno strumento utile per valutare la possibile apertura di una o più brecce nel caso di eventi particolarmente gravosi (non contenibili dalle arginature). I risultati ottenuti, per quanto frutto di un modello sviluppato accettando alcune ipotesi semplificative, rappresentano sicuramente uno scenario più realistico rispetto all'ipotesi di argini inerodibili assunta in precedenza. Per i parametri del modello, si sono adottati gli stessi valori individuati per la ricostruzione dell'evento del dicembre 2017.

Le mappe delle massime profondità idriche ottenute nel caso di argini erodibili sono rappresentate nella Figura 4-3, mentre la Figura 4-4 riporta l'indicazione dei tratti di argine sormontati e in cui si formano brecce. Per lo scenario TR 200 anni (Figura 4-3a e Figura 4-4a), l'argine viene eroso in corrispondenza dei sormonti a monte dell'attraversamento autostradale: in destra, in particolare, si apre una breccia larga circa 35 m, mentre in sinistra una larga appena 10 m. Si formano inoltre due brecce in sinistra a monte di Casaltone, larghe circa 15 m e 20 m: quella più valliva è collocata nella stessa posizione della Breccia 2 SX e l'allagamento conseguente ha una dinamica simile a quello di tale breccia, anche in termini di tiranti idrici massimi. In destra idraulica, si osserva l'apertura di due brecce ravvicinate (larghezza totale di circa 35-40 m) nella stessa posizione della rotta del dicembre 2017. L'allagamento è simile a quello della Breccia 5 DX, ma con riferimento al tempo di ritorno di 20 anni.

Analizzando invece lo scenario TR 500 anni (Figura 4-3b e Figura 4-4b), si possono osservare rotture arginali nelle stesse posizioni individuate per TR 200 anni, anche se le brecce risultano più ampie. In particolare, a monte dell'A1 la breccia sinistra è larga circa 20 m e quella in destra più di 50 m; a monte di Casaltone, le due brecce sono invece larghe 35 m e 115 m ed accompagnate da un'ulteriore rotta larga circa 20 m poco più a valle; a Lentigione, le due brecce ravvicinate superano la larghezza complessiva di 50 m. Altrove, è possibile

individuare tratti di argine sormontato ed eroso, ma senza la formazione di una vera e propria breccia. Gli allagamenti hanno dinamiche simili a quelle dello scenario TR 200 anni, ma con aree allagate più estese e tiranti massimi più elevati. In sinistra, comunque, non vengono superati verso Ovest i Canali Naviglio e Terrieri, mentre in destra l'allagamento risulta confinato a Est del Canalazzo di Brescello, con l'eccezione di una piccola area allagata con tiranti idrici modesti a causa dello scorrimento verso valle dell'acqua che si incanala lungo il paleoalveo dell'Enza.

Per questi scenari, il volume esondato è chiaramente maggiore di quello che si otteneva nell'ipotesi irrealistica di argini inerodibili, come è possibile verificare dai dati riportati nella Tabella 4.2.

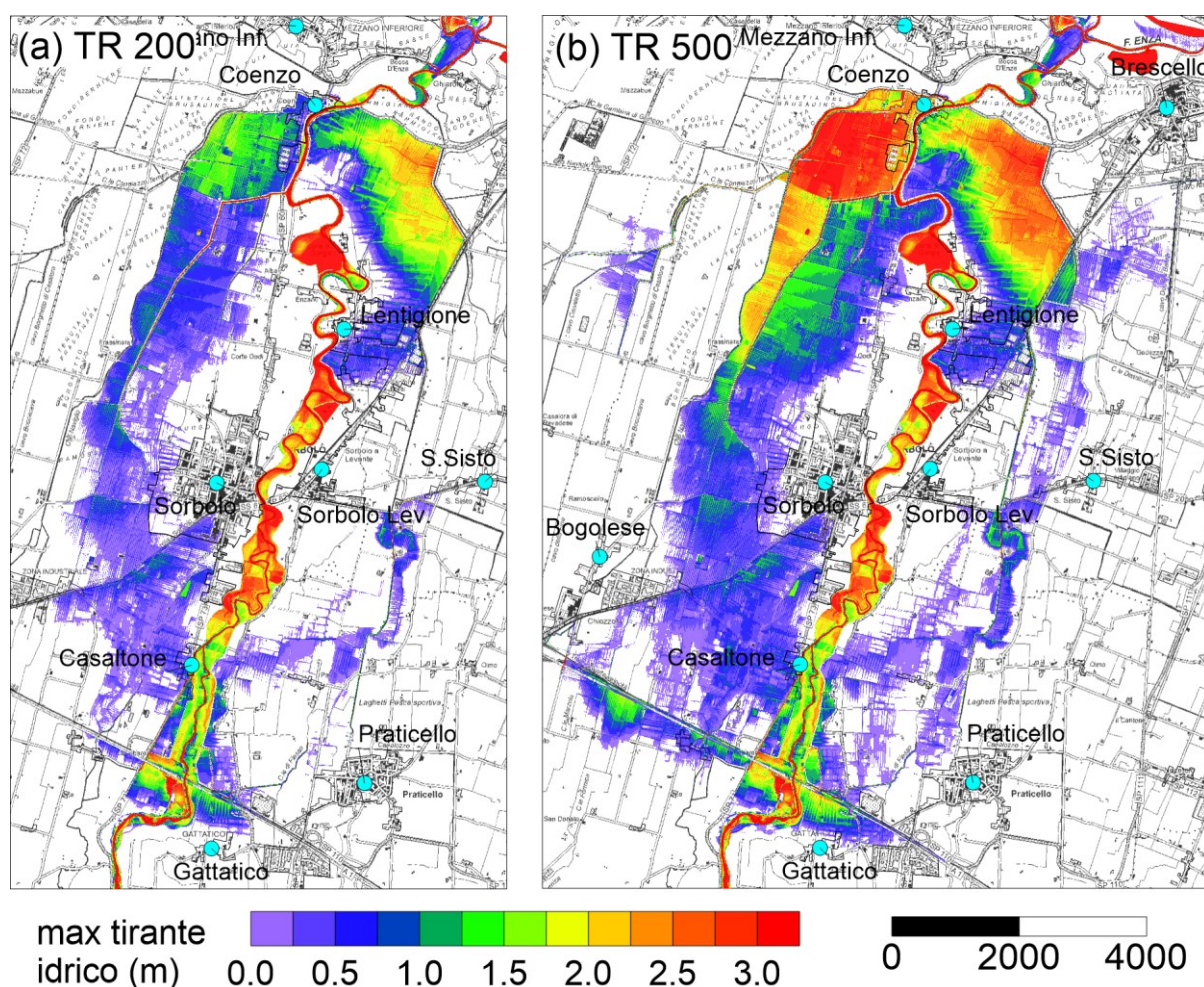


Figura 4-3. Mappe della massima profondità idrica per gli idrogrammi sintetici con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni nell'ipotesi di argini erodibili.

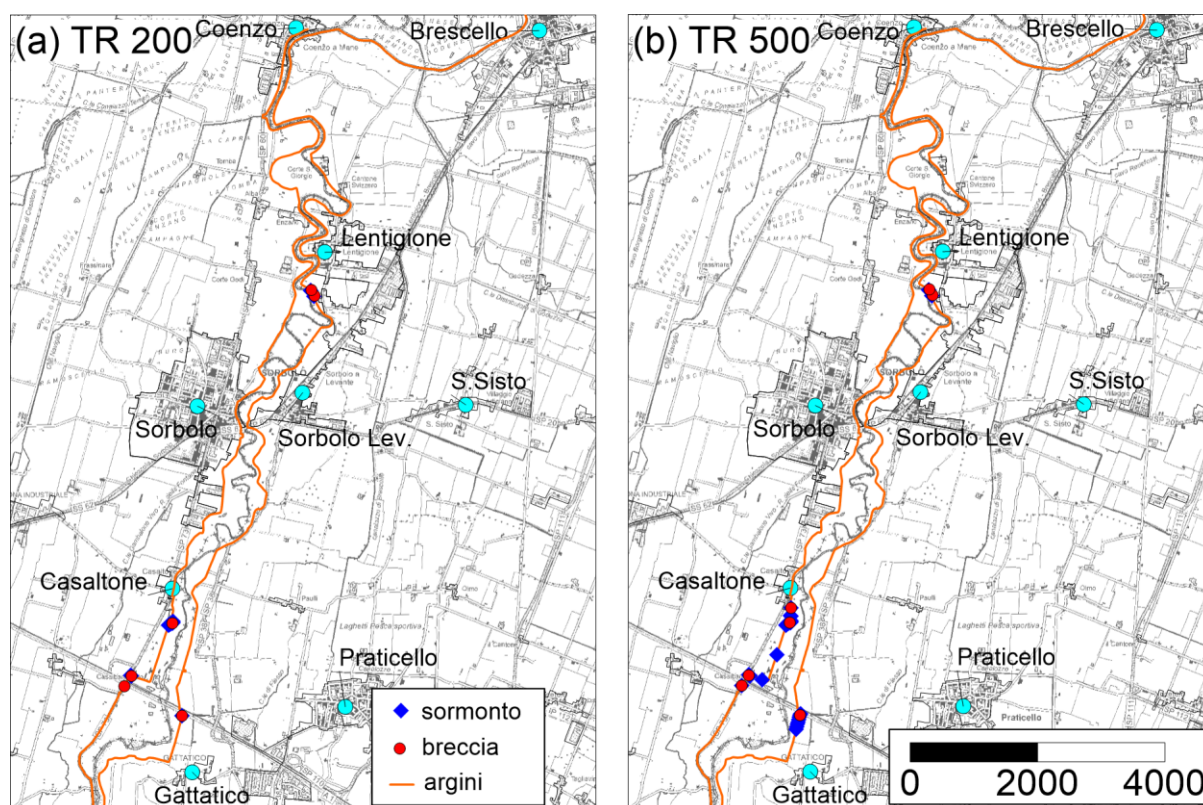


Figura 4-4. Indicazioni dei tratti di argine sormontati e in cui si formano brecce con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni, con idrogrammi sintetici nell'ipotesi di argini erodibili.

Tabella 4.2. Stima di volumi esondati e aree allagate nell'ipotesi di argini erodibili.

Comparto	Area allagata (km ²)		Volume esondato ($\cdot 10^6$ m ³)	
	TR500	TR200	TR500	TR200
SX	21.7	13.5	16.5	5.6
DX	14.1	8.5	10.6	6.7
TOT	35.8	22.0	27.1	12.3

4.4 Confronto con idrogrammi derivati dalle copule

Per analizzare l'influenza della scelta dell'idrogramma (con prefissato tempo di ritorno) sul volume esondato al di fuori delle arginature, sono stati presi in considerazione, in alternativa agli idrogrammi SDH, due degli idrogrammi ricavati dalle copule proposti nello studio di ARPAE [9]. In particolare, sulla base delle indicazioni ricavate dal POA precedente [1], sono state selezionate le

copule n.5 e n.10. Con riferimento alla sezione a valle della confluenza con Termina e Masdone, per un prefissato tempo di ritorno, la copula n.10 è infatti caratterizzata dallo stesso valore di portata al colmo dell'idrogramma SDH, mentre la copula n.5 ha un colmo leggermente inferiore, ma un volume di piena superiore. A seguito della propagazione degli idrogrammi attraverso il modello 1D, tuttavia, si ottengono onde di piena laminate (in uscita dal sistema di casse di espansione) caratterizzate da valori della portata al colmo significativamente maggiori da quelli ricavati per gli idrogrammi SDH. In questa sede è stata assunta la forma d'onda "alla Nash": si tratta di una scelta cautelativa, in quanto le simulazioni 1D condotte nel precedente POA avevano mostrato come tale forma d'onda fosse quella che determinava i risultati più gravosi per l'asta di valle. La Figura 4-5a mostra il confronto tra le due onde di piena a valle delle casse ricavate dalle copule n.5 e n.10 e l'onda SDH per TR 200 anni. Gli stessi idrogrammi sono riportati nella Figura 4-5b nel caso di TR 500 anni. Si nota immediatamente come il colmo aumenti da circa 600 m³/s per l'onda SDH a circa 900 m³/s per le due copule nel caso di TR 200 anni; tale valore è addirittura più elevato del colmo di portata dell'onda SDH con TR 500 anni (circa 810 m³/s); per questo tempo di ritorno, il colmo è attorno a 1100 m³/s per le due copule. Anche i volumi di piena che superano prefissate soglie di portata sono molto maggiori nel caso delle onde ricavate dalle copule rispetto agli idrogrammi sintetici SDH.

I quattro idrogrammi ricavati dalle copule n.5 e n.10 (forma d'onda alla Nash) a valle delle casse per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni sono stati utilizzati come condizioni al contorno di monte per le quattro simulazioni della propagazione lungo l'asta di valle, nell'ipotesi di argini sormontabili ma non erodibili.

La Figura 4-6 rappresenta la mappa dei massimi tiranti ottenuti dalle simulazioni relative alla propagazione degli idrogrammi ricavati dalla copula n.5 (Nash) per TR 200 e 500 anni, mentre la Figura 4-7 rappresenta i medesimi risultati per il caso della copula n.10. Inoltre, la Figura 4-8 riporta un'indicazione dei tratti di arginatura sormontati per questi due tempi di ritorno nel caso della copula n.5

(per la copula n.10, i tratti sormontati sono sostanzialmente i medesimi, per cui non sono rappresentati in figura).

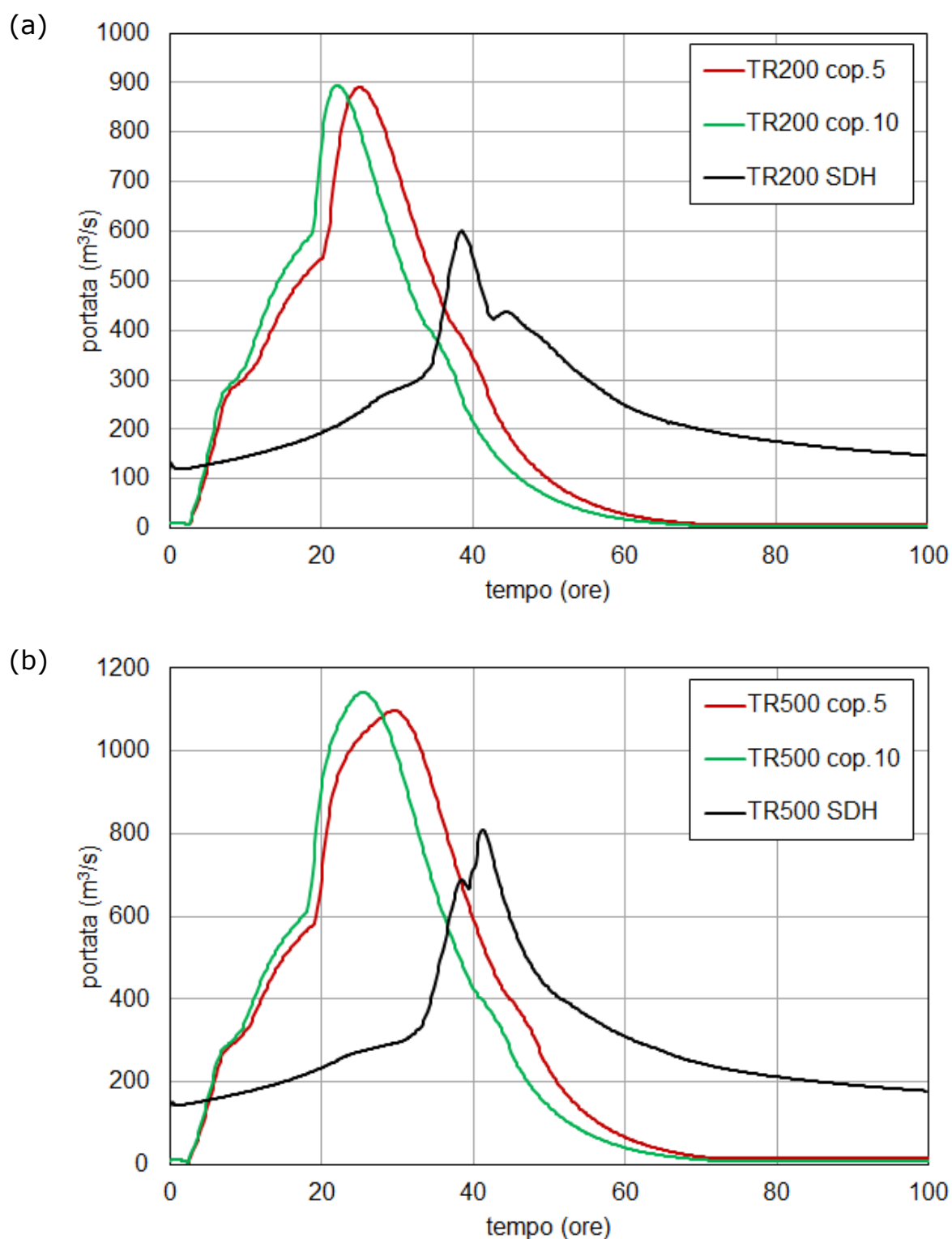


Figura 4-5. Idrogramma di portata in uscita a valle delle casse d'espansione per i metodi SDH e copule (5 e 10, forma d'onda alla Nash): (a) TR 200 e (b) TR 500 anni.

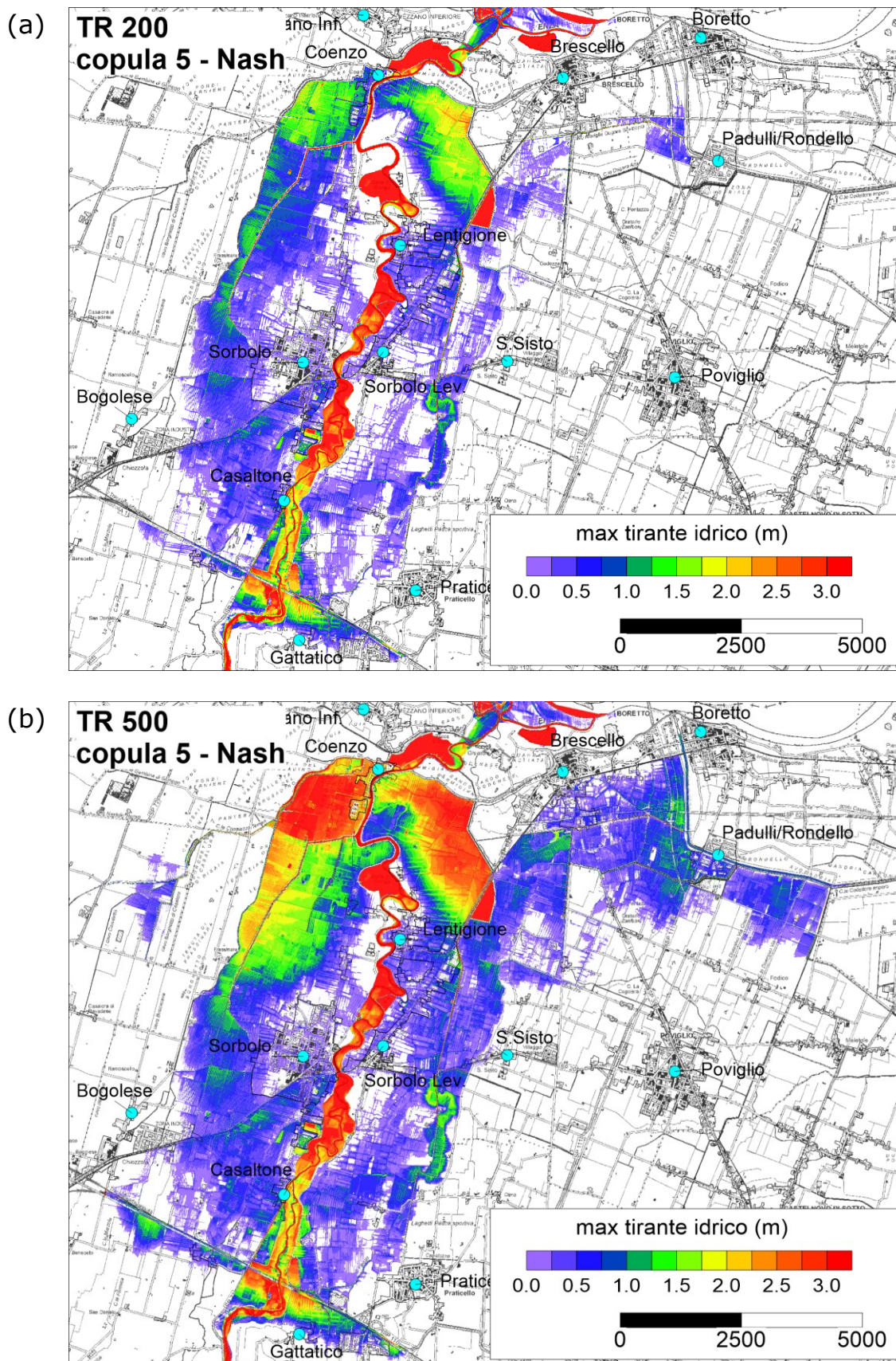


Figura 4-6. Mappe della massima profondità idrica per gli idrogrammi ricavati dalla copula n.5 (Nash) con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni nell'ipotesi di argini inerodibili.

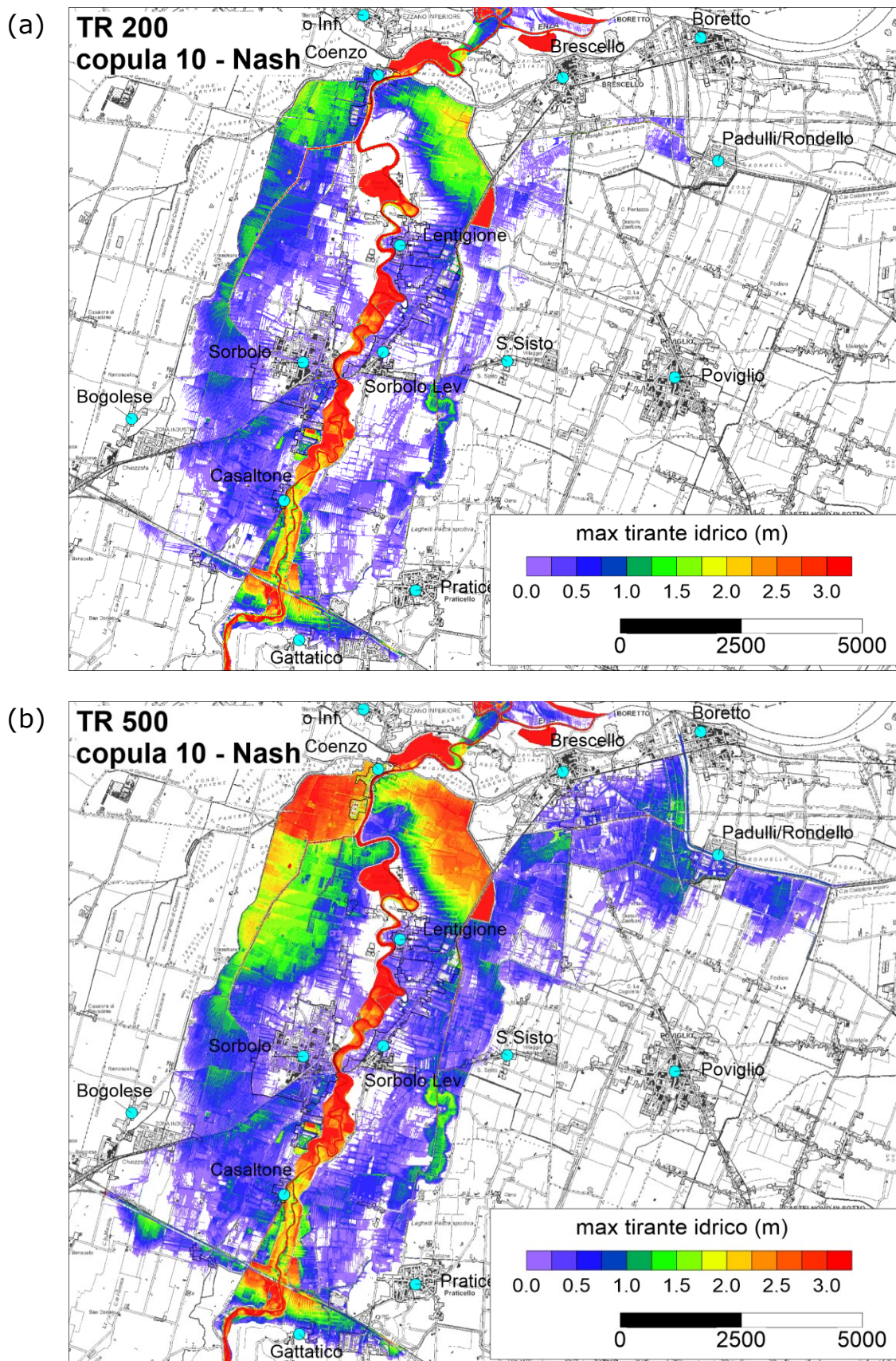


Figura 4-7. Mappe della massima profondità idrica per gli idrogrammi ricavati dalla copula n.10 (Nash) con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni nell'ipotesi di argini inerodibili.

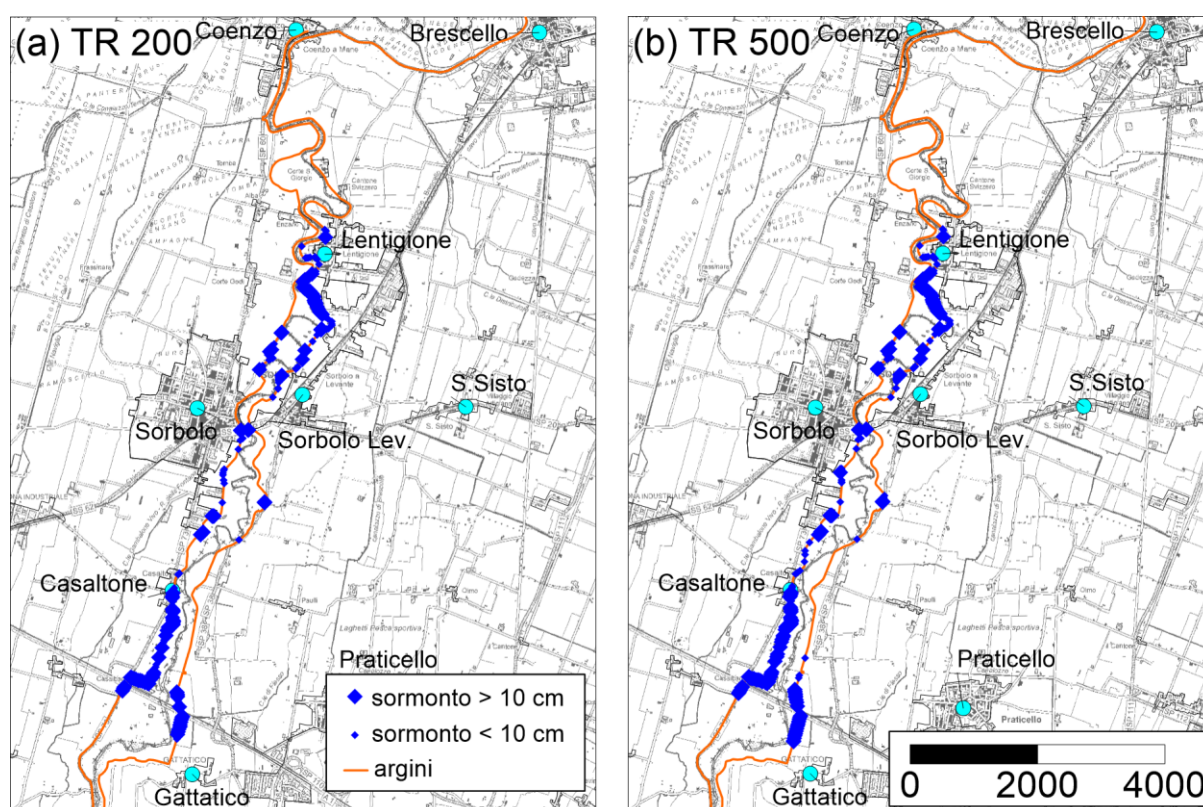


Figura 4-8. Indicazioni dei tratti di argine sormontati con (a) TR 200 e (b) TR 500 anni, con idrogrammi derivati dalla copula 5 (Nash) nell'ipotesi di argini inerodibili.

Dall'analisi dei risultati di queste simulazioni, emerge immediatamente la grande differenza rispetto ai risultati ottenuti in precedenza per il caso dell'onda di piena SDH (Figura 4-1), mentre le differenze nei risultati tra la copula n.5 e n.10 non sono particolarmente significative: il caso della copula n.5 è solo leggermente più gravoso rispetto alla copula n.10 per entrambi i tempi di ritorno.

Per il tempo di ritorno di 200 anni, le arginature sono ampiamente tracimate da monte dell'attraversamento dell'A1 fino a valle di Lentigione. I tratti sormontati (Figura 4-8a) sono all'incirca gli stessi che si riscontravano nel caso dell'onda SDH per il tempo di ritorno superiore (Figura 4-2b). L'allagamento extra-fluviale (Figura 4-6a) è notevolmente più esteso rispetto a quello (limitatissimo) ottenuto per l'onda SDH con TR 200 anni (Figura 4-1a), ma presenta tiranti idrici più elevati persino di quelli risultanti dalle tracimazioni per l'onda SDH con TR 500 anni (Figura 4-1b). In sinistra idraulica, i sormonti a cavallo dell'attraversamento dell'A1 e a Casaltone determinano la propagazione di un

fronte di allagamento verso Nord che, superato il rilevato ferroviario della linea Parma-Suzzara, prosegue addossandosi agli argini dei canali Naviglio e Terrieri e arrivando a Coenzo, dove l'acqua si accumula con tiranti superiori a 1-1.5 m. Sono presenti inoltre tracimazioni di minore entità sia a monte sia a valle di Sorbolo. In destra idraulica, le prime tracimazioni avvengono a cavallo dell'attraversamento dell'A1: il volume idrico fuoriuscito si incanala in direzione del paleoalveo dell'Enza. Ulteriori sormonti avvengono in alcuni brevi tratti in prossimità di Sorbolo, ma sicuramente i sormonti più significativi sono quelli che si osservano a monte di Lentigione (all'incirca nella posizione della rotta storica del 2017). L'acqua si accumula tra l'argine maestro di Po e il Canalazzo di Brescello (con tiranti anche superiori a 2 m nei punti più depressi), mentre verso Est gli allagamenti sono modesti.

Focalizzandosi invece sull'evento con la più bassa probabilità di accadimento (TR 500 anni), è possibile notare che i tratti di arginatura sormontati (Figura 4-8b) sono solo leggermente più estesi rispetto al tempo di ritorno inferiore. Tuttavia, a causa della maggior severità dell'evento, l'entità delle tracimazioni determina un allagamento più vasto e tiranti idrici massimi più elevati (Figura 4-6b). In particolare, le profondità idriche nelle aree a Nord delimitate dagli argini del reticolo di bonifica superano i 2.5 m sia in sinistra sia in destra idraulica. Nel comparto Est risulta poi allagata un'ampia area a Sud di Brescello, che si estende verso Est addossandosi contro il Canale Derivatore e il Cavo Risalita, anche se con tiranti inferiori a 1 m.

La Tabella 4.3 sintetizza i dati quantitativi delle aree allagate e dei volumi esondati ottenuti da questo set di simulazioni. Rispetto al caso dell'onda SDH (Tabella 4.1), il volume idrico fuoriuscito per tracimazione passa da circa $7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a circa $33 \div 37 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ nel caso delle copule per TR 500 anni; di conseguenza, l'area allagata risulta quasi raddoppiata (da circa 28 km^2 a $57 \div 59 \text{ km}^2$). Questo risultato, in termini di volume, è addirittura più gravoso rispetto a quanto emerso nel caso dell'idrogramma SDH con argini erodibili (circa $27 \cdot 10^6 \text{ m}^3$). Per TR 200 anni, la differenza rispetto all'onda SDH è ancora più evidente, dal momento che l'area allagata passa addirittura da circa 3 km^2 a

36÷67 km² e il volume esondato arriva a 14÷15·10⁶ m³ (contro i circa 400'000 m³ dell'idrogramma SDH per il medesimo tempo di ritorno).

Si noti infine che, per entrambi i tempi di ritorno, l'assunzione di arginature non erodibili è particolarmente irrealistica per questi scenari, alla luce delle significative tracimazioni che sicuramente innescerebbero una o più brecce nei tratti di arginatura più vulnerabili.

Tabella 4.3. Stima di volumi esondati e aree allagate per gli scenari relativi agli idrogrammi derivati dalle copule, nell'ipotesi di argini inerodibili.

Scenario	Comparto	Area allagata (km ²)		Volume esondato (·10 ⁶ m ³)	
		TR500	TR200	TR500	TR200
Copula 5 – argini inerodibili	SX	24.9	19.0	19.7	7.0
	DX	34.0	18.5	17.4	8.1
	TOT	58.9	37.5	37.1	15.1
Copula 10 – argini inerodibili	SX	23.6	18.5	17.0	6.6
	DX	33.4	17.8	16.1	7.5
	TOT	57.0	36.3	33.1	14.1

4.5 Considerazioni conclusive

Le simulazioni condotte hanno permesso di quantificare il volume non contenibile dalle arginature per i tempi di ritorno di 200 e 500 anni. In particolare, il volume fuoriuscito è dell'ordine dei 7·10⁶ m³ per il tempo di ritorno più elevato, se si considera l'idrogramma sintetico SDH.

Si sottolinea nuovamente che l'ipotesi di argini inerodibili qui utilizzata non è a favore di sicurezza, oltre a essere poco realistica, dal momento che le tracimazioni non sono trascurabili né per livello né per durata e probabilmente darebbero origine a rotture arginali. Risultati più realistici possono essere ottenuti se si assume che gli argini possano erodersi nel caso di sormonto. Nel presente studio, si è fatto ricorso ad un modello di erosione che, nonostante le necessarie semplificazioni e alcune limitazioni, permette di prevedere la possibile apertura di una o più brecce durante il transito di un'onda non contenibile dalle arginature. Il modello suggerisce potenziali rotture nei tratti in cui si concentrano

i sormonti più significativi, ossia a cavallo dell'attraversamento dell'A1, a Casaltone in sinistra e a Lentigione in destra. Del resto, questi punti sono già stati identificati come quelli più vulnerabili nelle analisi condotte nel POA 2018 [1]. Si sottolinea tuttavia che il modello trascura la possibilità di innesco di brecce per piping o altri meccanismi di rottura, per cui potrebbero esistere altri tratti arginali vulnerabili in caso di eventi gravosi.

Nella presente attività, è stato inoltre approfondito il tema dell'influenza della scelta dell'idrogramma di "progetto" con prefissato tempo di ritorno sui potenziali allagamenti. Se si utilizzano gli idrogrammi ricavati dalle copule, si ottengono risultati radicalmente diversi da quelli ottenuti nel caso dell'idrogramma sintetico SDH. In particolare, il volume esondato, nell'ipotesi di argini non erodibili, è di gran lunga superiore: di conseguenza, l'area allagata è più estesa e i massimi tiranti sono più elevati. Le notevoli differenze sono dovute non solo ai maggiori valori del colmo di portata (a parità di tempo di ritorno) degli idrogrammi ricavati dalle copule in uscita dal sistema di casse rispetto alle onde sintetiche SDH, ma anche e soprattutto al maggiore volume sopra prefissate soglie di portata che caratterizza la forma d'onda alla Nash. Addirittura, lo scenario relativo alle copule per TR 200 anni è più severo di quello ottenuto con idrogrammi SDH per TR 500 anni. Nella presente attività, è stata cautelativamente presa in considerazione la forma alla Nash, ma forme d'onda diverse (ad esempio quella dell'invaso lineare) presentano comunque colmi di portata e volumi sopra soglia superiori a quelli dell'idrogramma sintetico SDH (si veda il POA 2018 [1]): i volumi fuoriusciti sarebbero quindi probabilmente molto maggiori di quelli ottenuti per le onde SDH anche se si assumesse a priori una forma d'onda differente.

È tuttavia necessario precisare che, mentre i valori equiprobabili delle coppie portata al colmo-volume (copule) derivano da un'elaborazione statistica di serie storiche di portata sul torrente Enza, la scelta della forma d'onda è arbitraria e la forma alla Nash (ma lo stesso vale per altre forme proposte, come quella triangolare o quella dell'invaso lineare) non può essere considerata del tutto rappresentativa dell'andamento tipico delle onde di piena dello specifico corso d'acqua. Le elaborazioni delle serie storiche di portata che portano alla

definizione degli idrogrammi sintetici SDH, invece, tengono conto anche della distribuzione temporale del volume di piena, oltre che dei valori dei colmi: tali forme d'onda possono dunque essere ritenute maggiormente rappresentative del comportamento del bacino dell'Enza. In ogni caso, si sottolinea ancora una volta come la scelta dell'idrogramma di "progetto" con prefissato tempo di ritorno sia cruciale ai fini delle analisi relative alla pericolosità idraulica nei territori potenzialmente allagabili a seguito di tracimazioni/rotture lungo l'asta arginata del torrente Enza, oltre che ai fini della valutazione dell'efficienza del sistema di casse d'espansione.

Si precisa infine che le mappe dei tiranti relative al tratto di monte dell'asta del torrente Enza (da valle delle casse a monte dell'attraversamento dell'A1) non sono state rappresentate in quanto, in tale tratto, l'allagamento è completamente contenuto nella perimetrazione della Fascia B per tutti gli scenari simulati.

5 Conclusioni

Nella seconda parte delle attività del POA 2019 sono stati analizzati, tramite simulazioni numeriche bidimensionali, gli scenari di allagamento conseguenti a brecce arginali ipotetiche che si innescano durante eventi di piena con tempo di ritorno di 20, 200 e 500 anni. Sono inoltre stati analizzati i volumi esondati nell'ipotesi di argini inerodibili. I principali risultati ottenuti sono riportati nella presente relazione e nel materiale allegato.

Le simulazioni degli scenari di allagamento conseguenti a brecce arginali in alcune posizioni prefissate, oltre a fornire indicazioni utili ai fini di protezione civile, consentono di identificare le aree allagabili per eventi di piena con probabilità di accadimento medio-bassa e i corrispondenti tiranti idrici massimi. Si suggerisce quindi che la metodologia utilizzata nella presente attività possa essere adottata per l'aggiornamento delle mappe di pericolosità (tiranti e velocità) del PGRA nel tratto arginato del torrente Enza, ma anche di altri corsi d'acqua arginati nel bacino del Po. La mappa di inviluppo dei massimi tiranti idrici può infatti ricomprendere numerosi possibili scenari di allagamento, dovuti a tracimazioni o a rotte arginali che avvengono non solo per sormonto, ma anche per meccanismi diversi (es. piping). L'utilizzo di un modello bidimensionale completo, ad alta risoluzione spaziale e basato su rilievi topografici recenti garantisce un alto livello di affidabilità, grazie alla possibilità di descrivere nel dettaglio la dinamica di allagamento, peraltro fortemente influenzata dai rilevati presenti nel territorio.

Si sottolinea tuttavia l'importanza della scelta dell'idrogramma di progetto con prefissato tempo di ritorno. Infatti, le simulazioni condotte per il caso di propagazione delle onde di piena nell'ipotesi di argini non erodibili (quindi in assenza di brecce) hanno mostrato che tale scelta può influenzare notevolmente i risultati (area allagata e volume esondato). Nel caso specifico, gli allagamenti ottenuti dalle simulazioni relative alla propagazione di idrogrammi derivati dalle copule (con forma d'onda scelta arbitrariamente, in questo caso "alla Nash")

sono significativamente più gravosi di quelli che si ottengono nel caso degli idrogrammi sintetici SDH a parità di tempo di ritorno.

6 Ringraziamenti

Si ringraziano l'Autorità di bacino distrettuale del fiume Po, l'Agenzia Interregionale del fiume Po, ARPAE, la Regione Emilia Romagna e tutti i componenti della cabina di regia Enza per la fornitura dei dati, le proficue discussioni ed i suggerimenti scaturiti in occasione delle varie riunioni svolte durante il periodo di sviluppo della presente attività.

7 Bibliografia

- [1] Università degli Studi di Parma (DIA) e Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po (2019). Approfondimento tecnico-scientifico delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta del fiume Po e dei suoi principali affluenti. Asta del Torrente Enza – Relazione delle attività del POA (prima annualità).
- [2] Università degli Studi di Parma (DIA) e Autorità di Bacino Distrettuale del fiume Po (2020). Approfondimento tecnico-scientifico delle condizioni di sicurezza idraulica dei territori di pianura lungo l'asta del fiume Po e dei suoi principali affluenti. Asta del Torrente Enza – Relazione delle attività del POA (seconda annualità – Attività di studio 1).
- [3] D'Alpaos, L., Brath, A., Fioravante, V., Gottardi, G., Mignosa, P., Orlandini, S. (2014). Relazione tecnico-scientifica sulle cause del collasso dell'argine del fiume Secchia avvenuto il giorno 19 gennaio 2014 presso la frazione San Matteo Regione Emilia-Romagna, Bologna.
- [4] Vacondio R., Dal Palù A., Mignosa P. (2014). GPU-enhanced Finite Volume Shallow Water solver for fast flood simulations, *Environmental Modelling & Software*, ENVSOFT-D-13-00494.
- [5] Vacondio, R., Dal Palù, A., Ferrari, A., Mignosa, P., Aureli, F., Dazzi, S. (2017). A non-uniform efficient grid type for GPU-parallel Shallow Water Equations models. *Environmental Modelling & Software*, 88, 119-137.
- [6] Schubert, J., Sanders, B. (2012). Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency. *Advances in Water Resources*, 41, 49-64.
- [7] Vacondio, R., Aureli, F., Ferrari, A., Mignosa, P., Dal Palù, A. (2016). Simulation of the January 2014 flood on the Secchia River using a fast and high-resolution 2D parallel shallow-water numerical scheme. *Natural Hazards*, 80(1), 103-125.
- [8] Tomirotti, M., & Mignosa, P. (2017). A methodology to derive Synthetic Design Hydrographs for river flood management. *Journal of Hydrology*, 555, 736-743.
- [9] ARPAE. Attività di studio finalizzate all'analisi dell'evento di piena dell'11-12 dicembre 2017 ed all'aggiornamento del quadro conoscitivo relativo alle condizioni di pericolosità e di rischio idraulico lungo il torrente Enza.
- [10] Università degli Studi di Parma (DIA) (2017). Progetto RESILIENCE - Relazione delle attività del POA 2016.
- [11] Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N. T., & Rosso, R. (2007). *Extremes in nature: an approach using copulas* (Vol. 56). Springer Science & Business Media.
- [12] Dazzi, S., Vacondio, R., and Mignosa, P. (2019). Integration of a Levee Breach Erosion Model in a GPU-accelerated 2D Shallow Water Equations Code. *Water Resources Research*, 55, 682-702.
- [13] Dottori, F., Martina, M. L. V., & Figueiredo, R. (2018). A methodology for flood susceptibility and vulnerability analysis in complex flood scenarios. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S632-S645.

APPENDICE A. Modello numerico

Il modello numerico realizzato presso il DICATeA (ora DIA) dell'Università degli Studi di Parma è basato su una discretizzazione ai volumi finiti delle equazioni bidimensionali complete del moto a superficie libera nell'approssimazione alle acque basse (SWE, forma bidimensionale delle equazioni di conservazione della massa e del flusso di quantità di moto). L'integrazione delle equazioni nel tempo mediante uno schema di tipo esplicito, unitamente all'utilizzo di un metodo ai volumi finiti, garantisce la conservazione della massa e dei flussi della quantità di moto, ed assicura una robusta descrizione dei fronti di bagnamento ed asciugamento, indispensabile per simulare correttamente fenomeni di moto rapidamente vario, quali quelli che si innescano a seguito di un cedimento arginale. Uno speciale trattamento numerico dei flussi nelle celle con altezze d'acqua molto ridotte garantisce altresì che il volume risulti conservato anche in presenza di fronti mobili molto ampi, come quelli che si possono presentare nei fenomeni di allagamento su batimetrie inizialmente asciutte. L'utilizzo di un elevato ordine di accuratezza (sia nel tempo che nello spazio) consente di ricostruire in maniera accurata onde di shock e di rarefazione senza dover introdurre termini di tipo diffusivo, privi di fondamento fisico. Un'opportuna descrizione del termine di pendenza consente nel contempo la conservazione della condizione statica di acqua in quiete su topografia accidentata (C-property). Una speciale metodologia di ricostruzione delle profondità idriche consente poi di evitare problemi numerici di stabilità del codice, anche in presenza di elevate pendenze della superficie libera.

Le prestazioni di schemi numerici di questo tipo, ed in particolare dello schema adottato nello studio, sono ben documentate nella letteratura tecnica sia per i casi teorici in cui sia disponibile una soluzione analitica o un'accurata soluzione numerica di riferimento, sia in applicazioni di ipotetici scenari di crolli arginali su batimetrie reali.

Per consentire la modellazione di molteplici scenari di allagamento, su territori di estensione pari a quelli oggetto del presente studio, l'algoritmo di risoluzione è implementato in un codice sviluppato in ambiente CUDA (Compute Unified Device Architecture) applicazione che consente di eseguire calcolo parallelo sulle GPUs (Graphics Processing Units) di NVIDIA. L'utilizzo di un codice di calcolo di tipo parallelo, in luogo di un tradizionale codice seriale, permette una drastica riduzione dei tempi di calcolo (di circa due ordini di grandezza) consentendo di effettuare agevolmente simulazioni su domini di diversi milioni di celle ([4]-[5]), altrimenti impossibili.

APPENDICE B. Mappe delle massime profondità idriche per le brecce con TR 200 e 20 anni

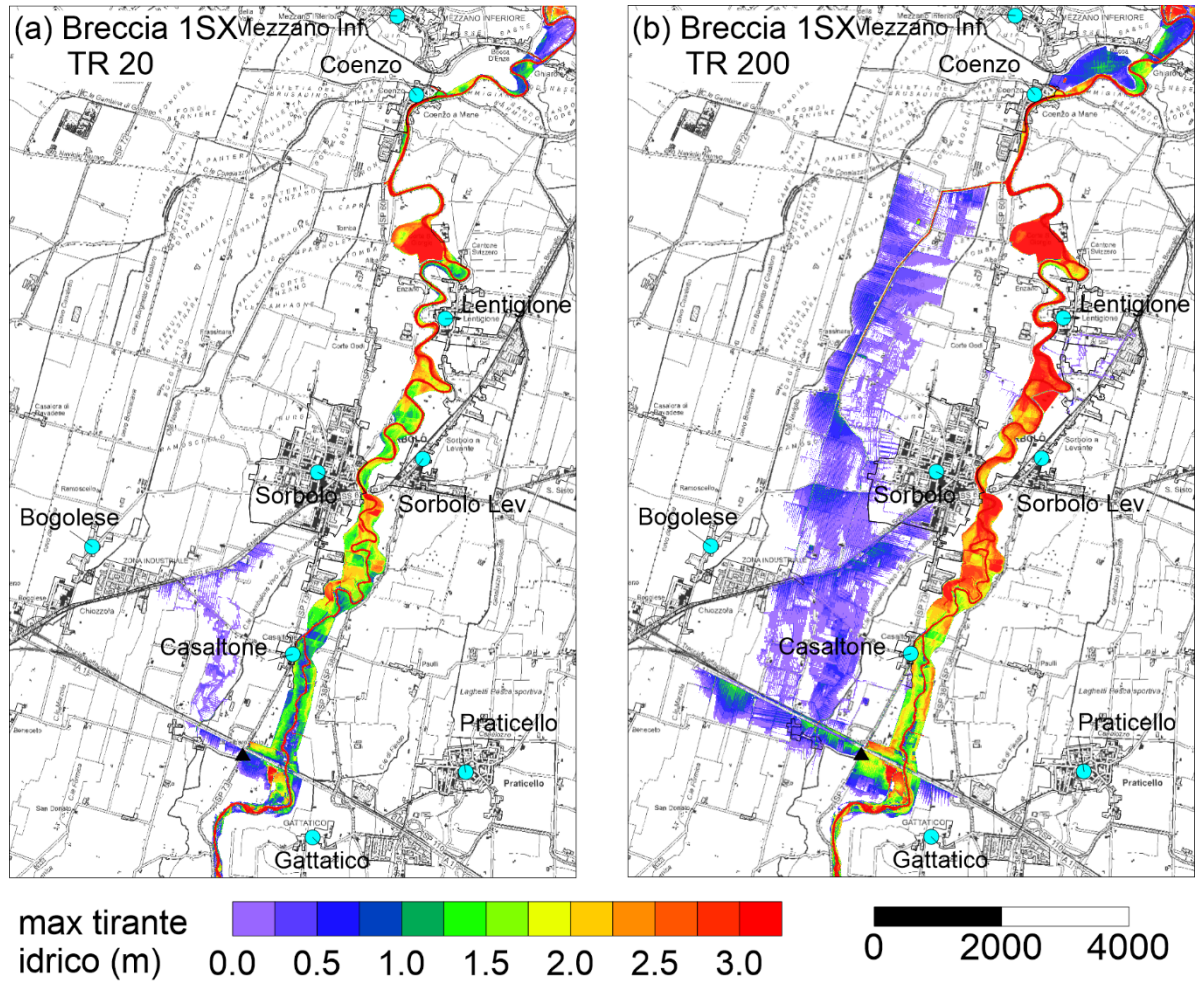


Figura B-1. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 1 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

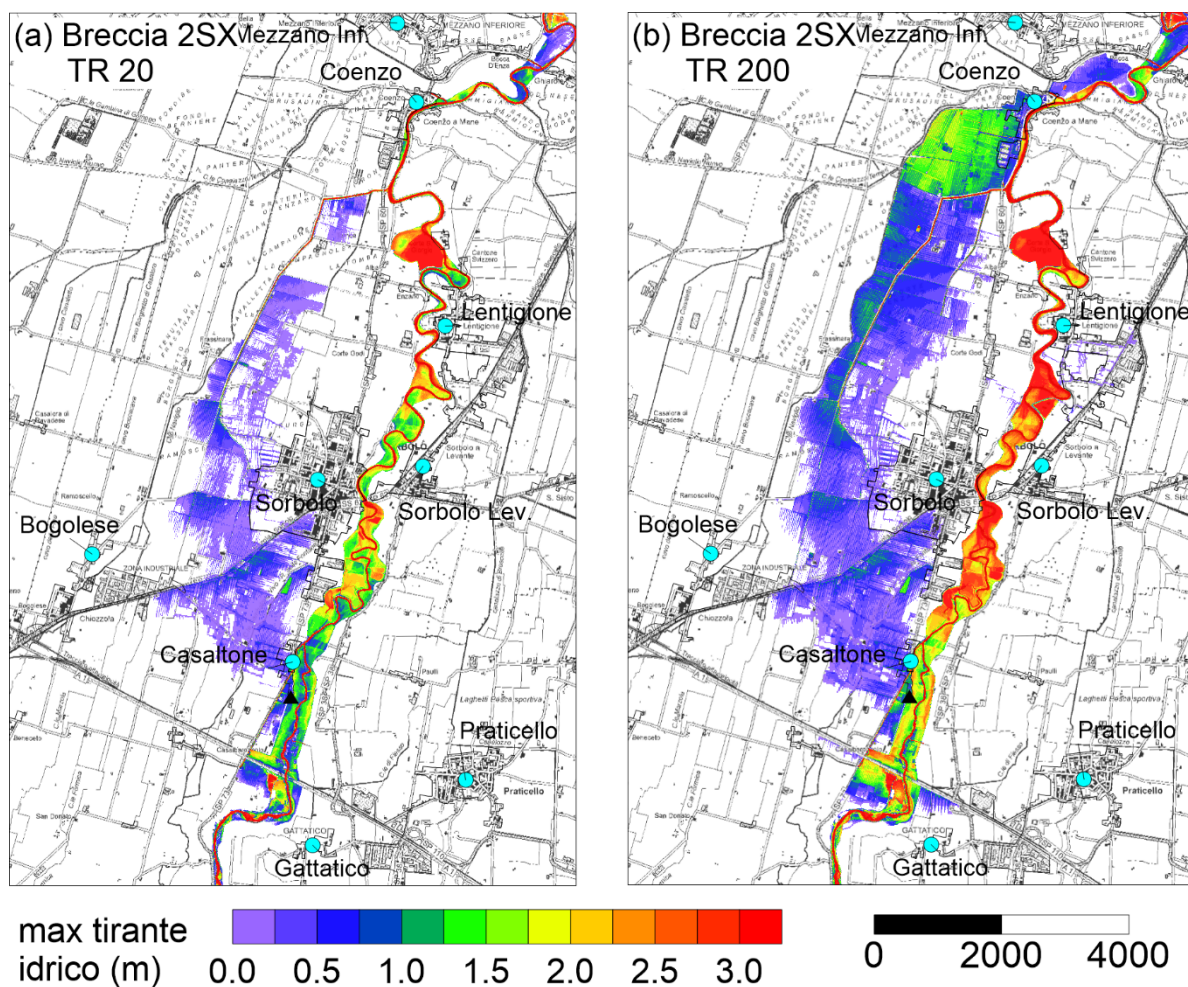


Figura B-2. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 2 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

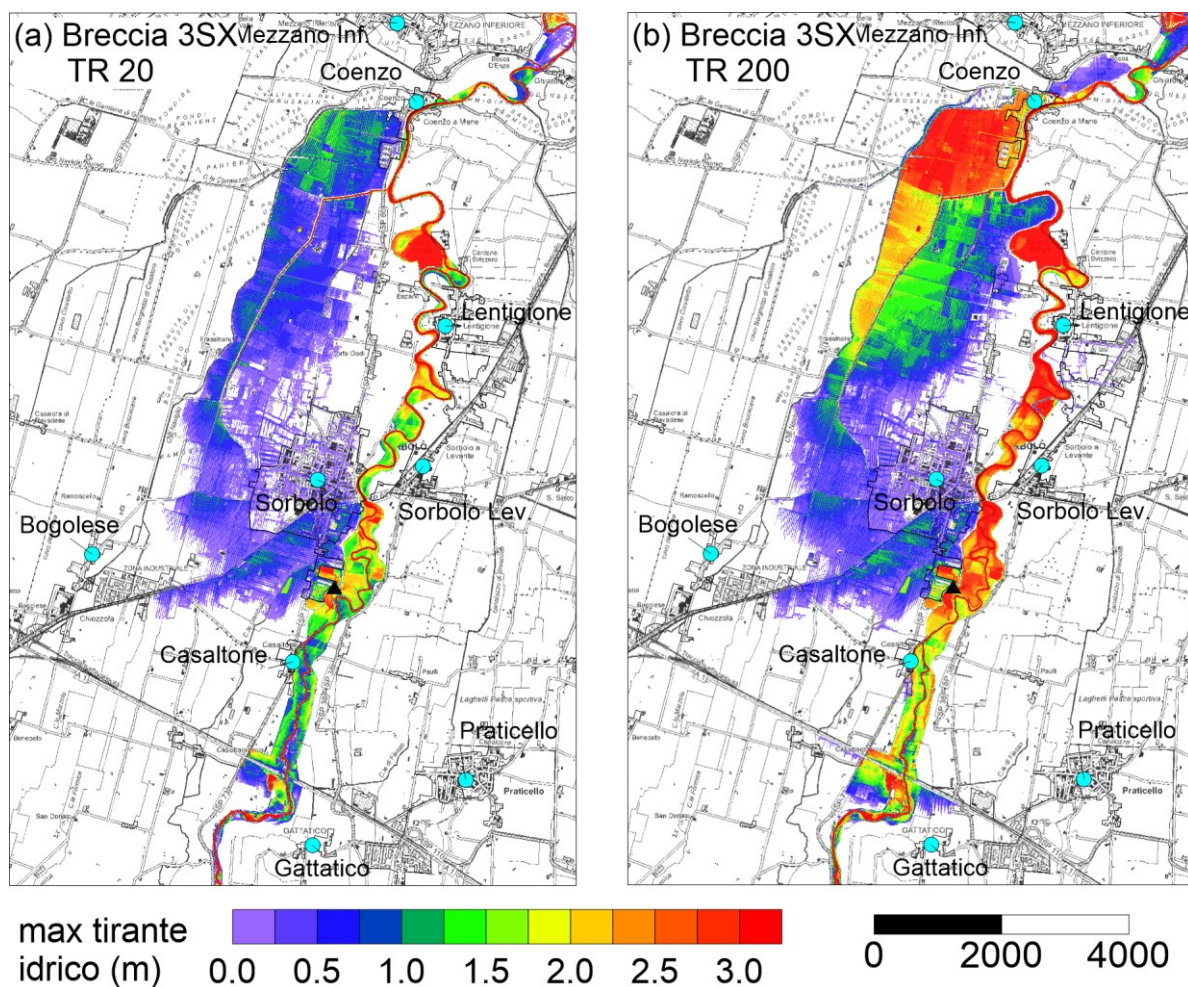


Figura B-3. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 3 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

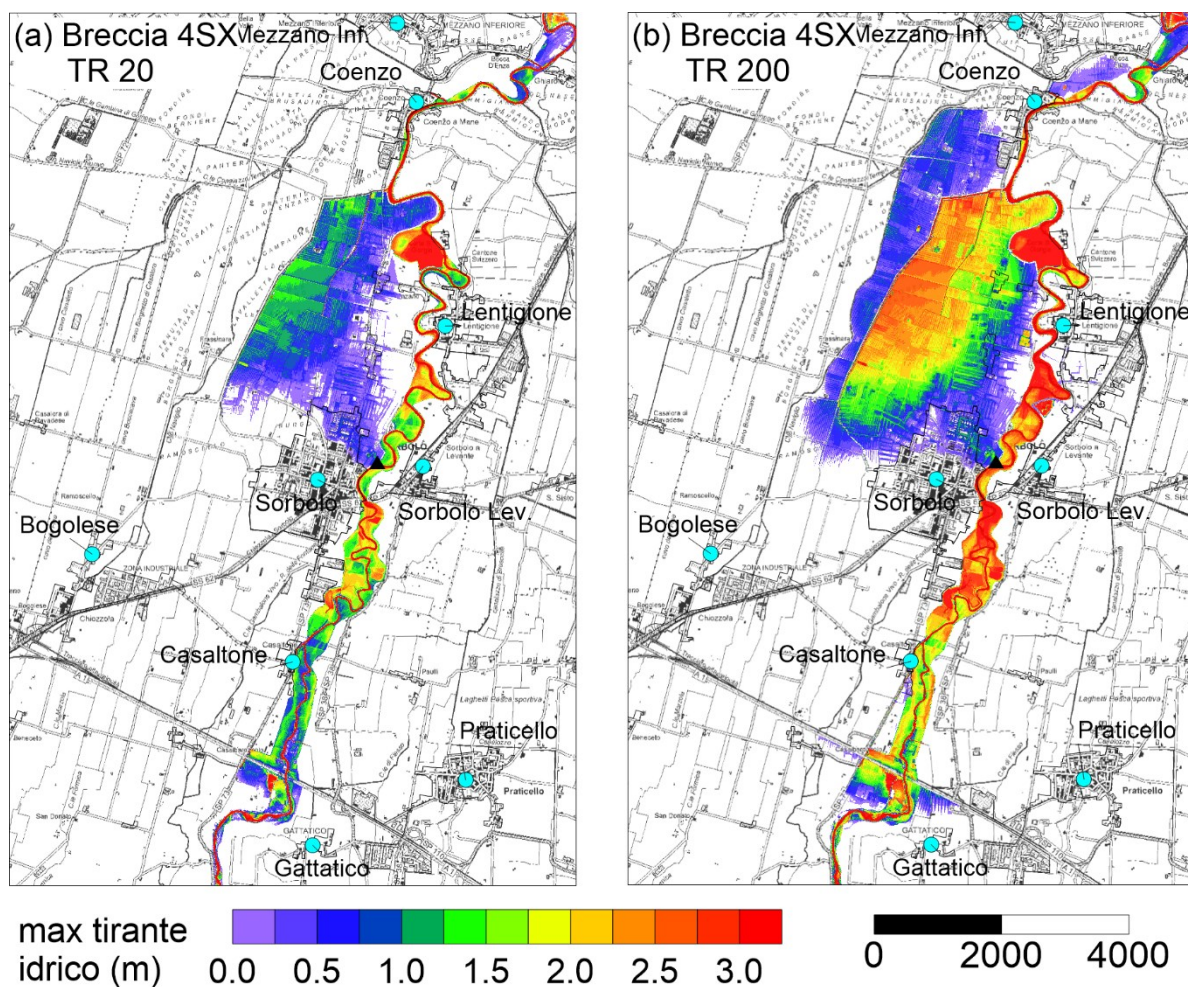


Figura B-4. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 4 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

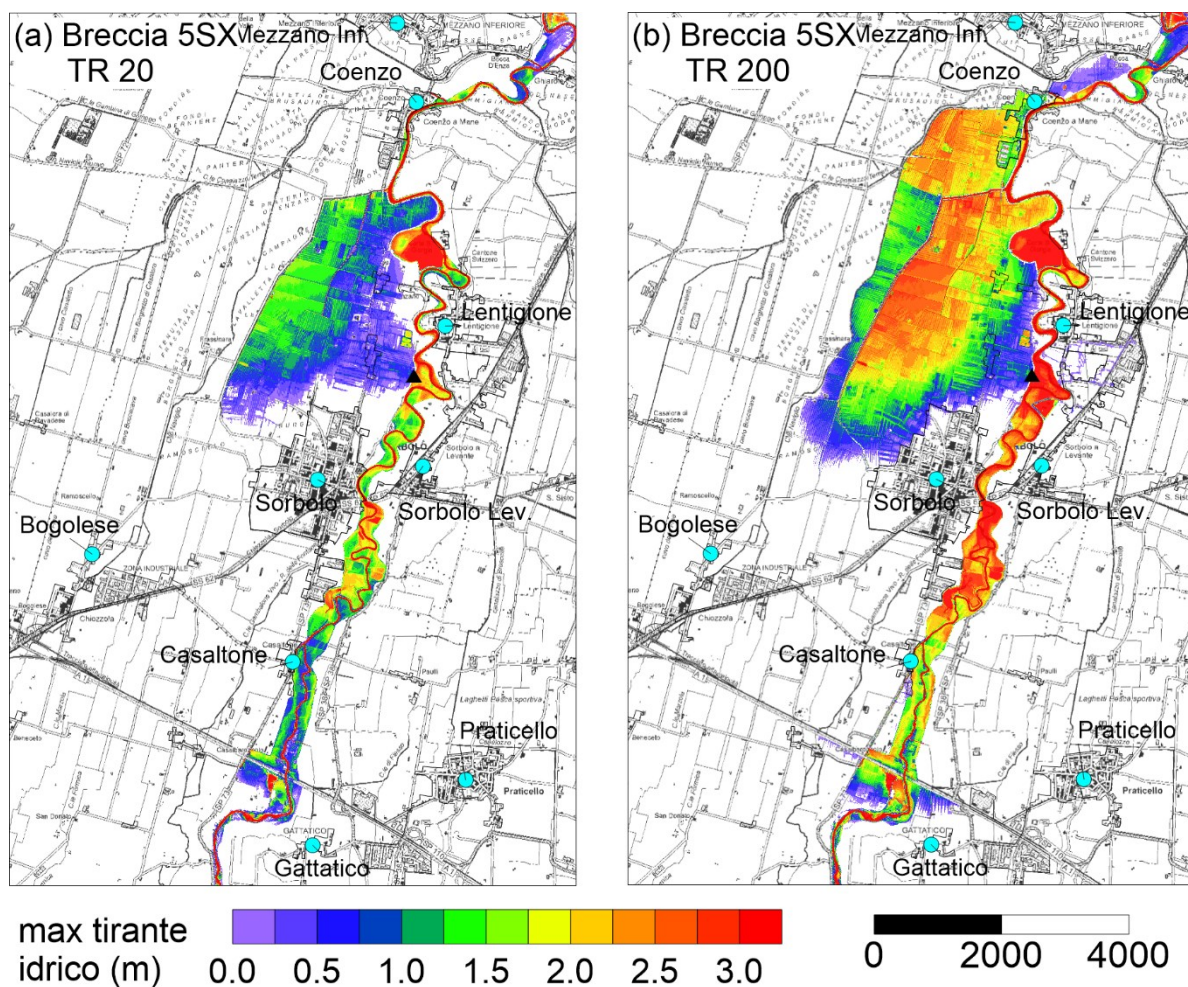


Figura B-5. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 5 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

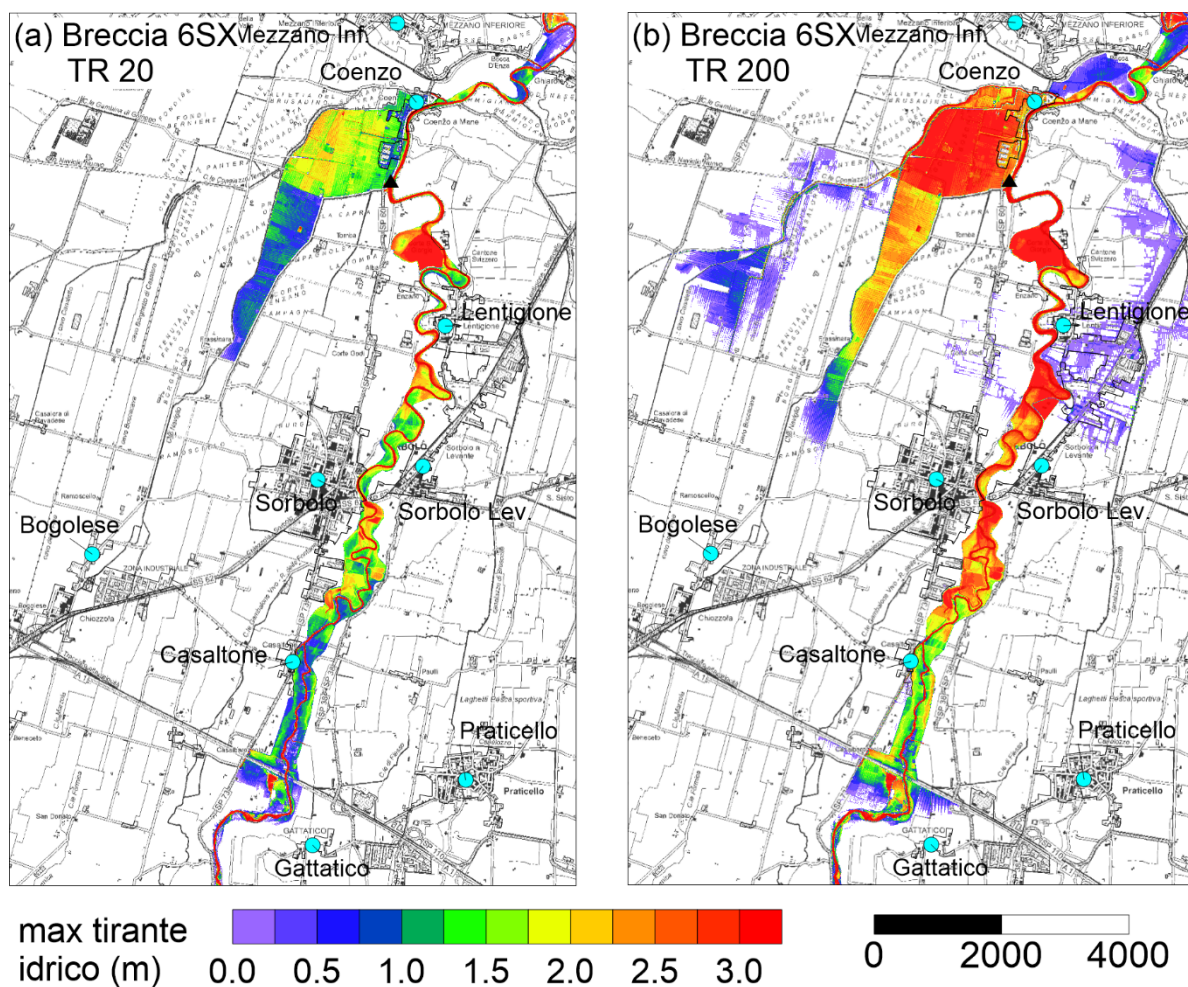


Figura B-6. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 6 SX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

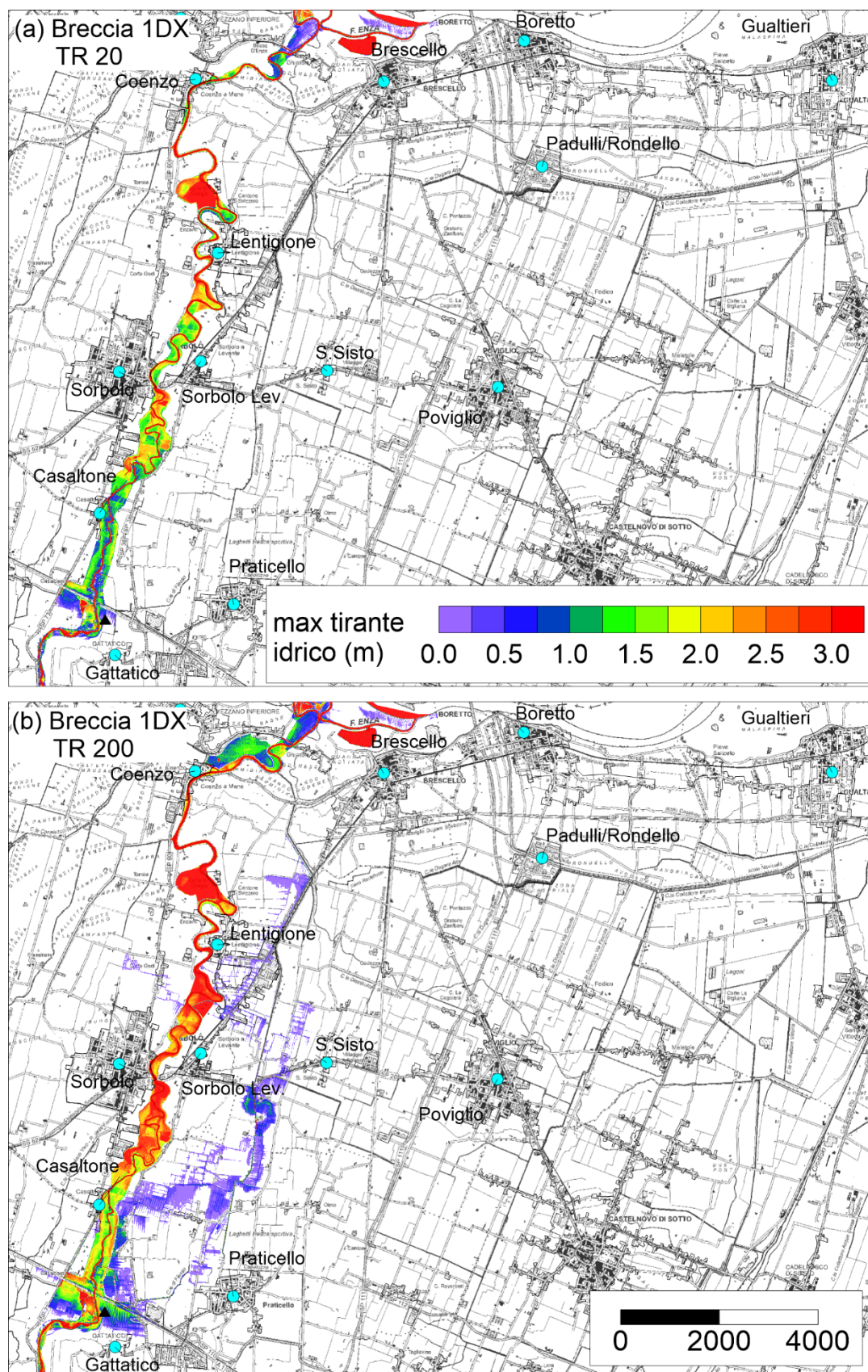


Figura B-7. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 1 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

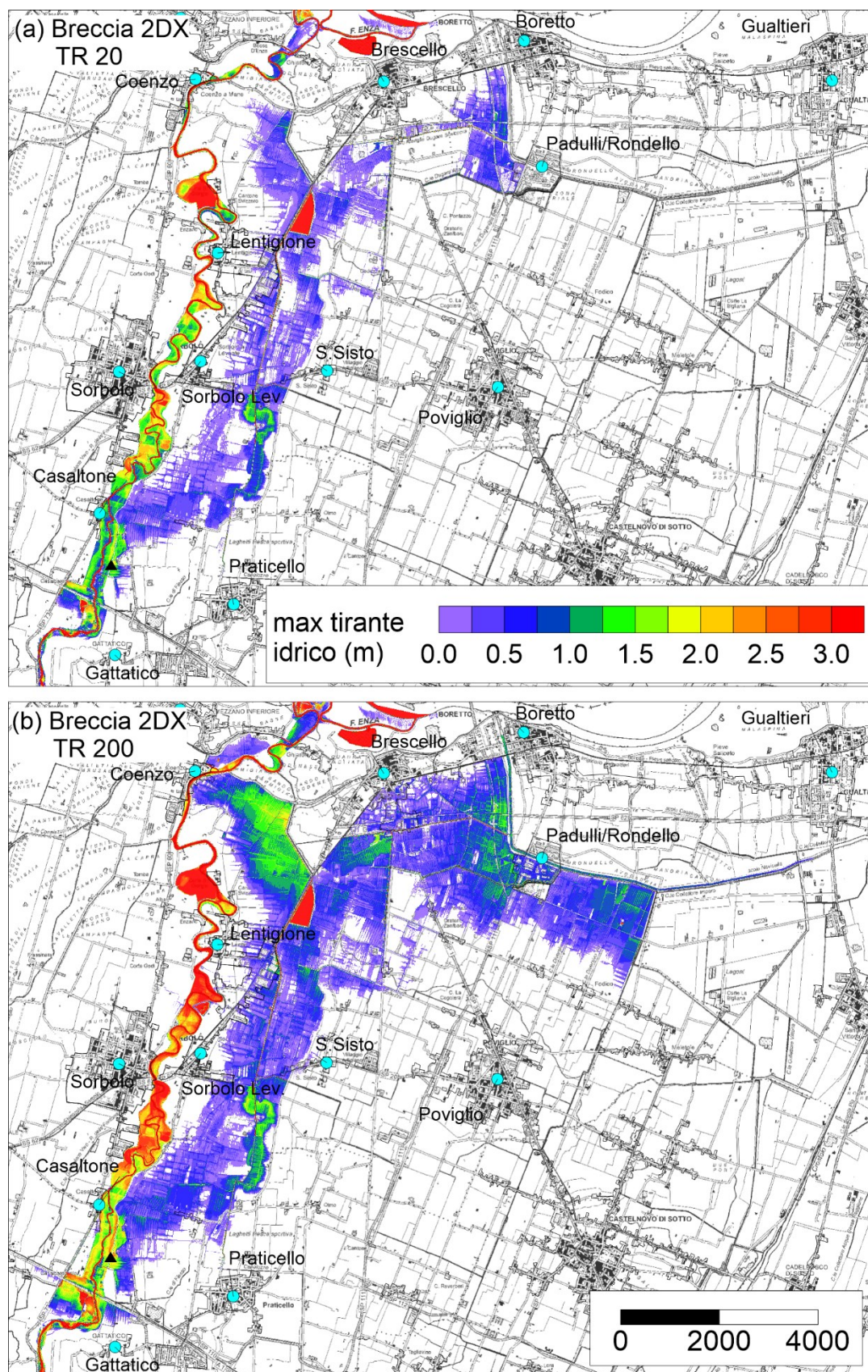


Figura B-8. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 2 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

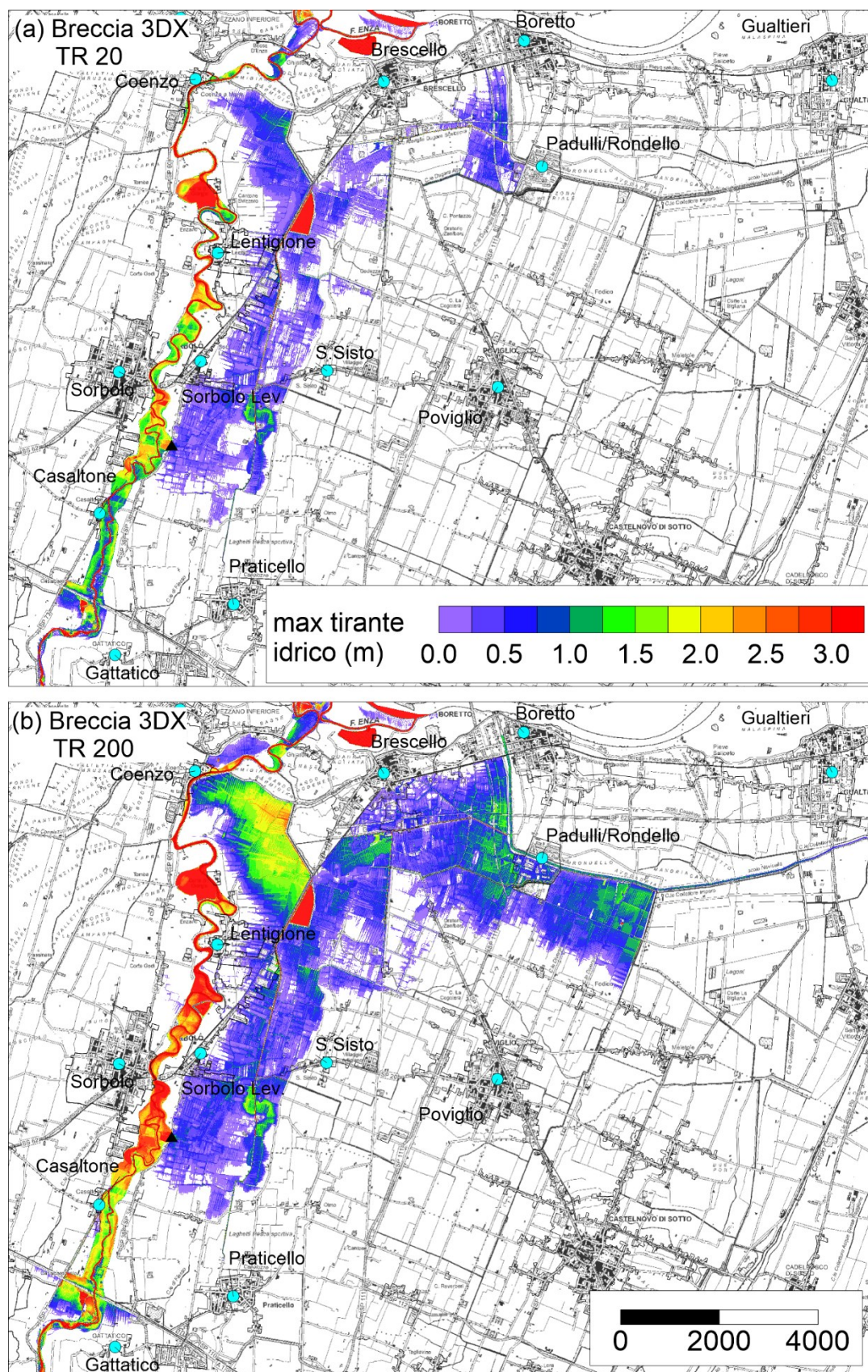


Figura B-9. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 3 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

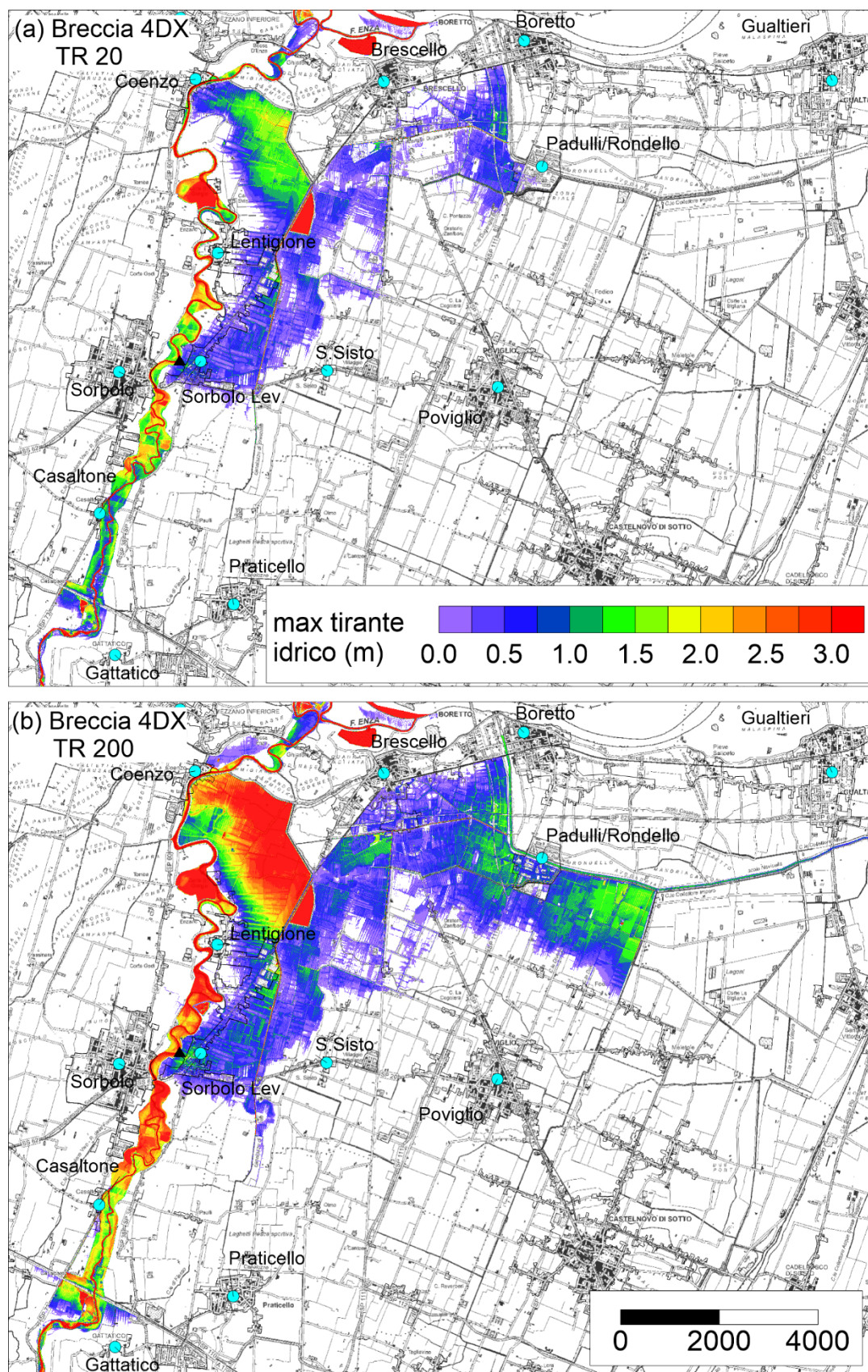


Figura B-10. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 4 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

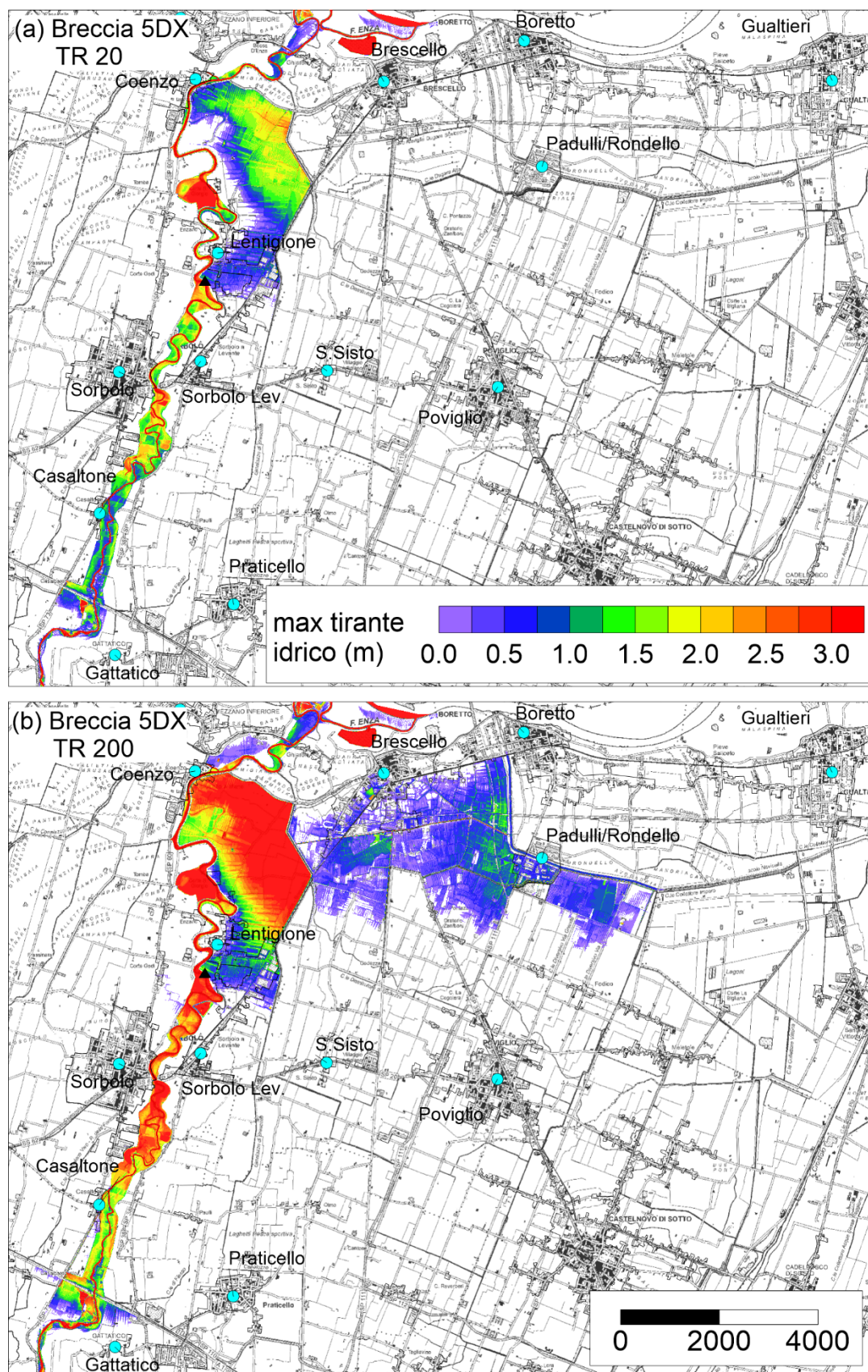


Figura B-11. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 5 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

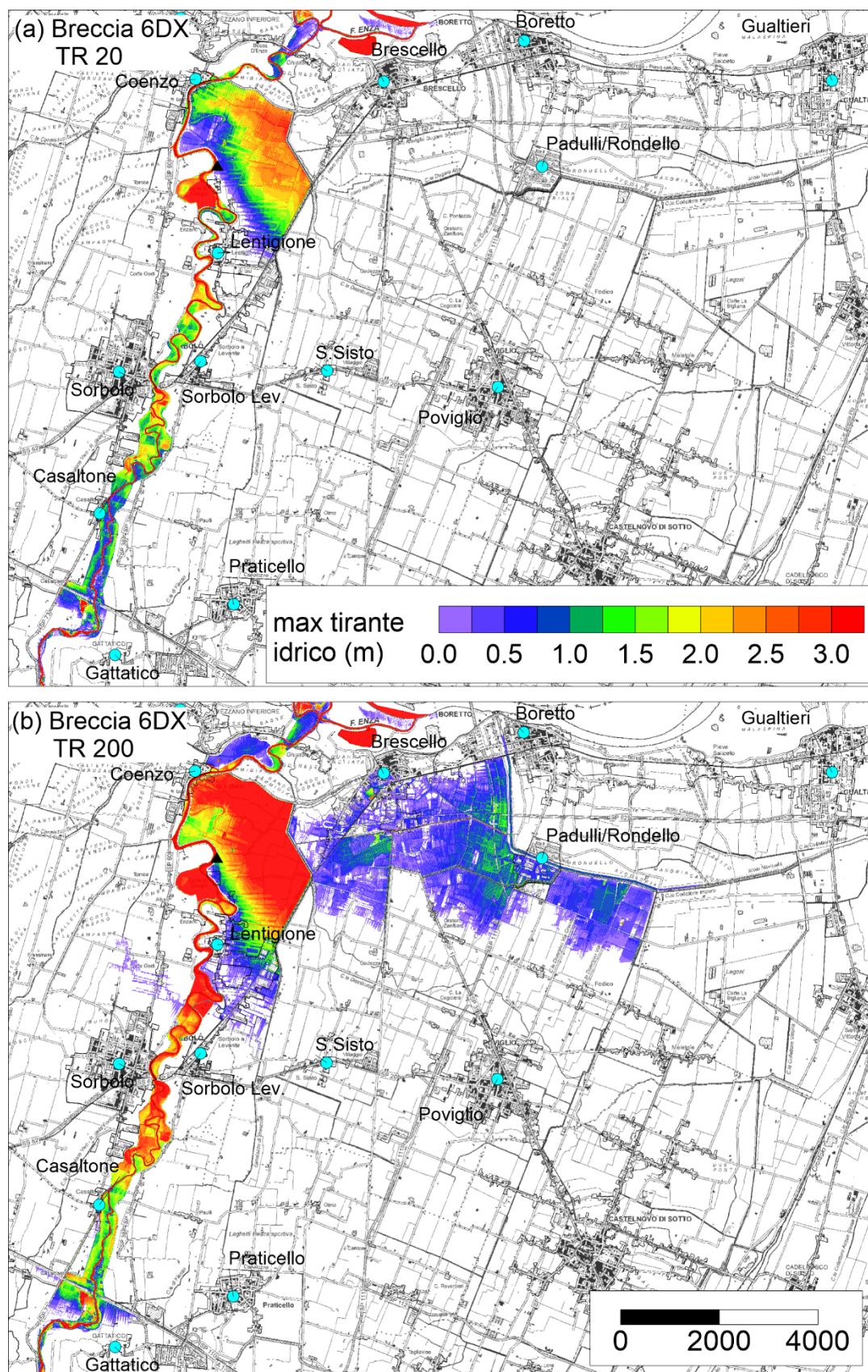


Figura B-12. Mappa della massima profondità idrica per la Breccia 6 DX per (a) TR 20 e (b) TR 200 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

APPENDICE C. Mappe dei tempi di arrivo per le brecce con TR 500 anni

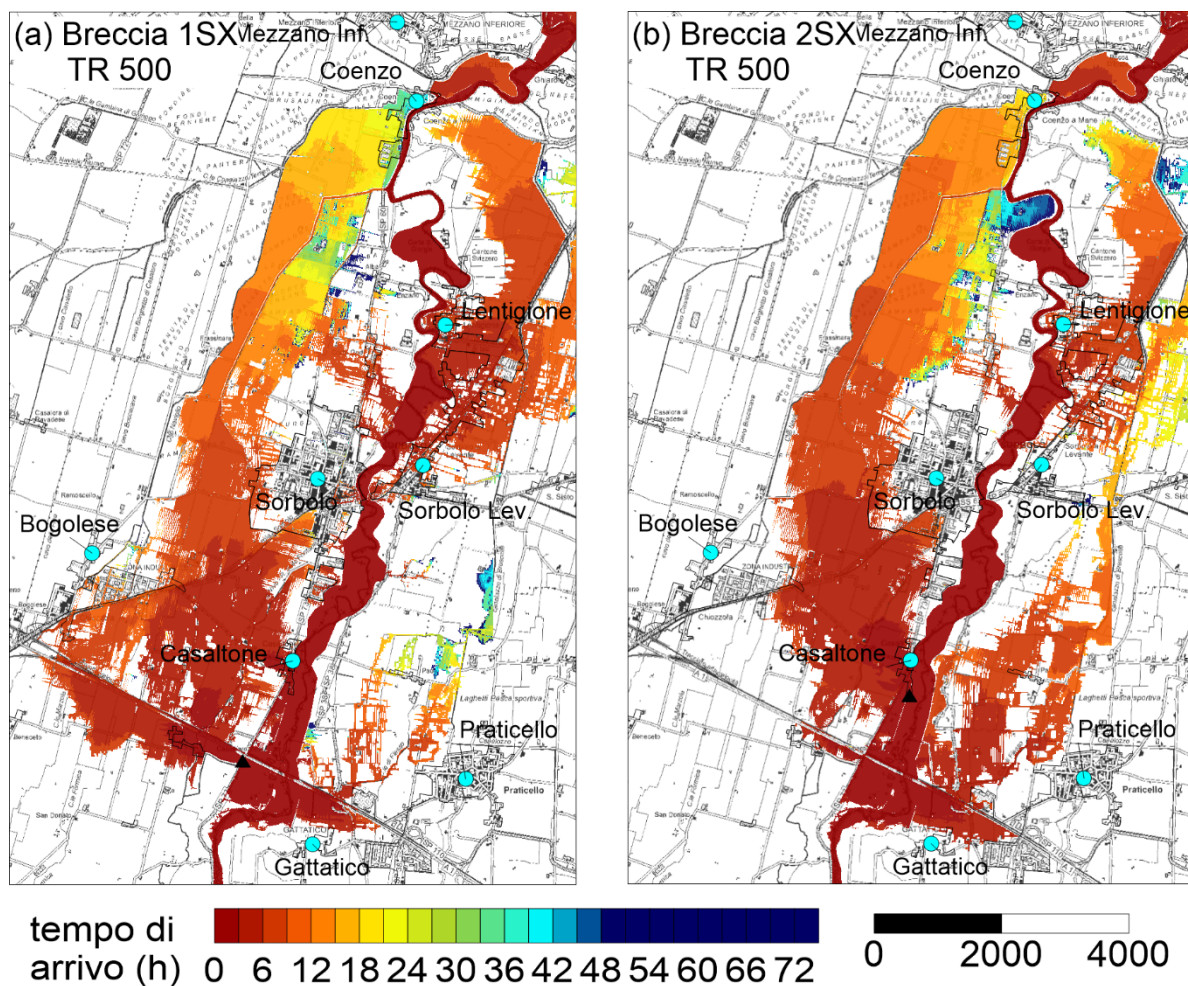


Figura C-1. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 1 SX e (b) 2 SX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

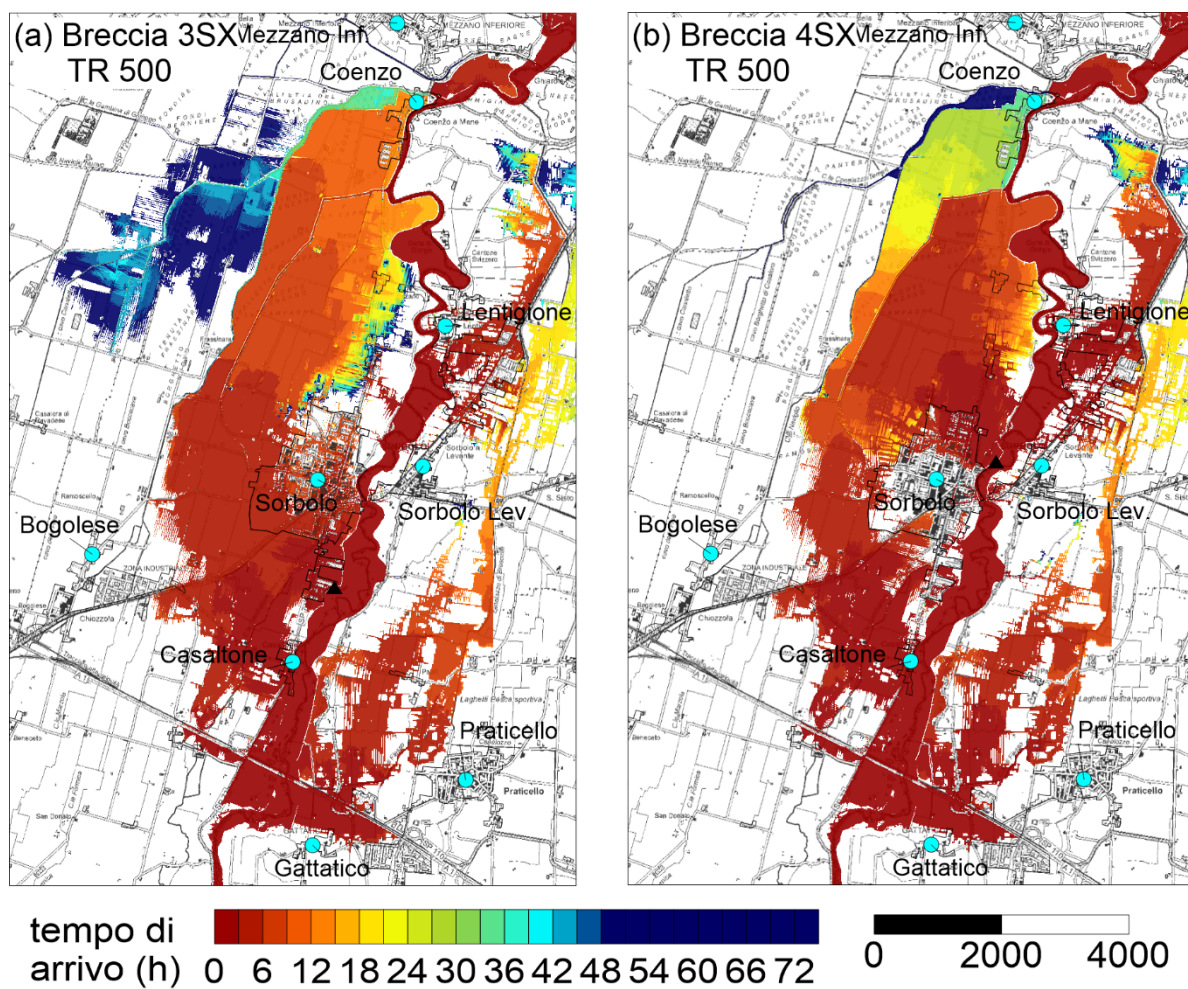


Figura C-2. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 3 SX e (b) 4 SX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

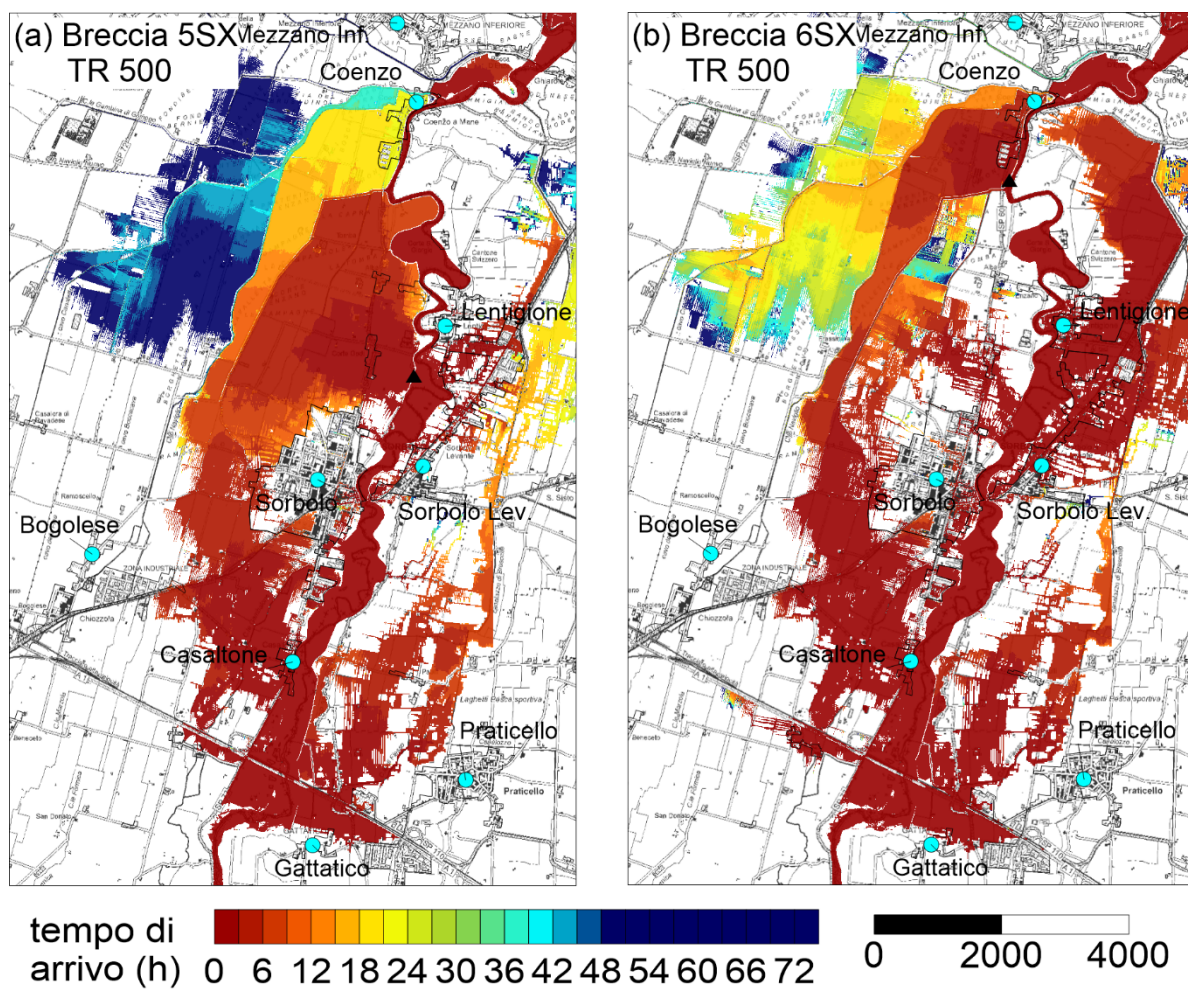


Figura C-3. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 6 SX e (b) 6 SX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

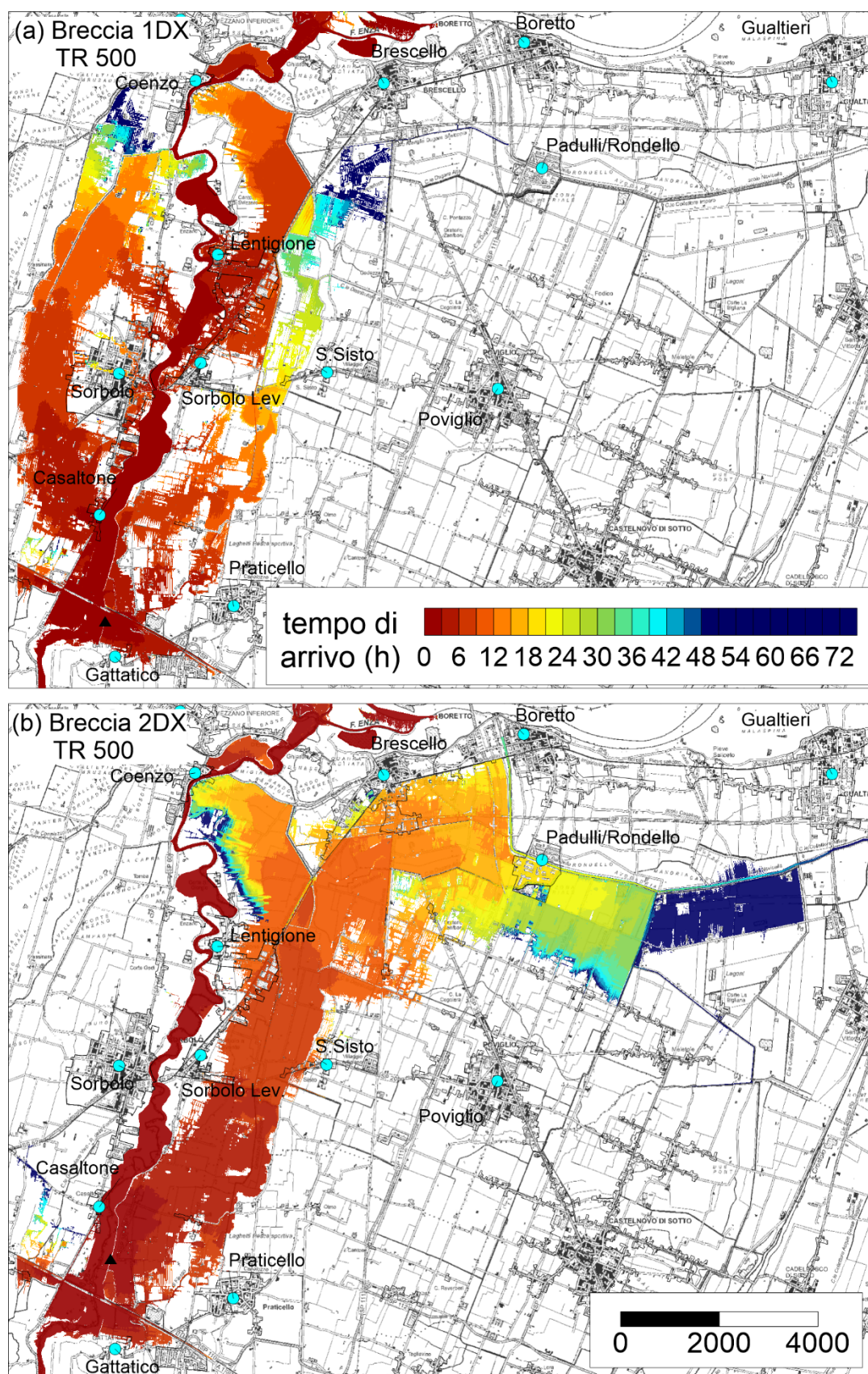


Figura C-4. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 1 DX e (b) 2 DX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

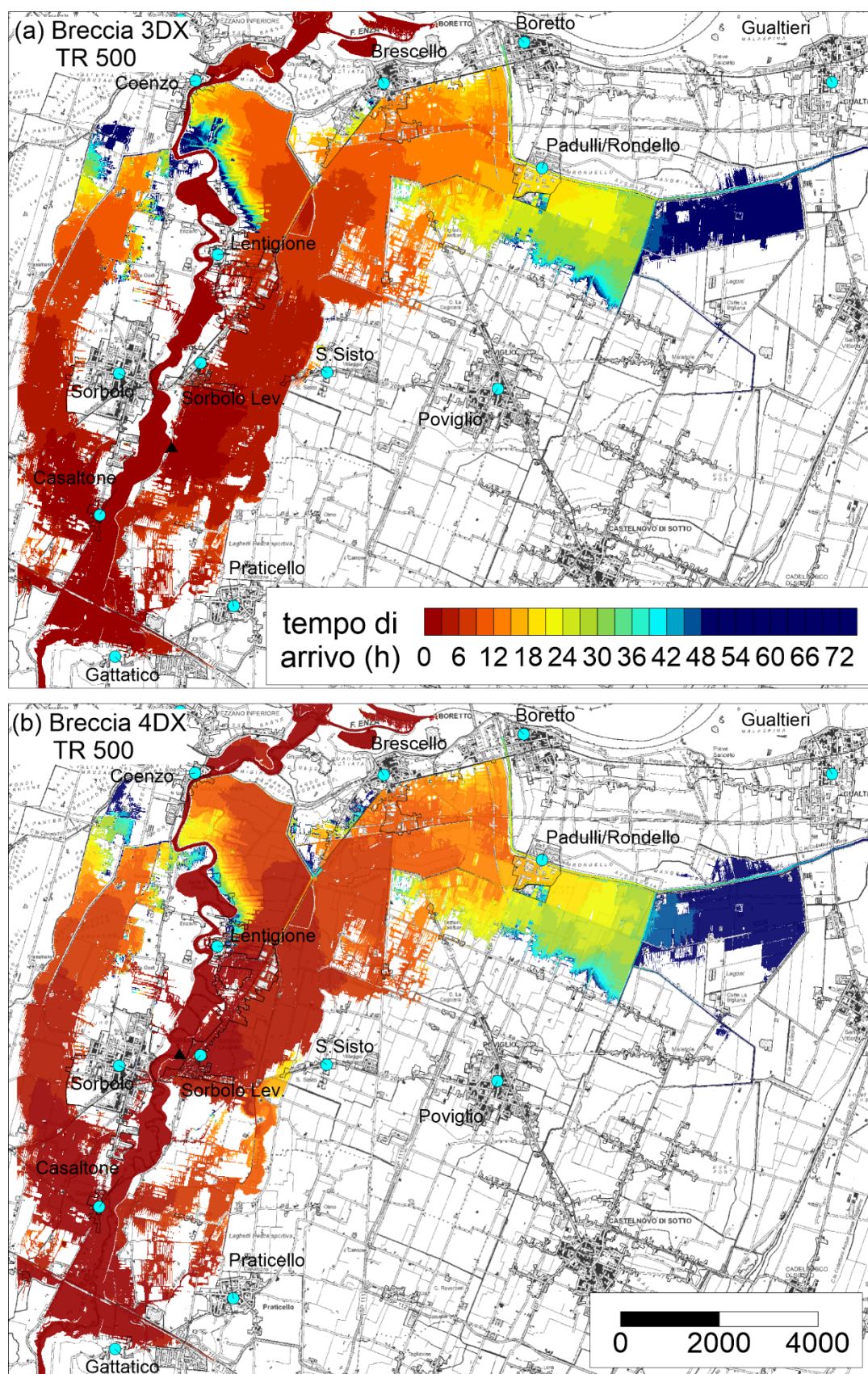


Figura C-5. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 3 DX e (b) 4 DX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

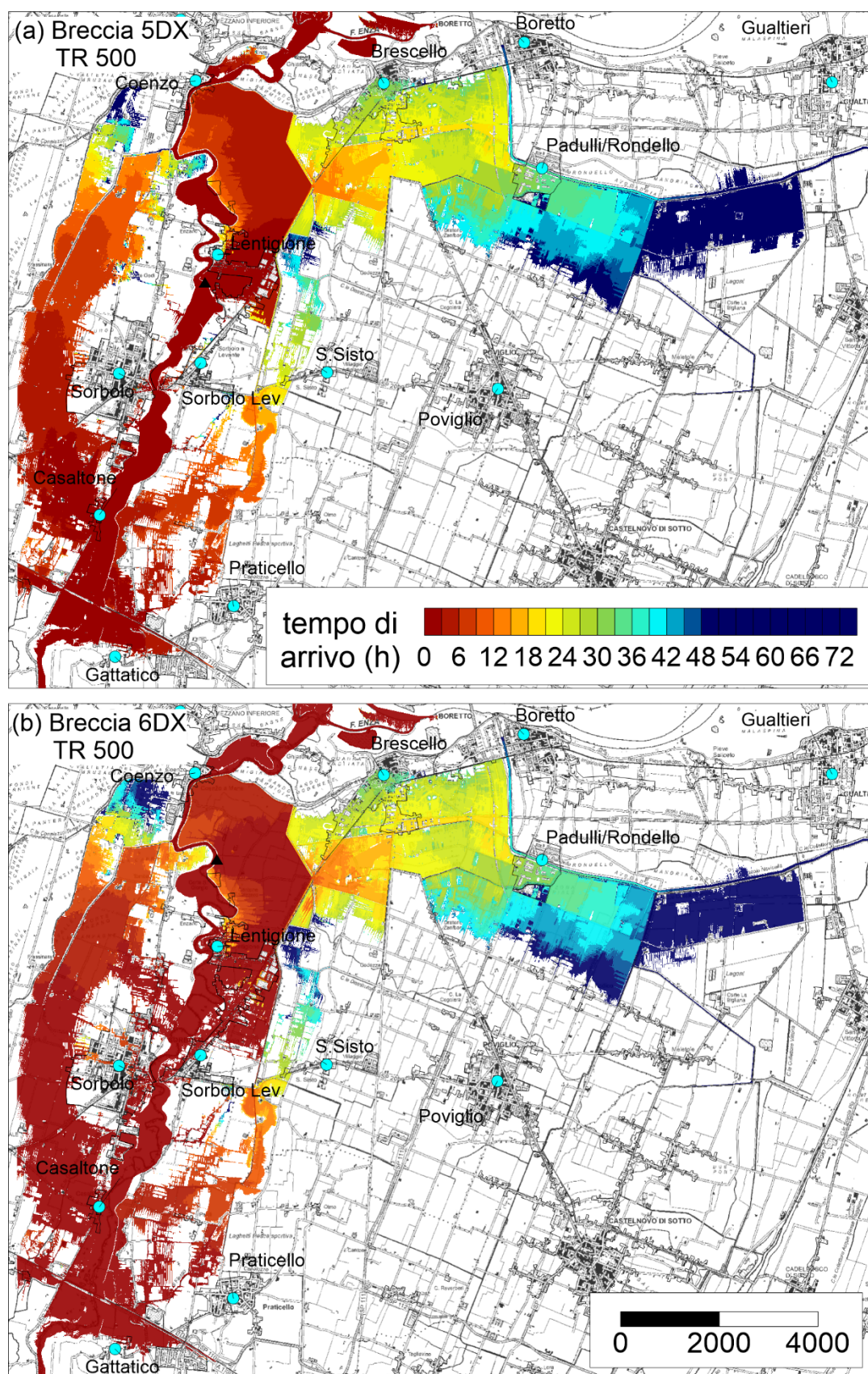


Figura C-6. Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento per la Breccia (a) 5 DX e (b) 6 DX, per TR 500 anni. Il triangolo nero indica la posizione della breccia.

APPENDICE D. Elenco materiale allegato

La presente relazione tecnica è accompagnata dalle seguenti tavole fuori testo, a scala 1:25000:

- SCENARI DI ALLAGAMENTO CONNESSI A BRECCE ARGINALI IN POSIZIONI PREFISSATE:
 - Tavola 1. Inviluppo dei massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 20 anni.
 - Tavola 2. Inviluppo dei massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 200 anni.
 - Tavola 3. Inviluppo dei massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 500 anni.
- SCENARI DI ALLAGAMENTO CONNESSI A TRACIMAZIONI SU ARGINI SORMONTABILI MA NON ERODIBILI (IDROGRAMMI SINTETICI SDH):
 - Tavola 4. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 200 anni.
 - Tavola 5. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 500 anni.
- SCENARI DI ALLAGAMENTO CONNESSI A TRACIMAZIONI E BRECCE SU ARGINI ASSUNTI COME ERODIBILI (IDROGRAMMI SINTETICI SDH):
 - Tavola 6. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 200 anni.
 - Tavola 7. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 500 anni.
- SCENARI DI ALLAGAMENTO CONNESSI A TRACIMAZIONI SU ARGINI SORMONTABILI MA NON ERODIBILI (IDROGRAMMI DERIVATI DALLA COPULA n.5):
 - Tavola 8. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 200 anni.
 - Tavola 9. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 500 anni.
- SCENARI DI ALLAGAMENTO CONNESSI A TRACIMAZIONI SU ARGINI SORMONTABILI MA NON ERODIBILI (IDROGRAMMI DERIVATI DALLA COPULA n.10):
 - Tavola 10. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 200 anni.
 - Tavola 11. Massimi tiranti idrici con tempo di ritorno 500 anni.

Inoltre, si allega il seguente materiale in formato digitale:

- Copia della presente relazione tecnica (formato pdf)
- 7 tavole fuori testo sopraelencate (formato pdf)
- Indice del materiale digitale allegato
- Risultati delle simulazioni relative a brecce in posizioni prefissate (12 brecce e 3 tempi di ritorno):
 - file di riepilogo della posizione delle brecce (formato shp)
 - 36 filmati di allagamento (formato mp4)
 - 36 mappe dei massimi tiranti idrici (formato geotiff)
 - 36 mappe delle massime velocità idriche (formato geotiff)
 - 36 mappe delle massime profondità totali (formato geotiff)
 - 36 mappe dei tempi di arrivo dell'allagamento (formato geotiff)
- Involuppi degli scenari di breccia (3 tempi di ritorno):
 - 3 mappe di involucro dei massimi tiranti idrici (formato geotiff)
 - 3 mappe di involucro delle massime velocità idriche (formato geotiff)
 - 3 mappe di involucro delle massime profondità totali (formato geotiff)
- Risultati delle simulazioni nell'ipotesi di argini non erodibili con idrogrammi sintetici SDH (2 tempi di ritorno):
 - 2 mappe dei massimi tiranti idrici (formato geotiff)
- Risultati delle simulazioni nell'ipotesi di argini non erodibili con idrogrammi derivati dalle copule n.5 e n.10 (2 tempi di ritorno):
 - 4 mappe dei massimi tiranti idrici (formato geotiff)
- Risultati delle simulazioni nell'ipotesi di argini erodibili con idrogrammi sintetici SDH (2 tempi di ritorno):
 - 2 mappe dei massimi tiranti idrici (formato geotiff)