



**UNIVERSITÀ
DI PARMA**

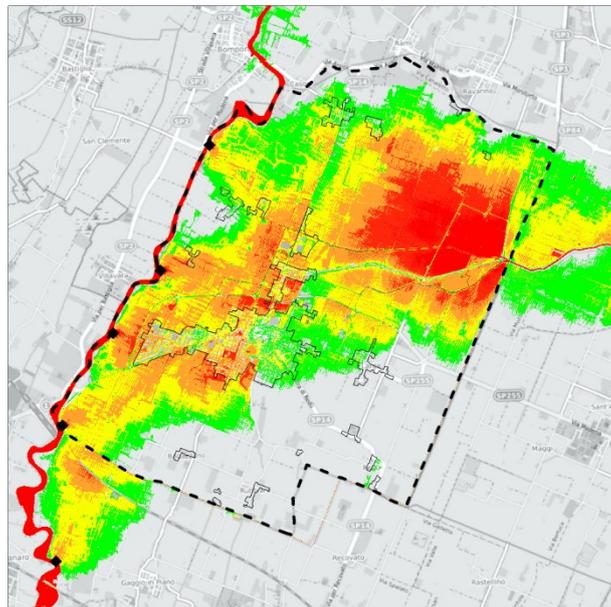
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
E ARCHITETTURA**



**COMUNE DI
NONANTOLA**

Valutazione del rischio di allagamento del territorio del Comune di Nonantola

Relazione tecnica



Responsabile scientifico: Prof. Paolo Mignosa

Gruppo di lavoro: Ing. Renato Vacondio, Ing. Susanna Dazzi

Parma, giugno 2020

Sommario

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE | 1 |
| 2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO E DELLE RELATIVE PROBLEMATICHE | 2 |
| 2.1. Inquadramento del fiume Panaro | 2 |
| 2.2. Inquadramento del comparto in destra idraulica e relative problematiche in tema di esondazioni | 3 |
| 2.3. Inquadramento del territorio del Comune di Nonantola e relative problematiche in tema di esondazioni | 4 |
| 2.4. Breccie storiche sul fiume Panaro e alluvioni a Nonantola | 5 |
| 2.5. Studi recenti | 6 |
| 2.6. Stato attuale | 6 |
| 3. DATI TOPOGRAFICI | 8 |
| 3.1. Rilievi disponibili | 8 |
| 3.2. Elaborazione dei rilievi LiDAR: fiume Panaro | 10 |
| 3.3. Elaborazione dei rilievi LiDAR: comparto in destra Panaro | 12 |
| 3.4. Costruzione della batimetria complessiva | 15 |
| 4. DATI IDROLOGICI | 16 |
| 5. MODELLO NUMERICO | 18 |
| 6. COSTRUZIONE DEL MODELLO | 19 |
| 6.1. Generazione della griglia multi-risoluzione | 19 |
| 6.2. Scabrezza del comparto in destra Panaro | 20 |
| 6.3. Taratura della scabrezza per il fiume Panaro | 21 |
| 6.4. Condizioni al contorno | 25 |
| 6.5. Breccie | 26 |
| 7. SIMULAZIONI E RISULTATI | 28 |
| 7.1. Simulazioni preliminari senza breccie | 28 |
| 7.2. Simulazioni degli allagamenti conseguenti alle breccie | 30 |
| 7.2.1. Prodotti restituiti per ciascuna simulazione | 30 |
| 7.2.2. Rappresentazione dei risultati delle simulazioni | 31 |
| 7.2.3. Descrizione generale della dinamica di allagamento | 37 |
| 7.2.4. Velocità idriche | 42 |
| 7.2.5. Pericolosità | 43 |
| 7.2.6. Aree allagate e volumi esondati | 44 |
| 8. CONCLUSIONI | 46 |
| 9. BIBLIOGRAFIA | 50 |
| APPENDICE A. DINAMICA DI ALLAGAMENTO | 51 |
| APPENDICE B. MAPPE DELLE MASSIME VELOCITA' IDRICHE | 61 |
| APPENDICE C. MAPPE DELLA PERICOLOSITA' | 66 |
| APPENDICE D. MAPPE DEI TEMPI DI ARRIVO | 71 |
| APPENDICE E. ELENCO DEI PRODOTTI DIGITALI ALLEGATI | 76 |

1. INTRODUZIONE

La presente Relazione Tecnica descrive le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università degli Studi di Parma (d'ora in poi DIA) nell'ambito del contratto di servizio specialistico per l'attività inerente alla *“Valutazione del rischio di allagamento del territorio del Comune di Nonantola”*, stipulato tra DIA e Comune di Nonantola in data 17/03/2020.

Il territorio del Comune di Nonantola è ubicato in prossimità dell'argine destro del fiume Panaro, a quote soggiacenti a quelle corrispondenti ai livelli di piena del medesimo fiume nella zona. Il territorio è quindi potenzialmente soggetto a subire allagamenti connessi a eventuali tracimazioni/rotte arginali.

Per valutare il possibile impatto di scenari di questo tipo sul territorio del Comune di Nonantola 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.

Nell'ambito del presente studio è stato realizzato un modello idraulico bidimensionale del fiume Panaro e del comparto in destra idraulica, sulla base dei più recenti dati topografici e idrologici disponibili, utilizzato per le successive simulazioni numeriche. Sono stati presi in considerazione due diversi scenari idrologici e 5 possibili posizioni di breccia, con focus sul territorio del Comune di Nonantola. I risultati delle simulazioni, riportati nella presente relazione, sono stati analizzati sia con riferimento al singolo scenario, sia globalmente, al fine di fornire una valutazione complessiva della pericolosità idraulica nel territorio comunale.

Si noti tuttavia che non sempre aree ad elevata pericolosità sono ad alto rischio e viceversa. Infatti, il rischio di alluvioni è definito come “la combinazione della probabilità di un evento alluvionale e delle potenziali conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica derivanti da tale evento” (Direttiva “Alluvioni” 2007/60/CE [1]). Per mappare il rischio, oltre a conoscere le caratteristiche idrauliche (tiranti e velocità) che descrivono la pericolosità in un determinato territorio, è fondamentale anche analizzare il contesto socio-economico del territorio stesso. Il presente studio si limita però alla valutazione della pericolosità, senza analizzare nel dettaglio gli elementi esposti e la loro vulnerabilità.

La presente relazione è inoltre accompagnata da una corposa serie di prodotti digitali, consistenti in filmati dell'evoluzione dell'allagamento ed in mappe georeferenziate delle principali caratteristiche, come previsto nell'allegato tecnico della convenzione.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO E DELLE RELATIVE PROBLEMATICHE

2.1. Inquadramento del fiume Panaro

Il fiume Panaro, affluente emiliano del fiume Po, ha origine alla confluenza tra i torrenti Scoltenna e Leo nell'Appennino Tosco-Emiliano. Il bacino idrografico di monte del fiume Panaro, chiuso alla traversa fluviale in ingresso alla cassa di espansione posta in località Sant'Anna a S. Cesario sul Panaro (subito a valle del ponte dell'autostrada A1), ha un'estensione di circa 800 km² [2].

La cassa d'espansione, sita in località Sant'Anna (MO) e in funzione dagli anni Ottanta, fa parte del sistema strutturale di difesa del territorio di pianura dagli eventi di piena del fiume Panaro. È costituita da un manufatto regolatore, che funge da sbarramento del corso d'acqua, e da un sistema di arginature maestre che sottendono un invaso in linea; è inoltre presente uno sfioratore laterale che permette il riempimento di un invaso sussidiario, separato dall'invaso principale tramite un argine interno secondario. Il manufatto principale, realizzato in calcestruzzo, è dotato di 5 luci di fondo con paratoie regolabili e di 4 scarichi di fondo laterali di servizio, nonché di uno sfioratore di superficie. L'invaso fuori linea si attiva solo per quote idriche di poco inferiori a quelle dello sfioratore del manufatto principale. Complessivamente, il volume idrico immagazzinabile nella cassa all'altezza della quota di sfioro è di circa 27 milioni di m³, di cui circa 22.7 nell'invaso in linea e 4.3 nell'invaso fuori linea [2].

A valle della cassa, il fiume riceve due affluenti, entrambi in sinistra idraulica: il torrente Tiepido, che si immette poco a valle dell'attraversamento della SS9 (Via Emilia), e il canale Naviglio, la cui immissione, in corrispondenza dell'abitato di Bomporto, è regolata da portoni vinciani, che scongiurano il rischio di rigurgito nel reticolo idrografico minore durante le piene del fiume Panaro.

Lungo il tratto di quasi 68 km a valle della cassa d'espansione, il fiume presenta un sistema arginale continuo, sia in destra sia in sinistra idraulica, a partire dalla confluenza con il torrente Tiepido e fino al raccordo con le arginature maestre del fiume Po. Tra la cassa d'espansione e la confluenza col Tiepido, il fiume risulta arginato in destra a valle dell'immissione del diversivo Muzza, mentre in sinistra il contenimento delle piene dovrebbe essere garantito dall'arginatura sinistra del Tiepido a partire dal ponte della Via Emilia in località Fossalta; di fatto, tra i due corsi d'acqua è presente un'area "polmone" di espansione delle piene, delimitata da scarpate naturali e rilevati stradali. In generale, il fiume Panaro non presenta aree golenali significative, se non nei primi 8 km a valle della cassa d'espansione e negli ultimi 5 km prima dell'immissione in Po. Per lunghi tratti, gli argini sono praticamente in frodo. Si evidenzia inoltre che il tracciato fluviale presenta diversi tratti sostanzialmente rettilinei e dalla larghezza pressoché costante, frutto di passati interventi di sistemazione. Infine, una caratteristica rilevante dell'asta valliva del fiume Panaro è la sua elevata pensilità, peraltro comune a molti altri affluenti emiliani del Po.

2.2. Inquadramento del comparto in destra idraulica e relative problematiche in tema di esondazioni

Il comparto in destra idraulica del fiume Panaro, limitatamente al tratto a valle della cassa d'espansione, è delimitato a Nord dal fiume Po e a Est dal torrente Samoggia, dal fiume Reno, di cui il Samoggia è tributario, e infine dallo scolmatore del Reno in Po. L'estensione dell'intero comparto è di circa 500 km² (Figura 2-1).

Risultano compresi i territori dei seguenti comuni: S. Cesario sul Panaro, Castelfranco Emilia, Nonantola, Ravarino, Finale Emilia (provincia di Modena), S. Agata Bolognese, S. Giovanni in Persiceto, Crevalcore (provincia di Bologna), Cento, S. Agostino, Bondeno (provincia di Ferrara).

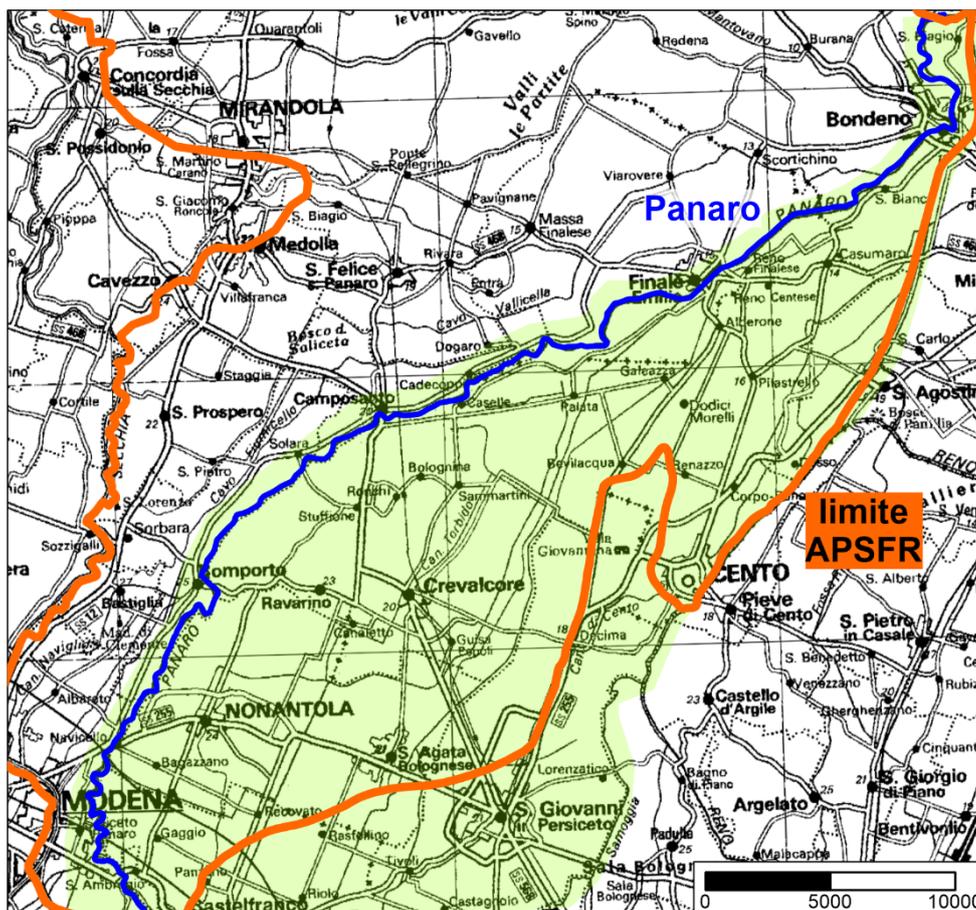


Figura 2-1 – Inquadramento del comparto in destra idraulica del fiume Panaro.

L'area risulta potenzialmente inondabile in seguito a tracimazioni e/o rotte arginali in destra idraulica del fiume Panaro, poiché le quote del terreno nel comparto sono in generale soggacenti a quelle delle sommità arginali del Panaro stesso.

Infatti, buona parte del comparto ricade all'interno della perimetrazione dell'Area a Potenziale Rischio Significativo di Alluvione (Areas of Potential Significant Flood Risk – APSFR) del fiume Panaro 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" [1]. Nel dicembre 2019 è stato completato il primo aggiornamento¹ delle

¹ <https://pianoalluvioni.adbpo.it/mappe-della-pericolosita-e-del-rischio-di-alluvione/>

mappe di pericolosità e di rischio di alluvione del PGRA (Piano Gestione Rischio Alluvione), che conferma la precedente perimetrazione, con riferimento ad uno scenario di piena del fiume Panaro con tempo di ritorno di 500 anni (Figura 2-1). Nonostante tali mappe siano realizzate a scala regionale e spesso con metodologie semplificate, rappresentano un utile strumento per individuare le aree su cui permane un rischio residuale di alluvione e sulle quali condurre eventuali studi idraulici di dettaglio.

2.3. Inquadramento del territorio del Comune di Nonantola e relative problematiche in tema di esondazioni

Il territorio del Comune di Nonantola, di estensione di poco superiore a 55 km², è delimitato a Ovest proprio dal fiume Panaro (Figura 2-2).

Le quote altimetriche riscontrabili nel territorio sono variabili circa tra 20 e 30 m s.l.m.: il terreno è più elevato lungo i confini Sud e Ovest (a ridosso del fiume), e ha un andamento progressivamente digradante in direzione Nord-Est. Tuttavia, è presente un dosso morfologico lungo il confine Nord, con quote fino a 25-26 m s.l.m.

Le quote del territorio sono comunque soggiacenti a quelle corrispondenti al coronamento arginale del fiume Panaro nella zona. Infatti, le arginature raggiungono quote comprese tra 30 e 35 m s.l.m. nel tratto ricadente nel territorio comunale, e fino a oltre 37 m s.l.m. nel tratto a monte. Risulta dunque evidente che l'area è soggetta al potenziale rischio di allagamento nel caso di tracimazioni o rotte arginali lungo il fiume Panaro. Peraltro, ciò è confermato dal fatto che l'intero territorio comunale ricade all'interno della perimetrazione della APSFR del fiume Panaro per lo scenario di scarsa probabilità. Il presente studio fornirà una valutazione di maggior dettaglio sulla pericolosità di alluvione nell'area.

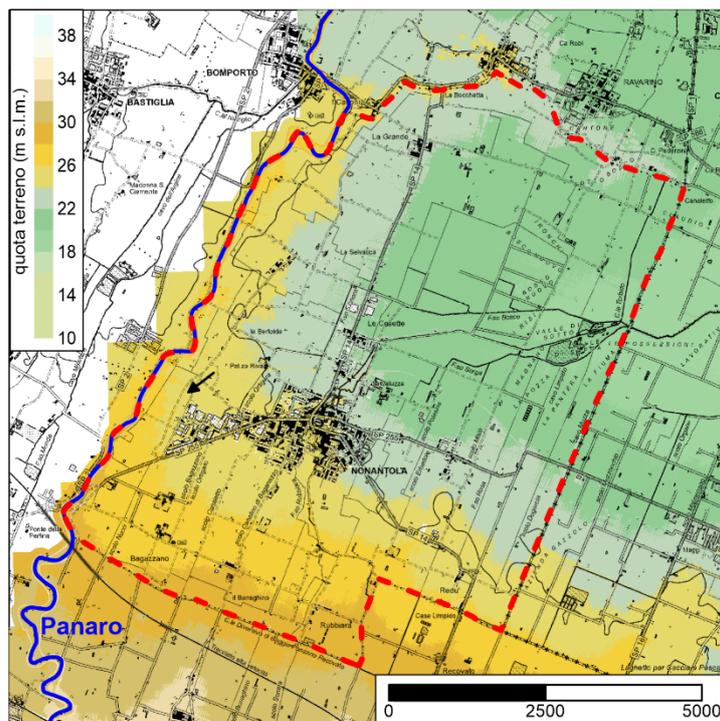


Figura 2-2 – Inquadramento del Comune di Nonantola (la linea rossa tratteggiata indica il confine comunale).

2.4. Breccie storiche sul fiume Panaro e alluvioni a Nonantola

Nella seconda metà del secolo scorso, il territorio comunale fu colpito da eventi alluvionali legati a tracimazioni e rotte arginali sul fiume Panaro [3]- [4].

Durante l'evento del 4-5 novembre 1966 si verificarono diverse rotte arginali sia sul fiume Secchia che sul fiume Panaro. In particolare si ruppe l'argine destro del Panaro in corrispondenza della chiavica Nonantolana, allagando una superficie di 9 400 ettari ricadenti in vari comuni, compreso quello di Nonantola.

Durante l'evento del 25-26 settembre 1973 si verificarono numerose tracimazioni, nonché una rotta arginale in destra Panaro in corrispondenza del ponte ferroviario. La superficie allagata fu di 6 000 ettari e ancora una volta fu interessato, oltre a numerosi altri, il territorio del comune di Nonantola [4].

Successivamente alla realizzazione della cassa d'espansione di S. Cesario, non si sono più verificate breccie lungo le arginature del Panaro. Tuttavia, durante la piena del 19 gennaio 2014 (la stessa che ha provocato la rotta arginale sul fiume Secchia in località ponte dell'Uccellino), si è innescato un principio di collasso dell'argine destro in corrispondenza di Via Tronco nel Comune di Castelfranco Emilia (MO), poco a monte dell'attraversamento della linea ferroviaria dell'Alta Velocità (Figura 2-3). Visto che il cedimento si è manifestato non a seguito di sormonto arginale, l'innescò è probabilmente riconducibile a fenomeni di erosione interna, favorito dalla presenza di tane di animali fossori [5]. Il collasso è stato riparato dagli addetti dell'autorità idraulica, che hanno scongiurato il rischio di alluvione nei territori circostanti: con tutta probabilità, se non si fosse intervenuti tempestivamente, anche una parte del Comune di Nonantola sarebbe stato coinvolto dagli allagamenti conseguenti a questo evento. Ciò mette in luce l'importanza fondamentale della manutenzione, in assenza della quale può verificarsi il rischio di cedimento arginale anche per eventi non particolarmente significativi e contenibili in alveo. Questa eventualità è stata presa in considerazione nelle successive simulazioni.



Figura 2-3 – Posizione del collasso dell'argine del fiume Panaro durante l'evento del 19 gennaio 2014.

2.5. Studi recenti

Successivamente all'evento di piena del gennaio 2014, sono stati avviati studi finalizzati all'analisi della sicurezza del sistema arginale del fiume Panaro e alla progettazione dell'adeguamento delle arginature stesse. Lo studio idrologico preliminare, condotto dall'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia [2], ha definito gli idrogrammi di progetto con tempo di ritorno assegnato e ha mostrato che la portata smaltibile a valle della cassa d'espansione è prossima a 500 m³/s, anche se non risulta garantito il franco idraulico di sicurezza di 1 m in diverse sezioni. Successivi approfondimenti [6] hanno confermato che il sistema arginale è in grado di contenere l'onda di piena con tempo di ritorno di 50 anni (colmo 525 m³/s), a meno di due criticità locali, mentre l'onda di piena con tempo di ritorno di 100 anni (colmo 650 m³/s) determina franchi negativi in alcune sezioni e franchi inferiori a 1 m in diversi tratti tra la cassa di espansione e la sezione di Camposanto. Infine, l'asta fluviale non è in grado di contenere l'idrogramma con tempo di ritorno 200 anni (colmo 875 m³/s). Il progetto di adeguamento prevede di garantire il transito dell'onda di piena cinquantennale con 1 m di franco [6].

Un altro recente studio [7] è stato effettuato dal DIA su incarico dell'Agenzia per la Sicurezza Territoriale e la Protezione Civile della Regione Emilia-Romagna. Nonostante gli idrogrammi di progetto utilizzati in tale studio fossero diversi da quelli utilizzati per la progettazione, i risultati hanno confermato che il sistema arginale non è in grado attualmente di contenere eventi di tempo superiore a 50 anni (colmo 601 m³/s, secondo il detto studio), che diventeranno circa 100 anni (colmo 655 m³/s) a franco zero qualora vengano completati gli interventi di rialzo e ringrosso arginale previsti dall'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) [6].

2.6. Stato attuale

Gli studi sopracitati hanno evidenziato che, allo stato attuale, il tratto arginato del fiume Panaro non è in grado di convogliare la portata di riferimento prevista per lo scenario di media probabilità (200 anni). Con il completamento del progetto di adeguamento del sistema arginale sarà possibile contenere a malapena l'onda di piena con tempo di ritorno 100 anni.

Di conseguenza, i comparti in sinistra e destra idraulica del fiume Panaro sono soggetti a rischio residuale di esondazione non solo per lo scenario di scarsa probabilità (tempo di ritorno 500 anni), come previsto dal PGRA, ma anche per lo scenario di media probabilità (200 anni), nonostante l'attuale perimetrazione della APSFR per tale scenario escluda le aree esterne alle arginature. Per entrambi gli scenari si verificherebbero 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. In particolare, il territorio del Comune di Nonantola potrebbe risultare coinvolto in eventi di questo tipo.

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 [5]. 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.

Per valutare gli effetti di fenomeni di questo tipo sul territorio, è necessario procedere alla simulazione, mediante modelli numerici almeno bidimensionali, del fenomeno di inondazione conseguente. Modelli più semplificati, quali quelli monodimensionali, che normalmente si utilizzano nello studio dei fenomeni di piena nei corsi d'acqua, non sono in grado di simulare la complessa dinamica che viene ad instaurarsi quando la corrente si muove fuori alveo, ove non sono identificabili a priori delle direzioni preferenziali di deflusso. Nel caso specifico, inoltre, l'area è intersecata da diversi rilevati, che possono influire in maniera sostanziale sulla dinamica del fenomeno. Per questa ragione è indispensabile una conoscenza dettagliata dell'altimetria del territorio, comprensiva di numerosi rilevati stradali/ferroviari e relativi attraversamenti, per costruire un modello del terreno sulla base del quale effettuare i calcoli idraulici.

La disponibilità di rilievi LiDAR ad alta risoluzione del territorio oggetto di studio e di un modello numerico accurato, robusto ed efficiente dal punto di vista computazionale consente di effettuare simulazioni idrauliche dettagliate. Nel presente studio, questi strumenti sono stati utilizzati al fine di analizzare diversi scenari di allagamento che possono interessare il territorio del Comune di Nonantola e valutare quindi la pericolosità idraulica dell'area.

3. DATI TOPOGRAFICI

3.1. Rilievi disponibili

Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM) nel corso del 2008 ha avviato una campagna straordinaria di telerilevamento sulle principali aste fluviali italiane, sulla fascia costiera e su aree ad elevata criticità idrogeologica. Risulta dunque disponibile un modello digitale del terreno (DTM) a risoluzione 1 m derivante da scansione LiDAR che copre buona parte del territorio nazionale (nel seguito indicato come "MATTM2008").

Sfortunatamente, l'area di studio (Panaro e suo comparto in destra idraulica) è risultata in buona parte esclusa dal suddetto rilievo. Il fiume Panaro presenta in particolare alcuni tratti mancanti nella zona a monte di Bomporto, mentre nel comparto in destra non è disponibile il rilievo MATTM2008 nei comuni di Castelfranco Emilia, Sant'Agata Bolognese e in buona parte del territorio dei comuni di Nonantola, Crevalcore e San Giovanni in Persiceto.

Negli anni successivi, il MATTM ha provveduto ad alcune integrazioni del rilievo LiDAR precedente in aree di particolare interesse, tra cui un'area nel tratto di monte del fiume Panaro (zona della cassa d'espansione e confluenza col Tiepido), rilevata nel 2014.

Anche l'Agenzia Interregionale per il fiume Po (AIPo) si è dotata, nel corso degli anni, di diversi rilievi lungo i corsi d'acqua di sua competenza. Nel 2015 sono stati effettuati due diversi rilievi LiDAR lungo l'asta del fiume Panaro, uno in primavera (maggio) e uno in autunno (settembre). In aggiunta, è stato realizzato un rilievo topografico delle sezioni trasversali e dei contenimenti arginali del fiume Panaro nel 2017.

La stessa AIPo nel 2017 ha commissionato un rilievo LiDAR dell'area mancante nel comparto in destra idraulica del Panaro (nel seguito "AIPO2017"). Il DTM con risoluzione spaziale di 1 m ottenuto da quest'ultima campagna di telerilevamento copre tra l'altro la porzione di territorio mancante del comune di Nonantola, compreso il centro abitato principale. Solo la porzione del territorio comunale più a Nord e quella più ridosso dell'argine destro del Panaro sono quindi coperte dal meno recente rilievo MATTM2008. L'accuratezza del rilievo LiDAR MATTM2008 è di circa 30 cm in planimetria e di circa 15 cm in altimetria. Non è stato possibile reperire informazioni sull'accuratezza degli altri rilievi, ma la si assume paragonabile a quella del LiDAR MATTM2008.

La Figura 3-1 rappresenta una mappa della copertura dei diversi rilievi sull'area di interesse. Per la copertura del territorio comunale di Nonantola si faccia invece riferimento alla Figura 3-2, che rappresenta il DTM.

Si noti che il completamento del comparto nella porzione Est a ridosso del torrente Samoggia (Comune di San Giovanni in Persiceto) potrebbe essere garantito grazie ad un DTM con risoluzione spaziale di 5 m fornito dalla Regione Emilia-Romagna (RER), derivante dalla Carta Tecnica Regionale a scala 1:5000 (curve di livello e punti quotati). Tuttavia, tale area non è coinvolta dagli scenari di allagamento considerati nel presente lavoro, che si focalizza sul territorio del comune di Nonantola: l'assenza di un DTM con risoluzione e accuratezza paragonabili a quelle del resto del comparto non è dunque limitante ai fini di questo studio.

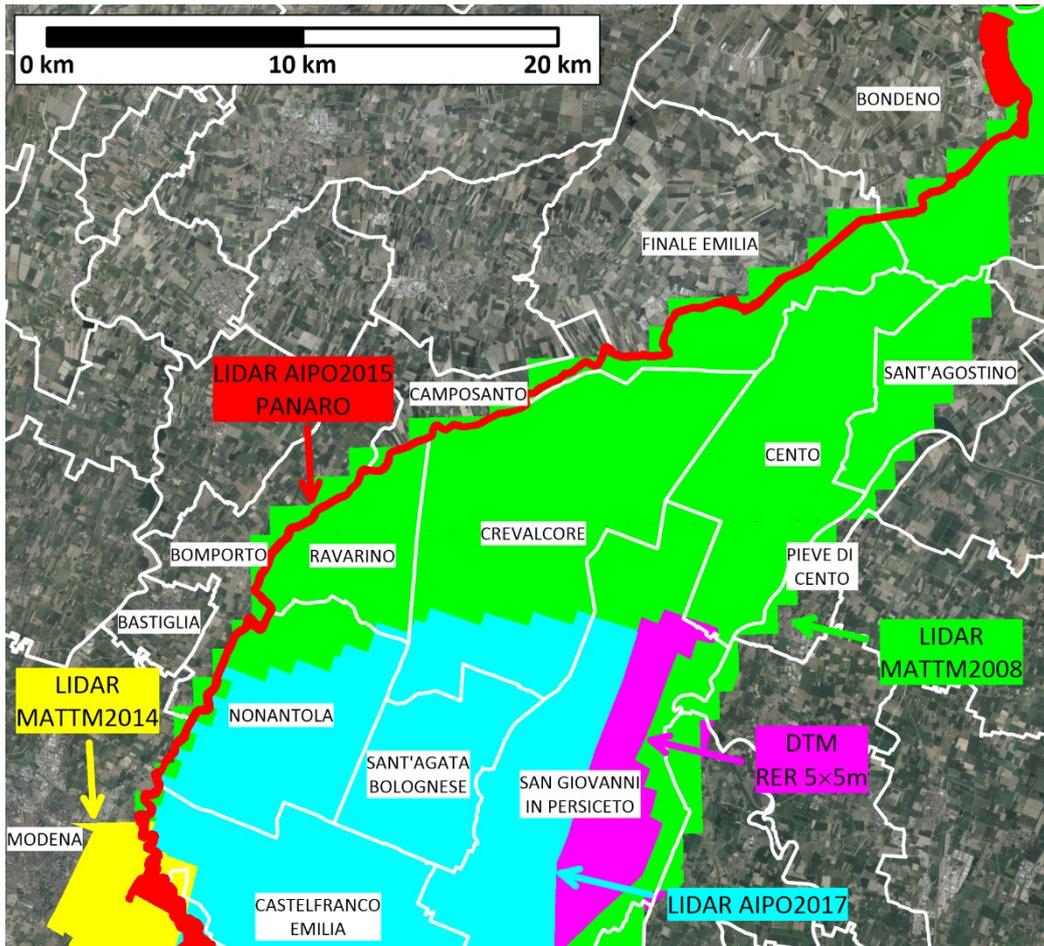


Figura 3-1 – Rilievi Lidar disponibili per il comparto in destra Panaro. Le linee bianche indicano i confini comunali.

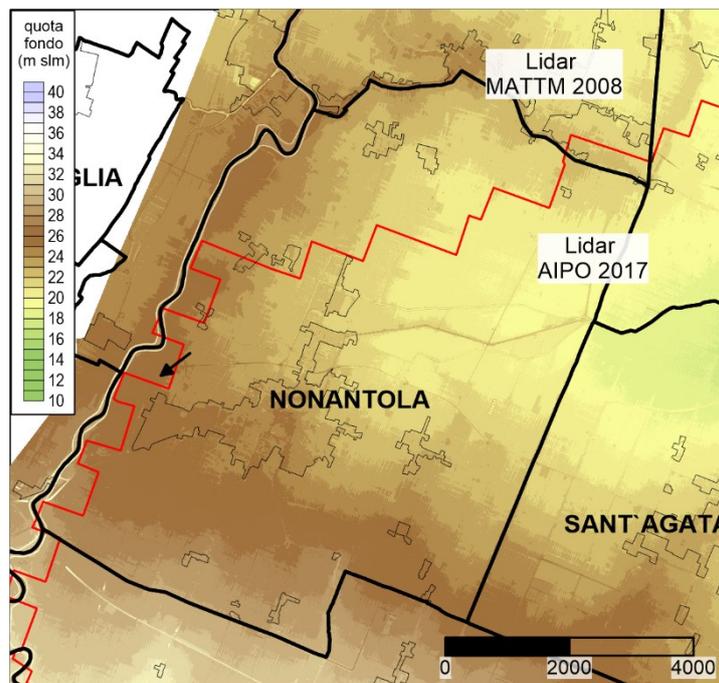


Figura 3-2 – Territorio comunale di Nonantola: DTM disponibili. La linea rossa indica il confine tra i due rilievi. La freccia nera indica il tratto di tangenziale mancante.

3.2. Elaborazione dei rilievi LiDAR: fiume Panaro

Per l'asta del fiume Panaro sono stati presi in considerazione i rilievi LiDAR AIPo2015. Come osservato in studi idraulici precedenti [6], il DTM risalente all'autunno del 2015 (settembre) è caratterizzato da una maggiore copertura vegetazionale, mentre quello risalente alla primavera del 2015 (maggio) è caratterizzato da un livello idrico in alveo più elevato. Infatti, è noto che i rilievi LiDAR non siano in grado di restituire le quote del fondo al di sotto della superficie libera dell'acqua: il risultato è un interrimento "fittizio" del fiume, in grado di influenzare significativamente le portate transitanti in occasione di una piena durante le simulazioni numeriche. Questo è particolarmente vero per il fiume Panaro, che è praticamente privo di aree golenali.

Per le modellazioni idrauliche del presente studio è stato selezionato il DTM derivante dal rilievo "primaverile", che presenta una migliore accuratezza nelle aree esterne all'alveo (argini e golene) in virtù della minore copertura vegetazionale.

Per l'alveo di magra si è però provveduto a ripristinare la porzione di sezione al di sotto della superficie libera dell'acqua al momento del rilievo, con l'ausilio di un algoritmo di interpolazione automatica appositamente predisposto. Tale procedura di "scavo" sfrutta le informazioni sulle quote terreno "sommese" desunte dal rilievo per sezioni (in questo caso si è fatto riferimento al rilievo del 2017 fornito da AIPo) per ricavare per interpolazione le quote di fondo nei tratti intermedi tra una sezione e l'altra. Un esempio del risultato finale di tale procedura è riportato per una sezione nella Figura 3-3.

Il DTM, che originariamente aveva una risoluzione spaziale di 1 m, è stato re-interpolato su una griglia regolare con spaziatura pari a 2 m. Tale operazione non determina una significativa perdita di informazione batimetrica rispetto ai dati di partenza, ma permette di ridurre il numero di celle di calcolo utilizzate per discretizzare il dominio durante le simulazioni e, di conseguenza, l'onere computazionale.

In ogni caso, per garantire la miglior rappresentazione possibile delle arginature del Panaro, lungo le sommità sono state mantenute le quote di contenimento desunte dal rilievo topografico del 2017. Nel DTM sono inoltre state chiuse artificialmente tutte le possibili immissioni dai canali laterali regolate da chiaviche o portoni vinciani, che nel rilievo non sono rappresentati: si ipotizza infatti che, in occasione di piene significative, tali manufatti vengano mantenuti chiusi.

La batimetria è stata poi modificata alla luce del piano di adeguamento degli argini in diversi tratti del fiume Panaro, che dovrebbe portare le sommità arginali ad una quota tale da garantire un franco pari a 1 m per l'onda di piena caratterizzata da un tempo di ritorno di 50 anni. In corrispondenza dei tratti interessati, evidenziati nella Figura 3-4, le quote arginali della batimetria originale sono state rialzate ai valori desunti dal progetto fornito da AIPo. In realtà, al momento risulta finanziata solo una parte di tale progetto: in particolare, si prevede di adeguare le quote di contenimento al fine di garantire un franco di 0.5 m per l'onda di piena con tempo di ritorno di 50 anni. Tuttavia, si è ritenuto di inserire nella batimetria finale il progetto completo.

Infine, è stata localmente corretta la quota arginale in sinistra idraulica a Navicello, in corrispondenza del varco di accesso ad abitazioni poste entro l'alveo. In tale tratto, infatti, è stato recentemente realizzato un muro in c.a. con coronamento alla quota degli argini circostanti (circa 33.2 m s.l.m.) con un varco che viene chiuso in occasione di piene significative, garantendo la continuità del contenimento arginale.

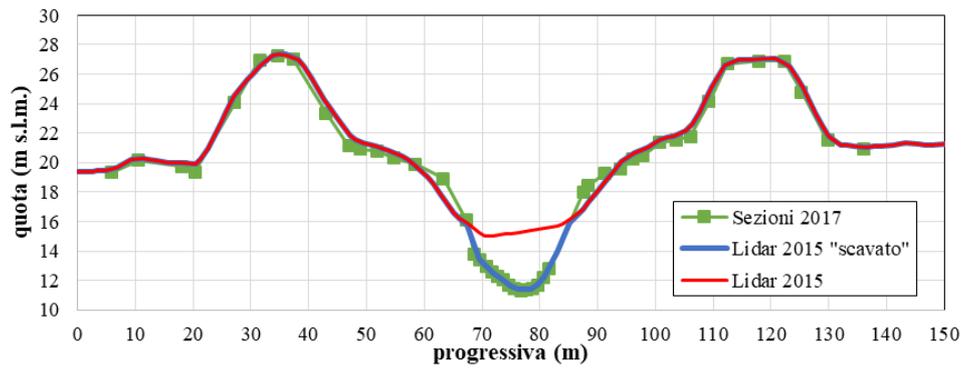


Figura 3-3 – Una sezione del fiume Panaro (zona Camposanto): esempio di confronto tra DTM originario e DTM dopo la procedura di “scavo” dell’alveo di magra.

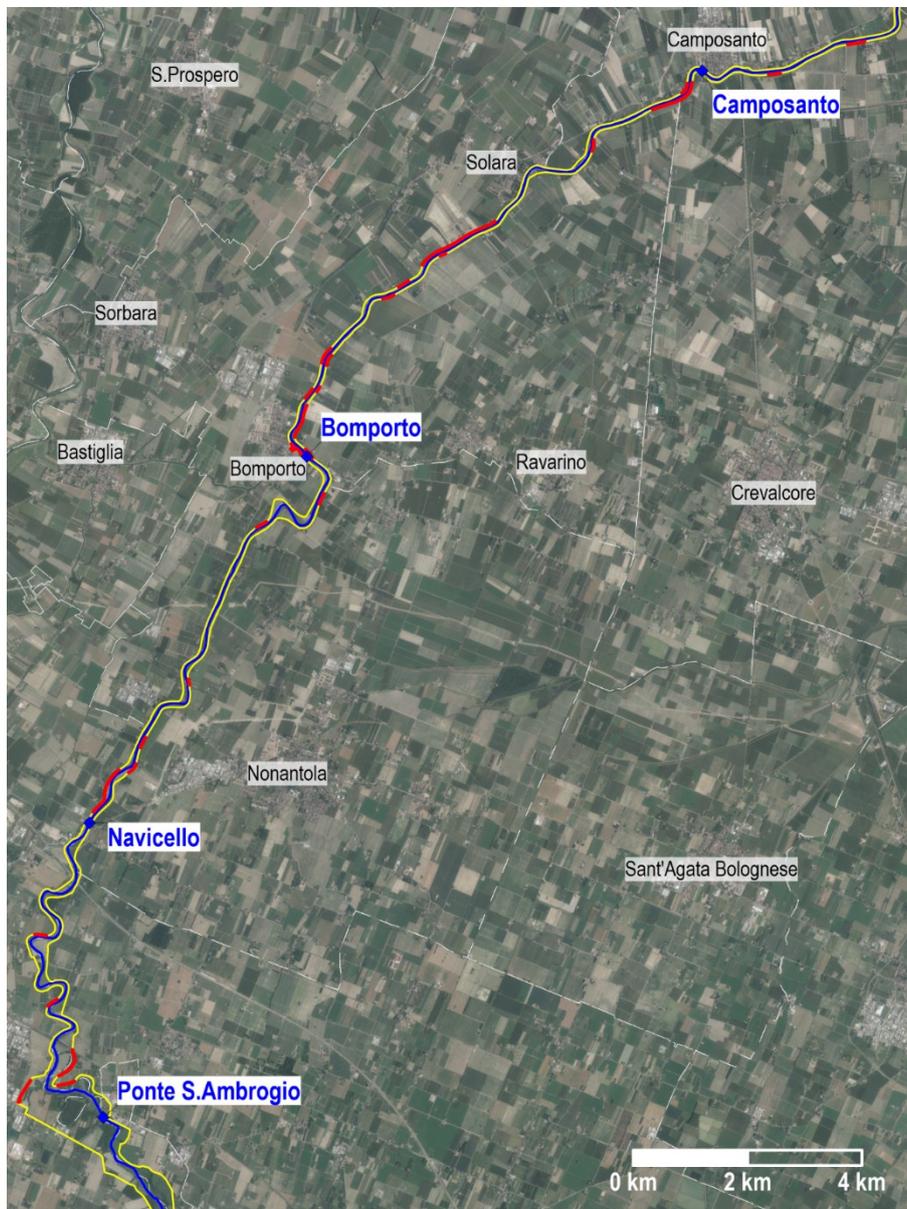


Figura 3-4 – Indicazione dei tratti di argine del fiume Panaro interessati dal progetto di rialzo (in rosso). Sono inoltre indicati il nome e la posizione degli idrometri (in blu).

3.3. Elaborazione dei rilievi LiDAR: comparto in destra Panaro

I DTM disponibili (MATTM2008, MATTM2014, AIPO2017) sono stati uniti per costruire un unico DTM del comparto in destra Panaro. Nelle eventuali aree di sovrapposizione è stato privilegiato il rilievo più recente. Sono inoltre state escluse dal dominio le aree a valle (a Est e Nord del comparto) che si ritengono sufficientemente lontane da Nonantola da non influenzare minimamente la dinamica di allagamento nel territorio comunale, allo scopo di ridurre la dimensione del dominio e, di conseguenza, l'onere computazionale delle successive simulazioni.

Con la stessa finalità, il DTM originario (a passo 1 m) è stato diradato su una griglia regolare a passo 2 m, come già per il fiume Panaro. 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.

Proprio perché i rilevati sono in grado di influenzare significativamente la dinamica di allagamento, si sono rese necessarie alcune correzioni al DTM relativamente ad una infrastruttura di recente costruzione, ossia la variante della SP255 ("tangenziale") che bypassa il centro abitato di Nonantola a Ovest e a Nord. Il primo stralcio dell'opera è stato inaugurato nel 2010, mentre il secondo nel 2014. Ne consegue che il rilevato stradale è presente nel DTM più recente (AIPO2017), mentre risulta ovviamente assente nel DTM MATTM2008, precedente alla costruzione della strada. Tuttavia, la tangenziale ricade quasi completamente, salvo un piccolissimo tratto a ovest (indicato con una freccia in Figura 3-2), nell'area interessata dal rilievo più recente ed è quindi già adeguatamente descritta. È stato quindi necessario effettuare solo una piccola integrazione nel tratto mancante (lungo meno di 500 m): il tracciato planimetrico è stato desunto da ortofoto recenti dell'area, mentre le quote altimetriche sono state definite a partire dagli elaborati forniti dal Comune stesso. In realtà, le quote di progetto previste in tali elaborati risultano non del tutto coerenti rispetto alle quote ricavabili dal DTM AIPO2017, per cui un utilizzo diretto dei dati non è stato possibile. Si è tuttavia osservato che il profilo stradale nel breve tratto mancante presentava un andamento privo di irregolarità altimetriche, con quote linearmente decrescenti tra le due estremità. Le quote da imporre nel DTM sono dunque state definite per interpolazione lineare tra quelle dei due estremi presenti nel rilievo del 2017. La Figura 3-5 mostra un confronto tra la porzione del DTM pre- e post-correzione.

Un'altra importante correzione effettuata sul DTM riguarda eventuali sottopassi e/o gallerie al di sotto di rilevati stradali o ferroviari. Questi attraversamenti potrebbero contribuire al passaggio di una parte del volume esondato verso valle, che in assenza di discontinuità tenderebbe ad essere completamente trattenuto a tergo del rilevato stesso. Tuttavia, i sottopassi non sono descritti adeguatamente dai rilievi LiDAR, che campionano le quote delle strade/ferrovie sovrastanti: spesso le correzioni più importanti sono già incorporate nel DTM grazie alle procedure automatizzate di post-processing dei punti quotati ottenuti dal volo LiDAR, ma talvolta è necessario ricorrere a correzioni manuali. È questo il caso di alcuni sottopassi ciclabili e del canale che scorre al di sotto della tangenziale di Nonantola, le cui effettive quote terreno sono state ripristinate nel DTM, come mostrato ad esempio nella Figura 3-6. Poiché il DTM è basato su una griglia con spaziatura di 2 m, sono invece stati trascurati i manufatti di larghezza inferiore a tale soglia (tombini, passaggi faunistici).

Infine, è stato riservato un trattamento specifico alle zone urbane appartenenti al Comune di Nonantola. In particolare, è stata adottata la metodologia denominata "Building Hole" [8], 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 del centro abitato di Nonantola e delle principali frazioni del Comune, mentre sono state trascurate le case sparse e i centri abitati appartenenti ai comuni limitrofi. Per l'individuazione dell'impronta al suolo degli edifici si è fatto ricorso alla mappa delle unità volumetriche fornita direttamente dal Comune di Nonantola. La Figura 3-7 mostra a titolo di esempio il risultato della procedura di eliminazione degli edifici dal DTM per il centro abitato di Nonantola. Le altre frazioni considerate sono: Bagazzano, Bonaghino, Case Pellegrini, Rubbiara, Ampergola, Redù, Case Limpido, La Fornace, Case Via Larga, La Bertolda, Case Ponte Fossa, Case Reggiani, Campazzo, La Selvatica, La Grande, La Grande del Bosco, Bellincina, Cantone.

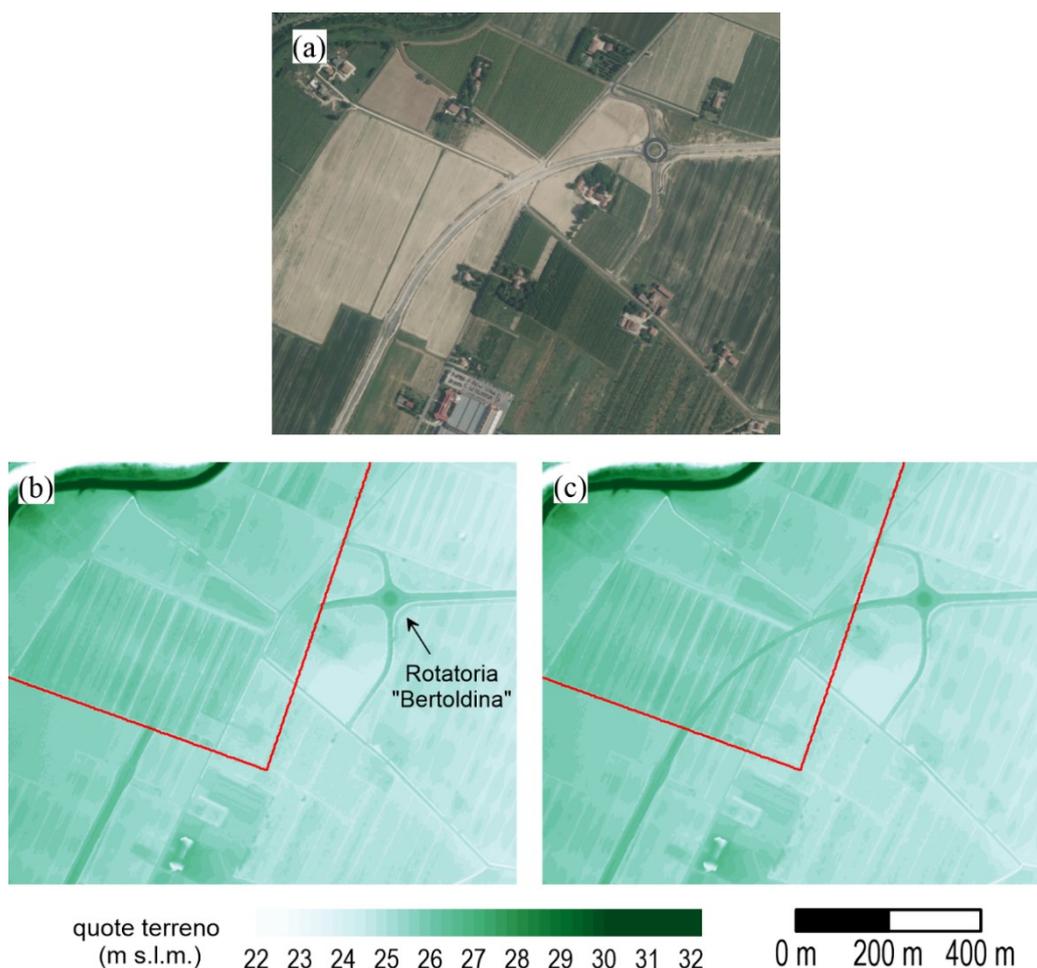


Figura 3-5 – Integrazione del tratto mancante della tangenziale di Nonantola (a); DTM originario (b) e DTM corretto (c). La linea rossa indica il confine tra i rilievi MATTM2008 e AIPO2017.

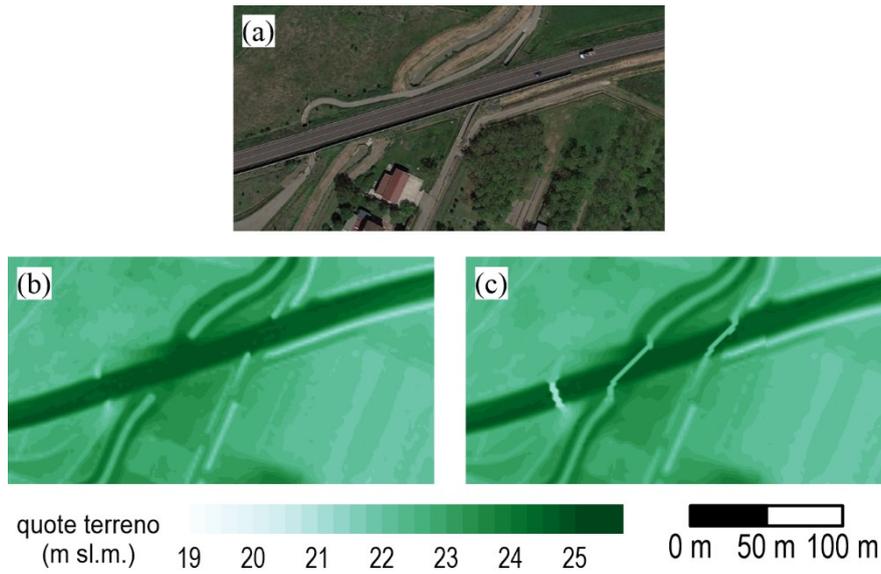


Figura 3-6 – Esempio di attraversamenti al di sotto della tangenziale di Nonantola (a): strada, tombamento del canale Torbido, attraversamento ciclabile; DTM originario (b) e DTM corretto (c).

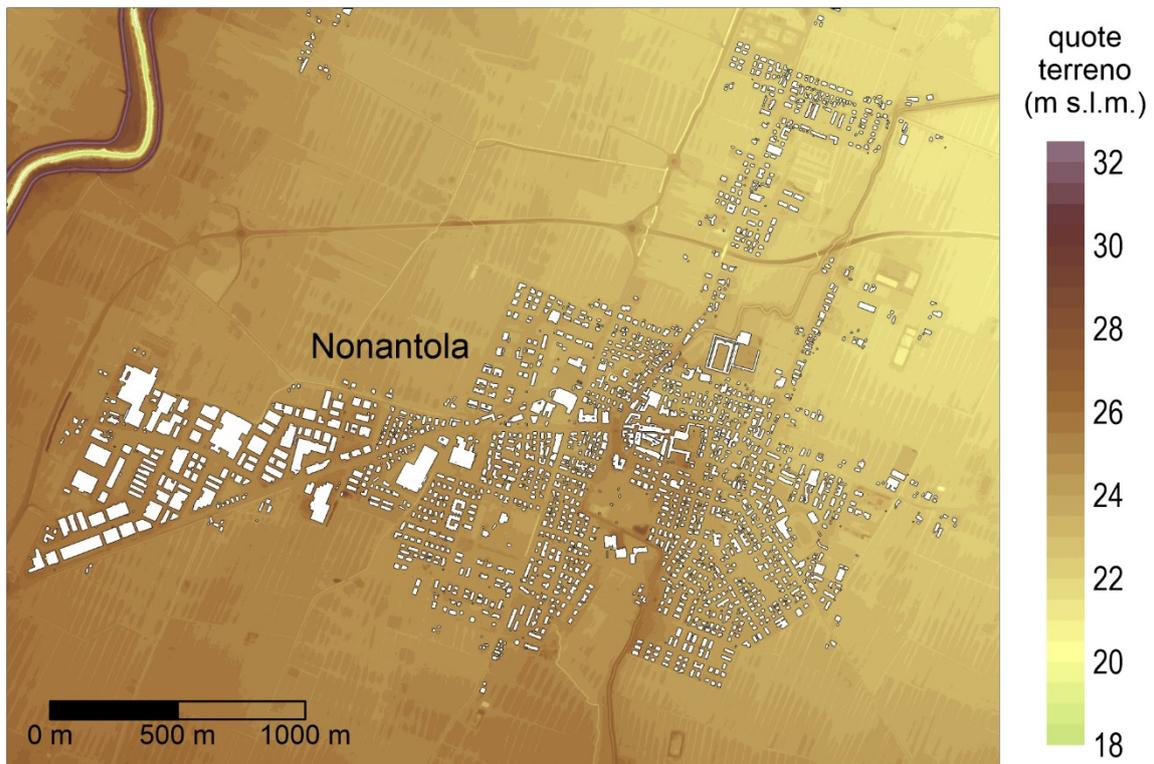


Figura 3-7 – Trattamento della zona urbana tramite esclusione degli edifici (in bianco) dal dominio di calcolo: esempio del DTM nel centro abitato di Nonantola.

3.4. Costruzione della batimetria complessiva

La batimetria finale, alla base delle successive modellazioni idrauliche, è stata definita dall'unione del DTM del fiume Panaro e di quello del comparto esterno, ottenuti a seguito di tutte le elaborazioni descritte nei paragrafi precedenti. Il DTM dell'intera area di studio è rappresentato in Figura 3-8. La superficie complessiva del DTM è pari a poco più di 300 km², ma l'effettivo dominio di calcolo per le simulazioni successive è stato limitato all'area di circa 180 km² identificata dalla linea di colore magenta in Figura 3-8. Come detto, la risoluzione spaziale della griglia è di 2 m × 2 m. Il tratto di fiume Panaro modellato si estende dall'uscita della cassa d'espansione fino alla sezione di Camposanto (circa 30 km), anche se per la fase di taratura (paragrafo 6.3) è stata considerata l'intera asta fluviale fino a Bondeno.

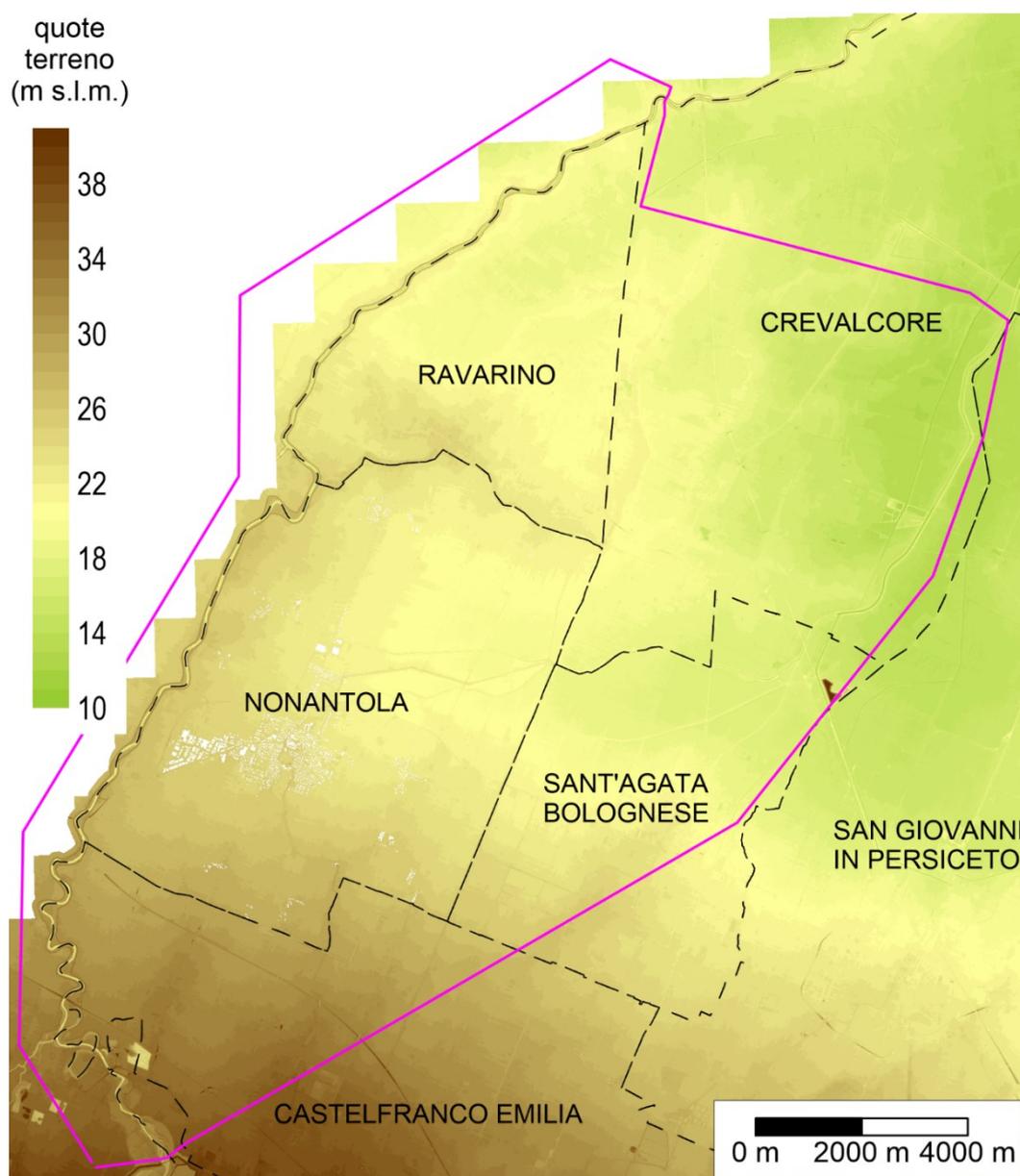


Figura 3-8 – Batimetria risultante dell'intera zona oggetto di studio, con indicazione dei comuni coinvolti. La linea magenta identifica il dominio di calcolo per le simulazioni.

4. DATI IDROLOGICI

La caratterizzazione idrologica più recente per il bacino del fiume Panaro è contenuta in uno studio dell'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia [2]. Dallo studio sono stati ricavati gli idrogrammi di piena in uscita dalla cassa d'espansione, successivamente utilizzati come riferimento per il progetto di adeguamento dell'asta fluviale di valle nei confronti di eventi con determinato tempo di ritorno [6]. Tali idrogrammi non sono tuttavia idonei ai fini del presente studio, in quanto presentano volumi tra loro paragonabili al variare del tempo di ritorno. Per uno studio finalizzato a definire i possibili scenari di allagamento conseguenti a rotture arginali, il volume della piena di riferimento è un parametro fondamentale e dovrebbe invece essere sensibilmente crescente all'aumentare del tempo di ritorno per caratterizzare adeguatamente la pericolosità idraulica nei territori interessati dalle esondazioni.

Per questo motivo, in un precedente studio del DIA [7] è stata adottata una diversa strategia per la scelta degli idrogrammi di piena da utilizzare con la finalità di simulare breccie arginali. In particolare, in tale occasione è stata effettuata un'elaborazione specifica basandosi sui dati disponibili alla stazione di Bomporto. Sono stati selezionati i 44 eventi più gravosi registrati nel periodo 2000-2016 e le misure di livello relative a tali eventi sono state convertite in valori di portata tramite la scala delle portate riportata sugli Annali Idrologici. La serie storica delle onde di piena così ottenuta è stata elaborata statisticamente secondo la metodologia descritta in [9] al fine di costruire gli idrogrammi sintetici per il fiume Panaro con prefissato tempo di ritorno. Nella Figura 4-1 sono rappresentate le onde di piena caratterizzate dai tempi di ritorno di 20, 50, 100 e 200 anni.

Va sottolineato che gli idrogrammi così ottenuti prescindono dalla configurazione di apertura degli scarichi di fondo della cassa d'espansione e da eventuali manovre effettuabili, in particolare a seguito della recente installazione di paratoie di regolazione sulle luci di fondo del manufatto principale. Tuttavia, si ritiene che in termini di volume di piena tali idrogrammi possano rappresentare adeguatamente onde di piena tipiche del fiume Panaro al variare del tempo di ritorno.

Inoltre, si è ipotizzato che tali onde di piena, elaborate per la stazione di Bomporto, potessero essere rappresentative anche del tratto a monte: questo è giustificato dal fatto che il fiume Panaro non presenta aree golenali di particolare rilievo, in grado di laminare significativamente il picco di portata tra l'uscita della cassa d'espansione e la sezione di Bomporto.

Si noti che l'idrogramma con tempo di ritorno di 200 anni ha un colmo di circa $700 \text{ m}^3/\text{s}$, superiore alla massima portata contenibile dal sistema arginale anche a seguito del completamento del progetto di adeguamento. Tale evento è stato dunque scelto nel presente studio come rappresentativo di uno scenario idrologico tale da determinare tracimazioni lungo le arginature. Invece, l'evento con tempo di ritorno di 20 anni (colmo $530 \text{ m}^3/\text{s}$), contenibile in tutta l'asta fluviale, è stato selezionato per lo scenario relativo ad una piena con probabilità di accadimento più elevata, in cui è possibile l'innescò di una breccia per cause diverse dal sormonto.

Questi due idrogrammi sono dunque stati utilizzati quali condizioni al contorno di monte per le simulazioni idrauliche bidimensionali descritte nel seguito.

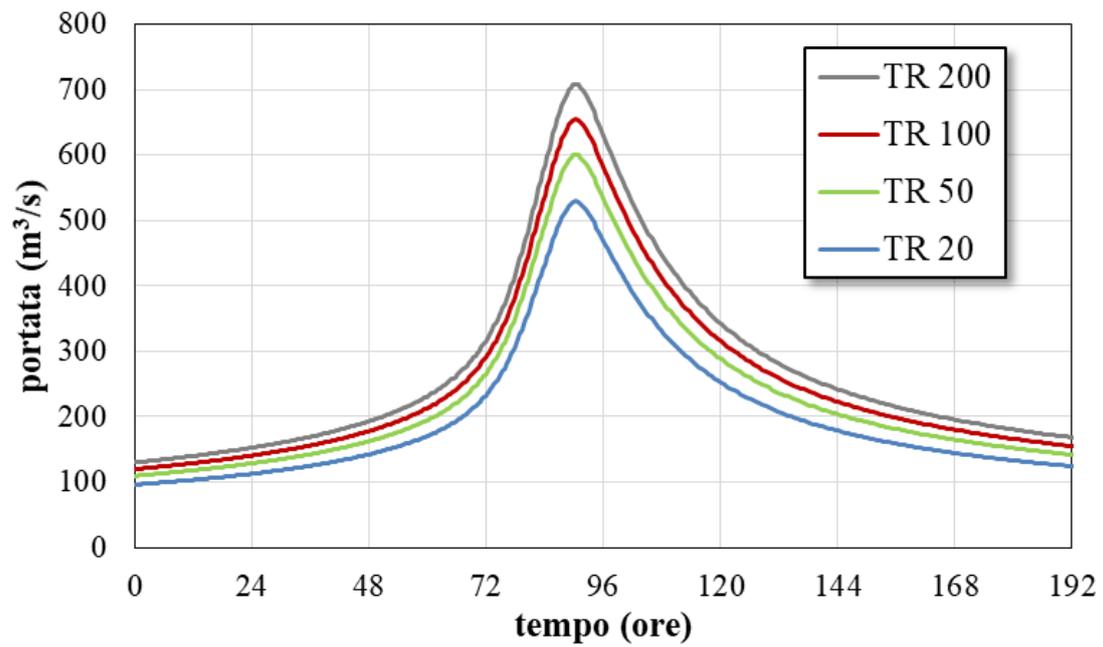


Figura 4-1 – Idrogrammi sintetici con prefissato tempo di ritorno per il fiume Panaro. Le onde di piena con tempo di ritorno pari a 20 e 200 anni sono state imposte come condizioni al contorno di monte in uscita dalla cassa d'espansione nelle simulazioni successive sul fiume Panaro.

5. MODELLO NUMERICO

Il modello numerico impiegato², sviluppato presso il 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 di quantità di moto, ed assicura una robusta descrizione dei fronti di bagnamento e 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 e frastagliati, 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 di evitare problemi numerici di stabilità del modello, 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). L'utilizzo di un codice di calcolo di tipo parallelo, al posto 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.

L'algoritmo è in grado di gestire sia griglie cartesiane uniformi, sia griglie strutturate non uniformi, generate secondo opportuni criteri [10].

Per maggiori dettagli riguardanti le equazioni costitutive del modello e il metodo di soluzione, si rimanda a [11, 10].

² La lettura di questo paragrafo, di carattere molto tecnico, può essere omessa senza inficiare la comprensione di quanto segue.

6. COSTRUZIONE DEL MODELLO

6.1. Generazione della griglia multi-risoluzione

Nel presente studio, la griglia di partenza presenta una risoluzione spaziale uniforme pari a 2 m e comprende circa 45 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 14 milioni di celle. La griglia è stata ottenuta imponendo il mantenimento della massima risoluzione (2 m) in corrispondenza dei seguenti elementi:

- alveo del fiume Panaro, comprese le golene e le arginature;
- centri abitati ricadenti nel Comune di Nonantola;
- 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 [10], come mostrato nel dettaglio riportato nella Figura 6-1 a titolo di esempio. La griglia complessiva è mostrata nella Figura 6-2.

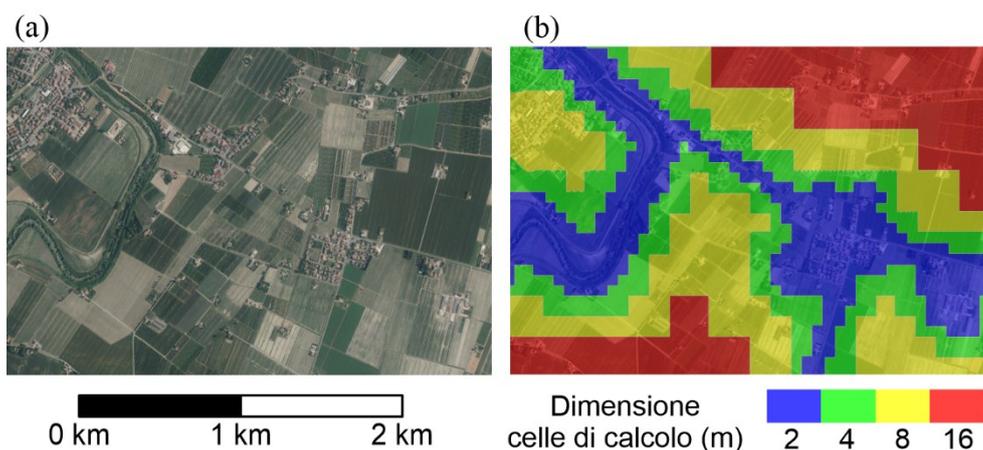


Figura 6-1 – (a) Ortofoto di un'area con alcuni elementi in corrispondenza dei quali è necessario imporre la massima risoluzione (alveo Panaro, rilevato stradale e centro abitato); (b) mesh multi-risoluzione corrispondente.

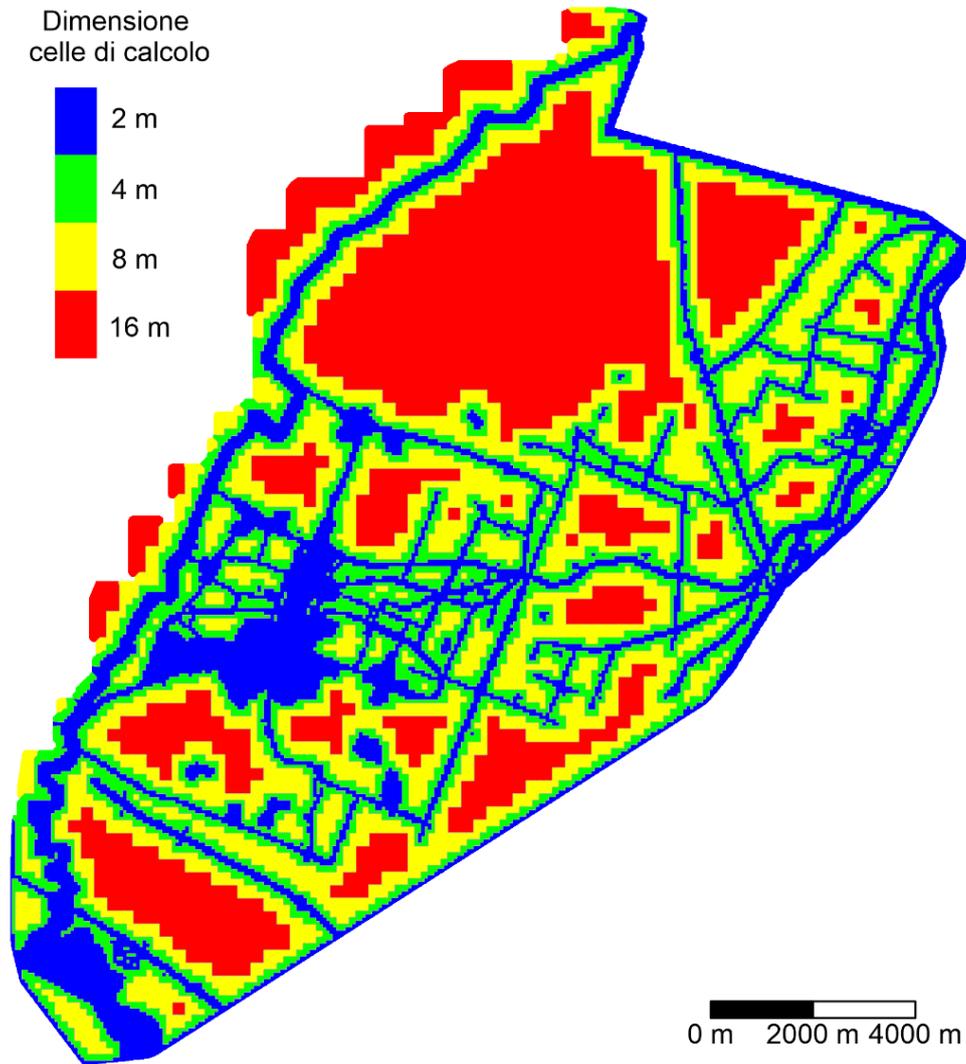


Figura 6-2 – Mappa della risoluzione spaziale adottata nel dominio.

6.2. Scabrezza del comparto in destra Panaro

Nel comparto in destra idraulica del fiume Panaro, si è assunto un coefficiente di scabrezza secondo Strickler $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$. Tale valore è stato desunto dalla taratura effettuata per l'allagamento conseguente alla rotta arginale del fiume Secchia del gennaio 2014 [12]. Date le caratteristiche simili dei due territori (aree prevalentemente agricole), si è ritenuto di poter adottare il medesimo coefficiente di scabrezza, che peraltro ricade nel range indicativo di valori forniti in letteratura sulla base dell'uso del suolo.

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.

6.3. Taratura della scabrezza per il fiume Panaro

Nell'alveo del fiume Panaro il coefficiente di scabrezza è stato definito a seguito di una procedura di taratura basata sulla simulazione di eventi di piena reali.

Per tali simulazioni di taratura, è stato definito un dominio di calcolo per il tratto di fiume compreso tra la sezione di Ponte Sant'Ambrogio e la sezione di Bondeno. Per ciascun evento storico, è stato confrontato l'andamento del livello idrico restituito dal modello con quello registrato agli idrometri di Navicello, Bomporto e Camposanto (la cui posizione è mostrata in Figura 3-4), dopo aver imposto come condizioni al contorno di monte gli idrogrammi di portata in ingresso a Ponte Sant'Ambrogio (sul Panaro) e al ponte della Via Emilia in località Fossalta (sul Tiepido) e come condizione al contorno di valle l'andamento del livello registrato a Bondeno. È stato trascurato il contributo del Canale Naviglio, come se i portoni vinciani fossero sempre chiusi. Gli eventi considerati sono i seguenti:

- 13-28 gennaio 2014 (evento 1);
- 29 gennaio-5 febbraio 2014 (evento 2);
- 28 febbraio-1 marzo 2016 (evento 3).

Sulla base dei risultati della taratura, si è assunto un unico coefficiente di scabrezza secondo Strickler pari a $k_s = 20 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$.

In Figura 6-3, Figura 6-4 e Figura 6-5 si riportano, per ciascun evento simulato, i grafici delle condizioni al contorno imposte nonché quelli relativi al confronto tra i livelli registrati e simulati nelle sezioni di controllo, che risultano in buon accordo tra loro e giustificano la scelta effettuata relativamente al valore del coefficiente di scabrezza. Per tutti gli eventi, è infatti ben riprodotto il colmo e la fasatura a Navicello. A Bomporto e Camposanto, il colmo risulta ben riprodotto per l'evento 1, mentre si osserva una leggera sovrastima del colmo per l'evento 2 e una leggera sottostima del colmo per l'evento 3; la fasatura del colmo è comunque soddisfacente.

Si osserva una notevole sottostima dei livelli nella fase di esaurimento della piena per tutti gli eventi; tale discrepanza può essere attribuita alla mancata inclusione dell'apporto del Naviglio nella simulazione, dopo la riapertura dei portoni vinciani. Ciò è particolarmente rilevante per l'evento 1 (13-28 gennaio 2014): il drenaggio dell'allagamento del territorio dei comuni di Bastiglia e Bomporto, conseguente all'evento di rotta sul fiume Secchia, è stato infatti effettuato mediante numerosi tagli artificiali degli argini dei cavi principali (cavo Argine, cavo Minutara, Naviglio stesso) che hanno scaricato le acque nel Naviglio e, in definitiva, nel fiume Panaro, dando origine ad un apporto non trascurabile alla portata transitante nel fiume stesso e ad un innalzamento dei livelli idrici.

Evento 13-28 gennaio 2014

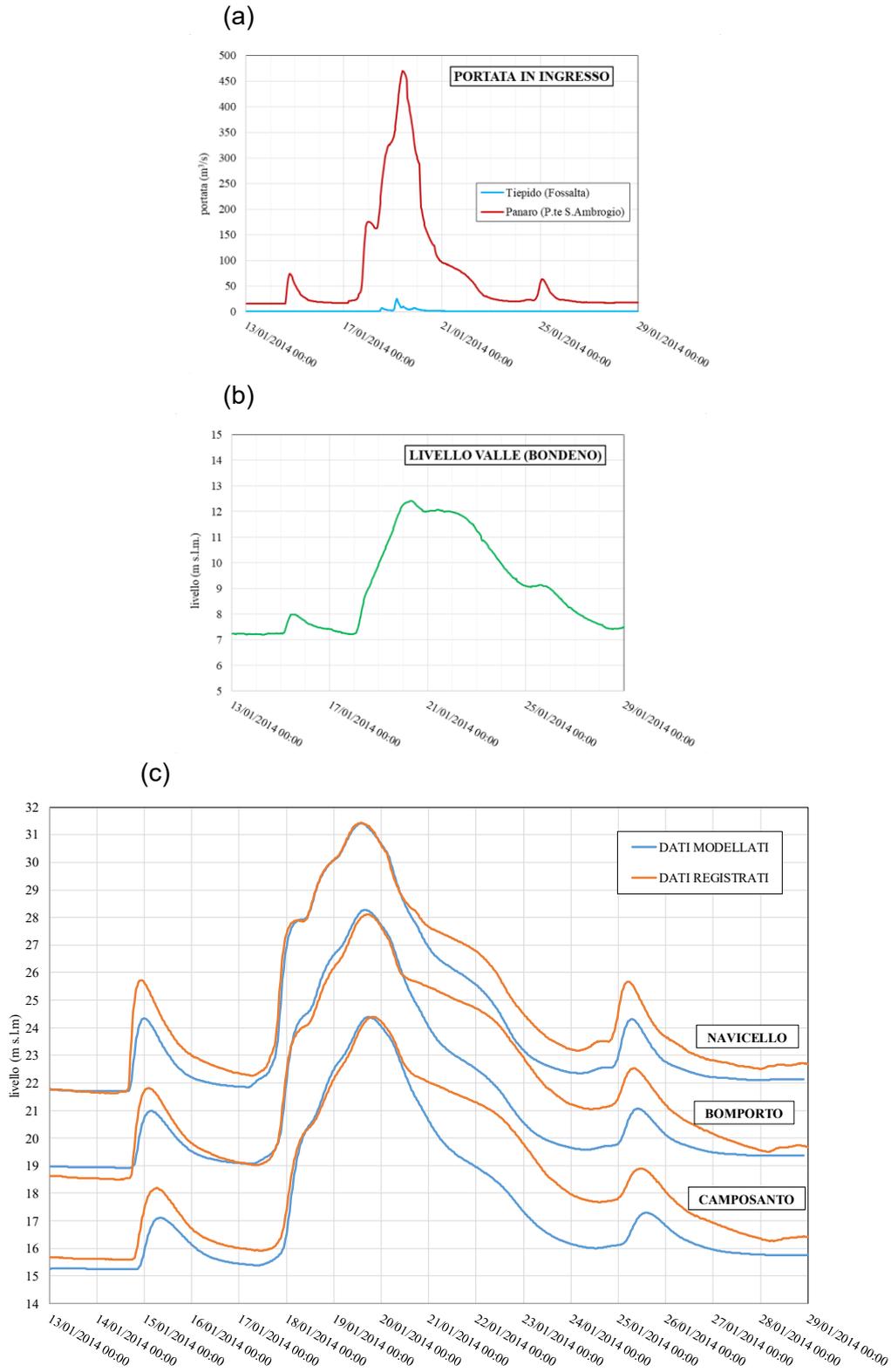


Figura 6-3 - Evento del 13-28 gennaio 2014 sul fiume Panaro: (a) condizioni al contorno di monte; (b) condizione al contorno di valle; (c) confronto tra livelli registrati e simulati agli idrometri di Navicello, Bomporto e Camposanto.

Evento 29 gennaio – 5 febbraio 2014

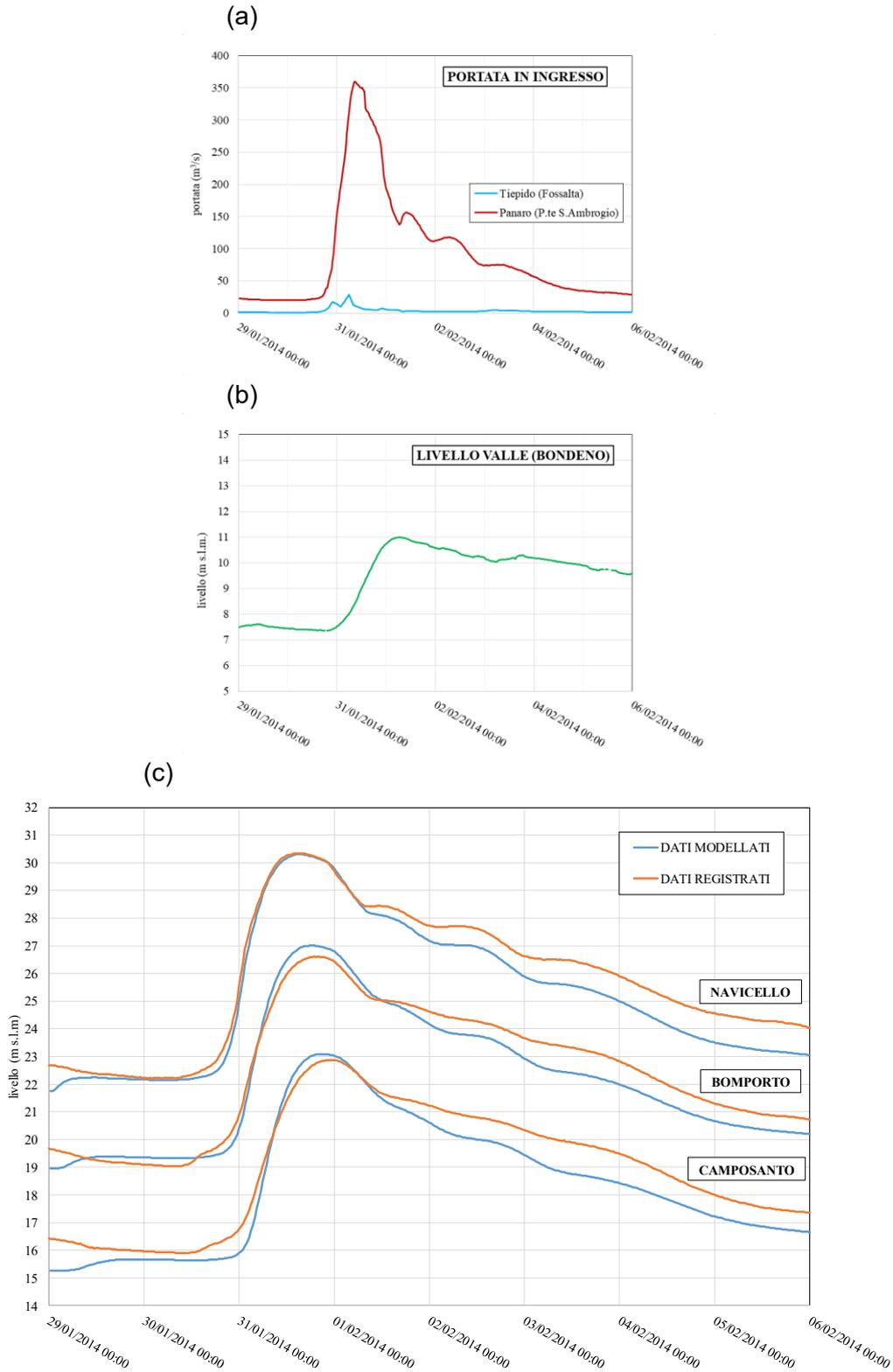


Figura 6-4 - Evento del 29 gennaio-5 febbraio 2014 sul fiume Panaro: (a) condizioni al contorno di monte; (b) condizione al contorno di valle; (c) confronto tra livelli registrati e simulati agli idrometri di Navicello, Bomporto e Camposanto.

Evento 28 febbraio - 1 marzo 2016

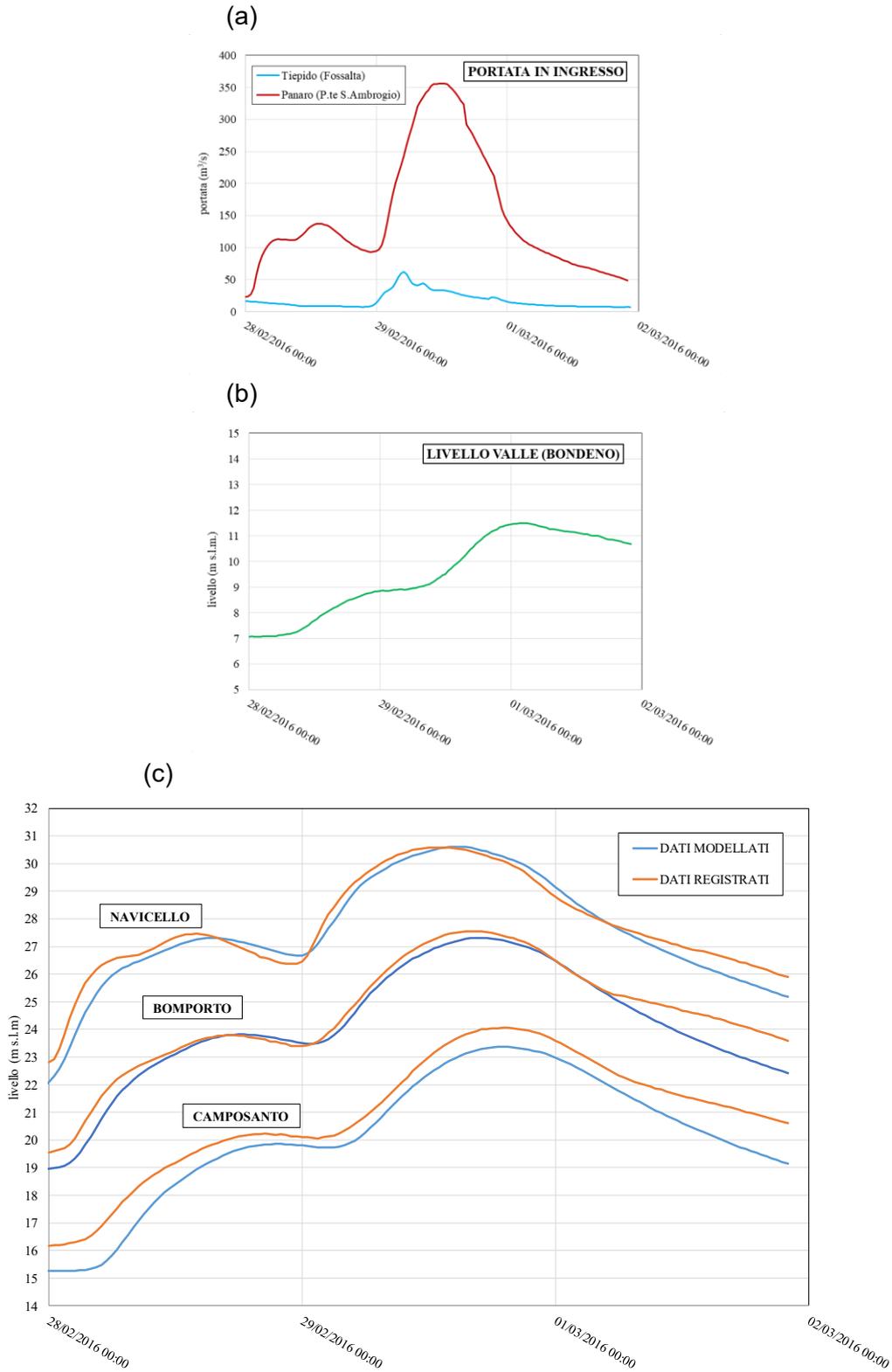


Figura 6-5 - Evento del 28 febbraio – 1 marzo 2016 sul fiume Panaro: (a) condizioni al contorno di monte; (b) condizione al contorno di valle; (c) confronto tra livelli registrati e simulati agli idrometri di Navicello, Bomporto e Camposanto.

6.4. Condizioni al contorno

Per le simulazioni delle brecce sul fiume Panaro, la condizione al contorno di monte è rappresentata dagli idrogrammi di portata in uscita dalla cassa d'espansione con tempo di ritorno pari a 20 e 200 anni (Figura 4-1). Sono stati trascurati i contributi degli affluenti Tiepido e Naviglio.

A valle è stata invece assunta come condizione al contorno una scala di deflusso in corrispondenza della sezione di Camposanto sul fiume Panaro. Poiché non è disponibile alcuna scala "ufficiale" per tale sezione negli Annali Idrologici, la relazione livelli-portate è stata ricostruita sulla base di simulazioni numeriche effettuate lungo l'intera asta del fiume Panaro, fino alla sezione di Bondeno. Dalle simulazioni relative al transito di portate via via crescenti, sono stati estratti i livelli idrici corrispondenti ed è stata costruita per interpolazione la scala di deflusso, rappresentata nella Figura 6-6. La sezione di Camposanto è collocata più di 14 km a valle rispetto all'ultima delle brecce ipotizzate, e pertanto la sua influenza sulla propagazione della piena in alveo è poco significativa.

Per tutto il resto del contorno del dominio (Figura 3-8) è stata assunta una condizione di parete insormontabile. L'unica possibile fuoriuscita del volume esondato dal comparto in destra Panaro è costituita dalla sezione del Canale Collettore delle Acque Alte sul confine del dominio: in tale sezione è stata imposta una scala di deflusso di moto uniforme, allo scopo di consentire il drenaggio dell'eventuale volume esondato che si incanala in quella direzione ed evitare effetti di rigurgito non realistici nel dominio a monte. In ogni caso, il limite del dominio di calcolo è stato definito ad una distanza sufficiente dal confine comunale di Nonantola da evitare che gli effetti delle assunzioni modellistiche sulle condizioni al contorno influiscano sulla dinamica di allagamento nel territorio comunale stesso.

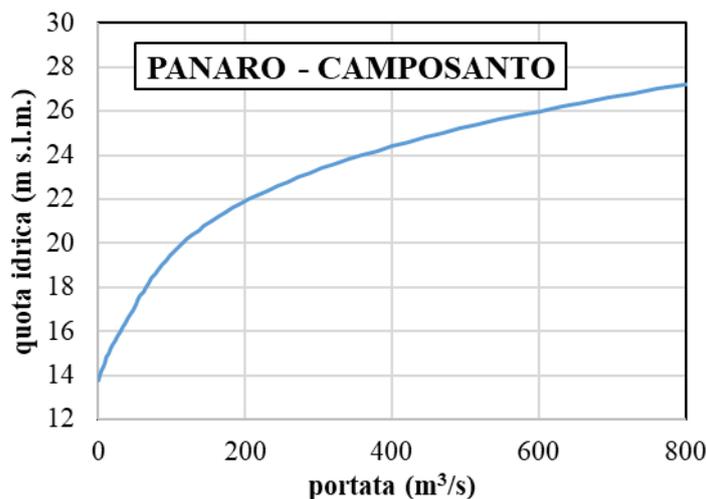


Figura 6-6 – Scala di deflusso assunta come condizione al contorno di valle per le simulazioni delle brecce sul fiume Panaro, nella sezione di Camposanto.

6.5. Brecce

Sono state individuate 5 posizioni in corrispondenza delle quali ipotizzare l'apertura di una breccia. Le brecce sono numerate da 1 a 5 partendo da monte verso valle, e la loro posizione è descritta nella Tabella 6-1 e mostrata nella Figura 6-7. Nella Tabella 6-1 è inoltre riportata un'indicazione del numero dello *Stante* più prossimo al punto ipotizzato per l'innescò della breccia.

Nella scelta delle posizioni di breccia, sono state privilegiate quelle più "critiche", ossia i tratti in esterno curva e quelli in cui l'argine risulta in frodo in occasione di un evento di piena significativo. Si è inoltre tenuto conto della possibile interferenza dei rilevati stradali sulla dinamica di allagamento.

La breccia 1 è ubicata poco a valle dell'attraversamento della linea ferroviaria Milano-Bologna: nonostante essa sia al di fuori del Comune di Nonantola, l'allagamento conseguente a rotte arginali collocate in questo tratto può propagarsi verso valle e interessare il territorio comunale. Brecce eventualmente innescate lungo il tratto di argine ancora più a monte (prima dell'attraversamento della ferrovia) non darebbero probabilmente luogo a significativi allagamenti nel territorio nonantolano, sia in virtù della presenza del rilevato ferroviario, che costituisce un ostacolo alla propagazione dell'allagamento, sia in virtù della limitata altezza delle arginature sul piano campagna nel tratto di monte (anche i volumi esondati sarebbero piuttosto ridotti).

Le brecce successive sono invece tutte ubicate lungo il tratto di arginatura del Panaro che delimita a Ovest il territorio nonantolano. Le Brecce 2, 3 e 4 sono piuttosto ravvicinate: la distanza tra brecce successive è inferiore a 2 km. La simulazione di scenari di allagamento dovuti a brecce in queste posizioni ha lo scopo di analizzare il possibile coinvolgimento del centro abitato principale del Comune, tenendo conto anche della possibile interferenza della SP255 e della sua variante (tangenziale).

Infine, la breccia 5 è stata ipotizzata nel tratto rettilineo del fiume Panaro a monte di Bomporto, al fine di indagare il possibile allagamento della zona Nord del territorio comunale. Sono state trascurate brecce più vallive, in quanto le esondazioni non potrebbero colpire alcuna zona ricompresa nel Comune di Nonantola in virtù della morfologia del terreno.

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 cautelativamente pari a 100 m. Studi pregressi hanno infatti mostrato come, per un alveo delle dimensioni di quelli del fiume Panaro, rotte di ampiezza superiore ai 100 m non diano luogo ad apprezzabili incrementi di portata uscente dalla breccia. Non è stato possibile reperire informazioni sulla dimensione massima delle brecce storiche verificatesi sul Panaro. Tuttavia, nel recente evento del gennaio 2014 sul fiume Secchia, la breccia ha raggiunto una larghezza finale di circa 90 m [5].

L'evoluzione temporale della breccia, definita come il tempo necessario al raggiungimento della larghezza finale, è stata assunta pari a 6 ore per lo scenario idrologico meno gravoso (20 anni) e pari a 3 ore per quello più gravoso (200 anni), in analogia con le ipotesi effettuate in precedenti studi del DIA [7].

Tabella 6-1 – Descrizione della posizione delle breccie ipotizzate in destra Panaro, con indicazione dello stante più vicino.

| Breccia | Stante più vicino | Descrizione |
|---------|-------------------|--|
| 1 | 20 | A valle dell'attraversamento della ferrovia MI-BO |
| 2 | 38 | A monte dell'attraversamento della SP255 |
| 3 | 50 | A Ovest del centro abitato di Nonantola (Strada Lazzari) |
| 4 | 58 | Di fronte a località La Bertolda |
| 5 | 72 | Tra Via Pioppi e Via Rugginenta |

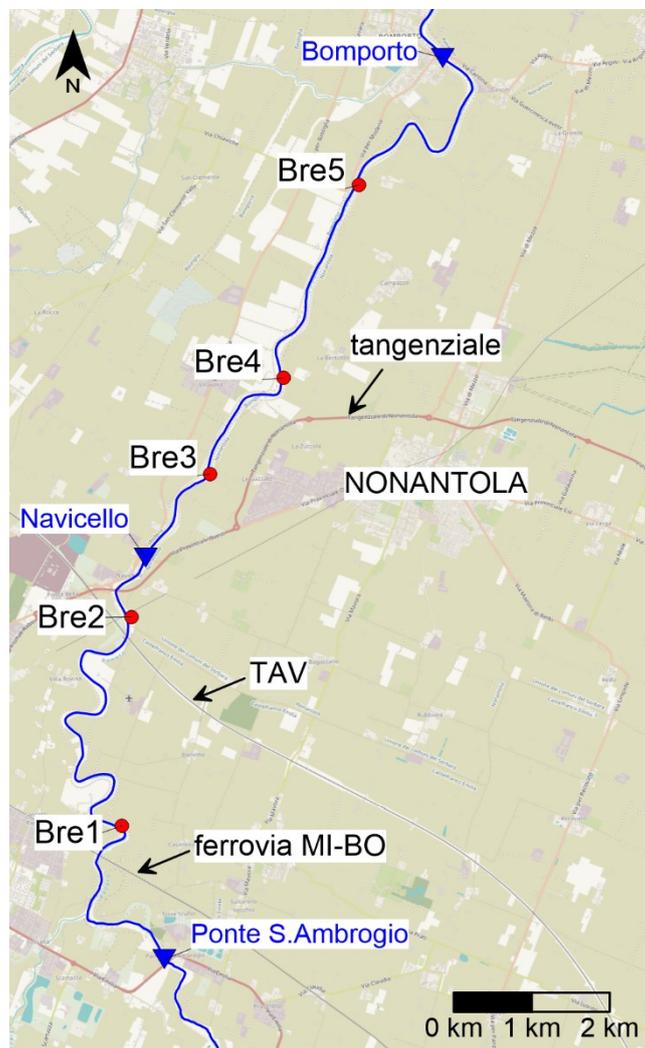


Figura 6-7 - Posizione delle 5 breccie ipotizzate in destra Panaro. Sono inoltre indicati gli idrometri (in blu) e alcune infrastrutture significative.

7. SIMULAZIONI E RISULTATI

7.1. Simulazioni preliminari senza brecce

Al fine di valutare le portate, i livelli e i tempi di propagazione in alveo delle due onde di piena con tempo di ritorno di 20 e 200 anni (nel seguito abbreviati in TR 20 e TR 200), sono state effettuate due simulazioni preliminari in assenza di brecce.

Le condizioni iniziali usate per ciascuna delle due simulazioni in moto vario sono state desunte da simulazioni di base in cui è stato imposto a monte un valore di portata costante e pari al valore iniziale di ciascuno dei due idrogrammi di piena (approssimativamente 96 e 130 m³s⁻¹ per TR 20 e TR 200 rispettivamente). Le altre principali assunzioni del modello sulle condizioni al contorno e sulla scabrezza sono già state esposte al paragrafo 6.

La Figura 7-1 riporta le mappe degli inviluppi delle massime quote idriche per i due tempi di ritorno. L'onda di piena con TR 200 determina sormonti in diversi punti, in particolare su entrambe le sponde nel tratto tra Bomporto e Camposanto, ma anche in destra idraulica in corrispondenza della breccia 3 e poco a monte della breccia 4 (la posizione delle brecce è riportata nella Figura 7-1). Per l'evento meno gravoso (TR 20), il franco arginale risulta ovunque maggiore o uguale a 1 m. I valori dei franchi in destra idraulica in corrispondenza della posizione delle brecce sono riportati nella Tabella 7-1 per entrambi i tempi di ritorno.

Queste simulazioni preliminari hanno anche lo scopo di identificare l'istante di innesco di ciascuna delle brecce previste. Si è assunto che l'inizio dell'apertura di una generica breccia avvenisse nell'istante in cui il colmo transita in corrispondenza della sezione della breccia stessa, oppure nell'istante dell'eventuale sormonto dell'arginatura. La Tabella 7-1 riporta, per entrambi i tempi di ritorno, l'istante di apertura assunto per ciascuna breccia. Per lo scenario TR 200, l'innesco avviene nell'istante di sormonto per la breccia 3 (franco negativo), ma anche per la breccia 4: nonostante la tracimazione avvenga poco a monte della posizione scelta, l'istante di apertura della breccia è stato assunto in corrispondenza di tale sormonto.

Tabella 7-1 – Istante di apertura della breccia sul fiume Panaro e corrispondente franco arginale destro. L'asterisco indica un istante corrispondente al sormonto.

| Breccia | TR 20 anni | | TR 200 anni | |
|---------|-------------|------------|-------------|------------|
| | Istante (h) | Franco (m) | Istante (h) | Franco (m) |
| 1 | 93 | 1.50 | 95 | 0.61 |
| 2 | 94.5 | 1.35 | 95.5 | 0.33 |
| 3 | 95 | 1.02 | 94.5* | <0 |
| 4 | 95.5 | 1.15 | 94.5* | 0.10 |
| 5 | 96.5 | 1.52 | 96 | 0.53 |

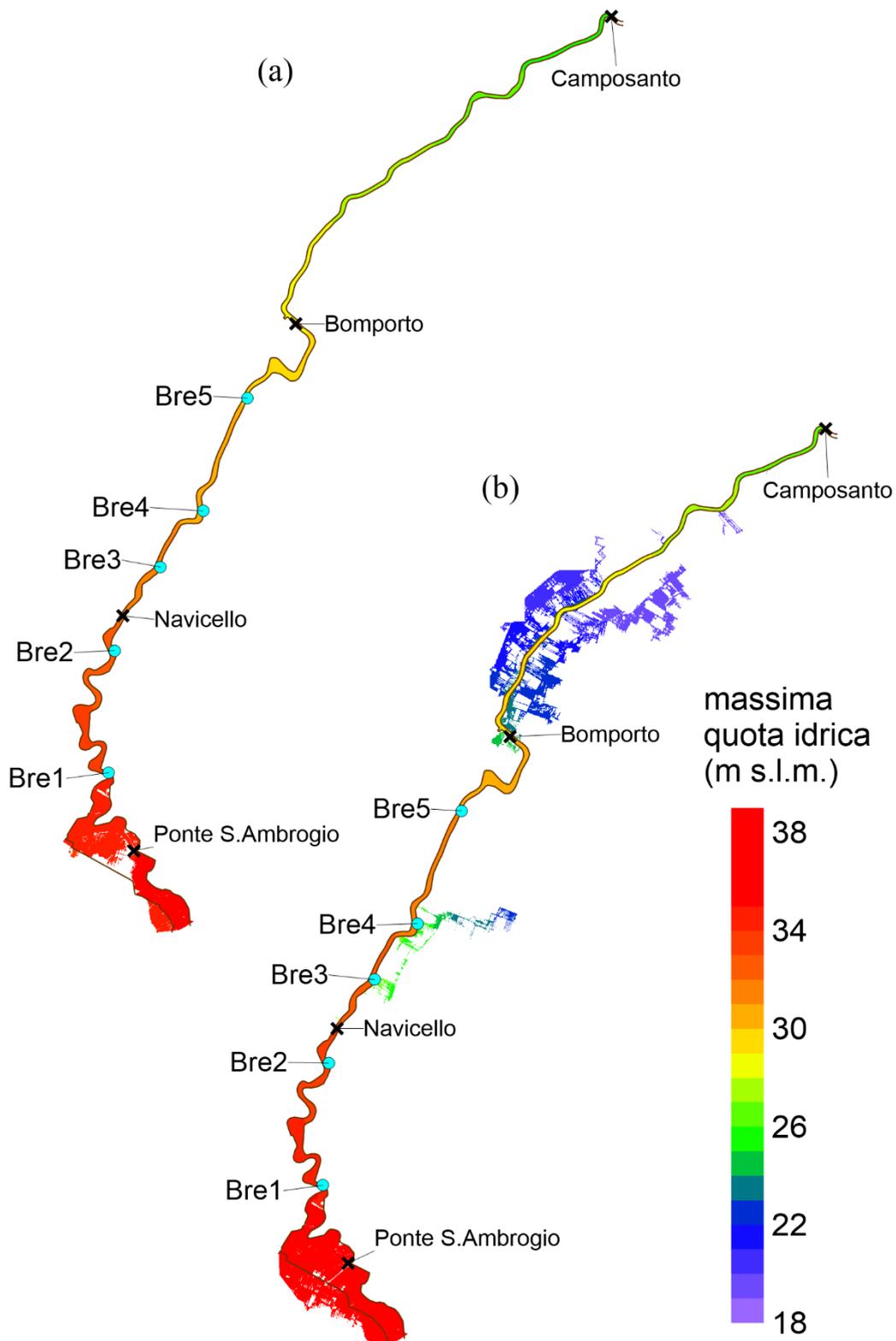


Figura 7-1– Involuppi delle massime quote idriche per le simulazioni delle onde con TR 20 (a) e TR 200 (b) sul fiume Panaro, in assenza di brecce. Nell'immagine è indicata anche la posizione delle brecce e di alcune sezioni significative.

7.2. Simulazioni degli allagamenti conseguenti alle breccie

Per ciascuna simulazione, fissata la posizione della breccia e il tempo di ritorno, la condizione iniziale è rappresentata dalle mappe della profondità idrica e della velocità nell'istante corrispondente all'apertura della breccia, indicato nella Tabella 7-1. Le altre assunzioni del modello sono quelle già esposte al paragrafo 6. 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 semi-oraria. In realtà, l'analisi dei risultati ha mostrato che, per quanto riguarda il territorio del Comune di Nonantola, il fenomeno si esaurisce sostanzialmente nelle prime 48 ore dall'innescò della breccia.

Va sottolineato che nella simulazione 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 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).

Si è comunque ipotizzato che, in corrispondenza del nodo idraulico del Torrazzuolo al confine del territorio comunale, il deflusso verso valle delle acque incanalatesi nel reticolo di bonifica nonantolano verso il collettore Zena (e successivamente il Canale collettore delle Acque Alte) fosse consentito. Tale configurazione non è la più conservativa ai fini della valutazione della pericolosità idraulica, poiché permette il drenaggio di una piccola parte del volume esondato al di fuori del territorio comunale; tuttavia, può essere ritenuta del tutto plausibile nell'ipotesi di un'alluvione che si verifica durante la stagione invernale.

Le simulazioni complessivamente effettuate sono 10, relative alle 5 posizioni di breccia individuate ed ai due diversi scenari idrologici. Nel seguito, si indicheranno le diverse simulazioni come “**Breccia N TR X**” dove *N* verrà sostituito dal numero della breccia e *X* dal tempo di ritorno dello scenario idrologico considerato.

7.2.1. Prodotti restituiti per ciascuna simulazione

Per ciascuna delle 10 simulazioni, sono stati restituiti i seguenti prodotti (in formato digitale):

- a) Animazione dell'evoluzione temporale dell'allagamento, in cui vengono rappresentate con scansione semi-oraria le profondità idriche raggiunte sul territorio (il file allegato ha nome generico *Filmato_BrecciaN_TRX.mp4*);
- b) Mappa della massima profondità idrica, espressa in m (il file allegato ha nome generico *Mappa_MAXTIRANTE_BrecciaN_TRX_Panaro.tif*);
- c) Mappa della massima velocità idrica in modulo, espressa in m/s (il file allegato ha nome generico *Mappa_MAXVEL_BrecciaN_TRX_Panaro.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 7.2.5 (il file allegato ha nome generico *Mappa_MAXPROFTOT_BrecciaN_TRX_Panaro.tif*);
- e) Mappa dei tempi di arrivo dell'allagamento, espressi in ore (il file allegato ha nome generico: *Mappa_TEMPOARR_BrecciaN_TRX_Panaro.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 totale 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. Nei GeoTiff sono inclusi solo i valori relativi al territorio del Comune di Nonantola.

Le mappe delle massime profondità idriche sono inoltre rappresentate in scala 1:25 000 nelle Tavole fuori testo fornite in allegato.

7.2.2. Rappresentazione dei risultati delle simulazioni

Oltre alle mappe e ai filmati forniti in formato digitale (il cui elenco è riportato nell'APPENDICE E), i principali risultati sono rappresentati anche nella presente relazione in formato grafico.

La dinamica di allagamento è mostrata nell'APPENDICE A, per ciascuno degli scenari, in termini di tiranti idrici raggiunti 6, 12, 24 e 48 ore dall'innescò della breccia. Per un'analisi più dettagliata si faccia riferimento ai filmati.

Inoltre, la rappresentazione a curve di livello delle mappe b-c-d-e è riportata nella presente relazione come segue:

- dalla Figura 7-2 alla Figura 7-6 sono rappresentate le mappe delle massime profondità idriche per i diversi scenari simulati.
- le rappresentazioni delle mappe delle massime velocità, massime profondità totali e tempi di arrivo sono invece riportate rispettivamente nell'APPENDICE B, nell'APPENDICE C e nell'APPENDICE D.

In tutte le rappresentazioni grafiche delle mappe, 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 2.5 m, se presenti (specialmente lungo il Panaro), 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 1.5 m/s.

Le mappe delle massime profondità idriche permettono anche di visualizzare in modo immediato l'area allagata a seguito di ciascuna breccia. I dati quantitativi sulle aree allagate e sui volumi esondati per i diversi scenari simulati sono riportati e discussi nel paragrafo 7.2.6.

Infine, una valutazione globale sulla pericolosità idraulica nel territorio comunale è presentata nelle Conclusioni.

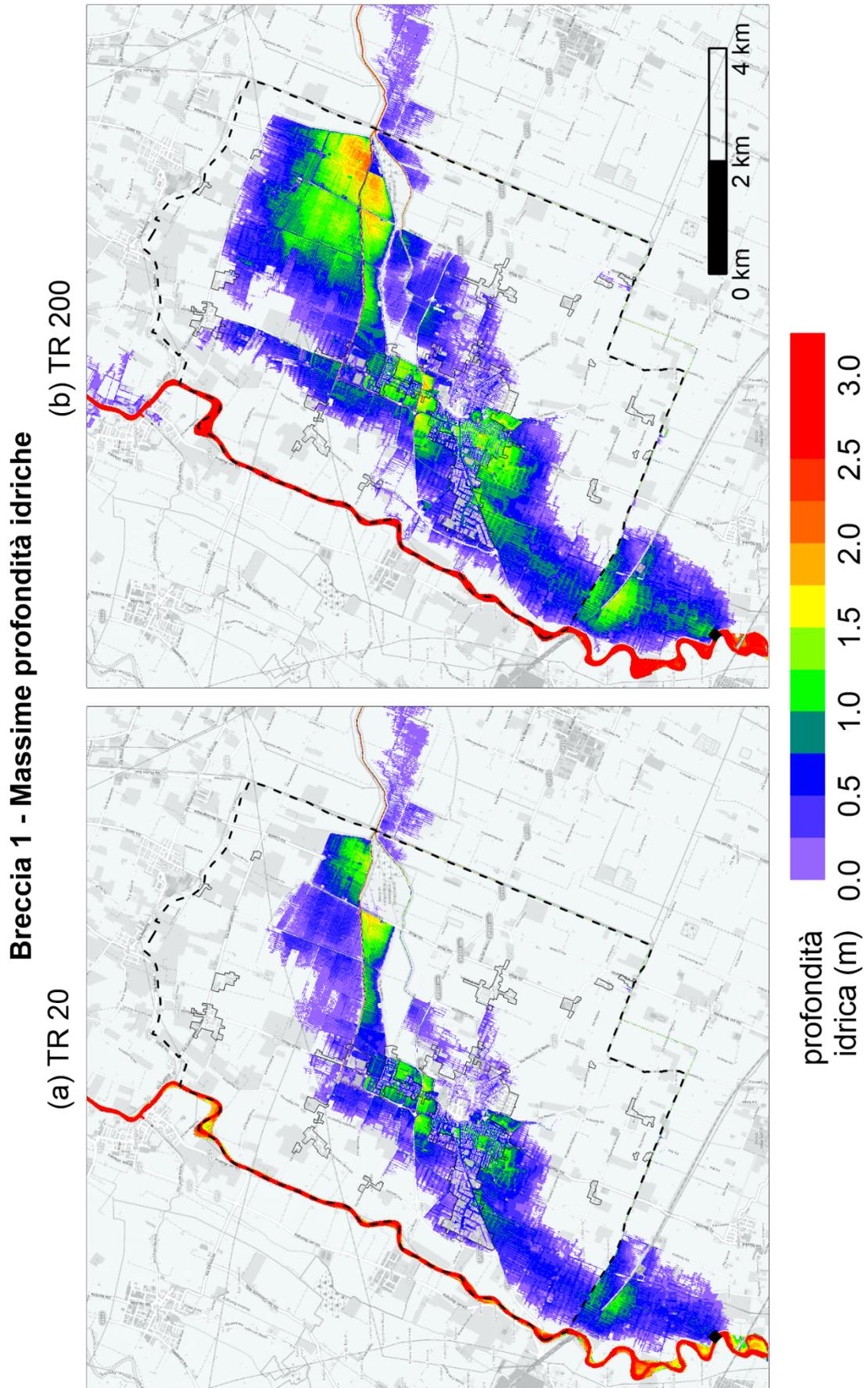


Figura 7-2 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 1.

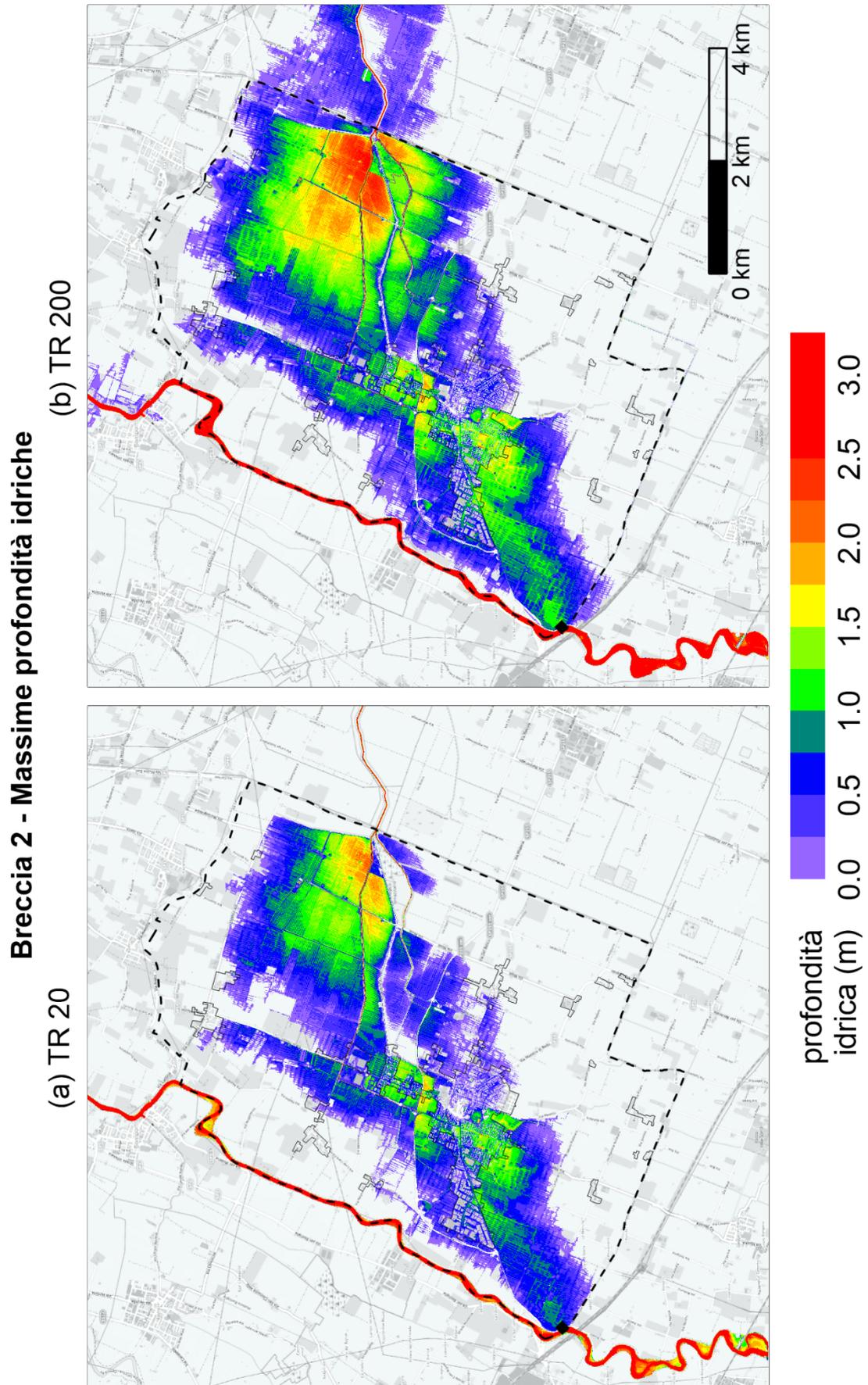


Figura 7-3 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 2.

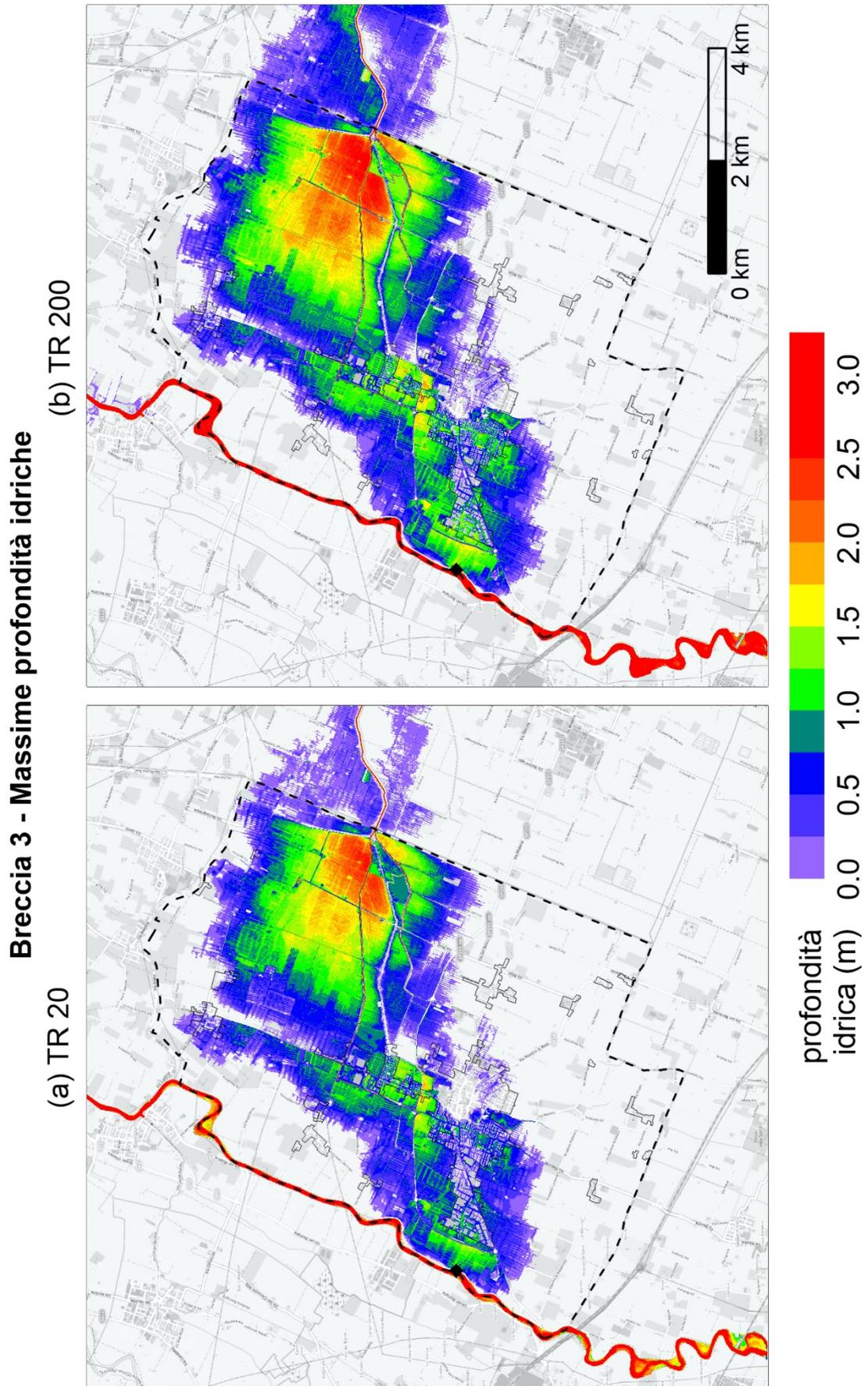


Figura 7-4 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 3.

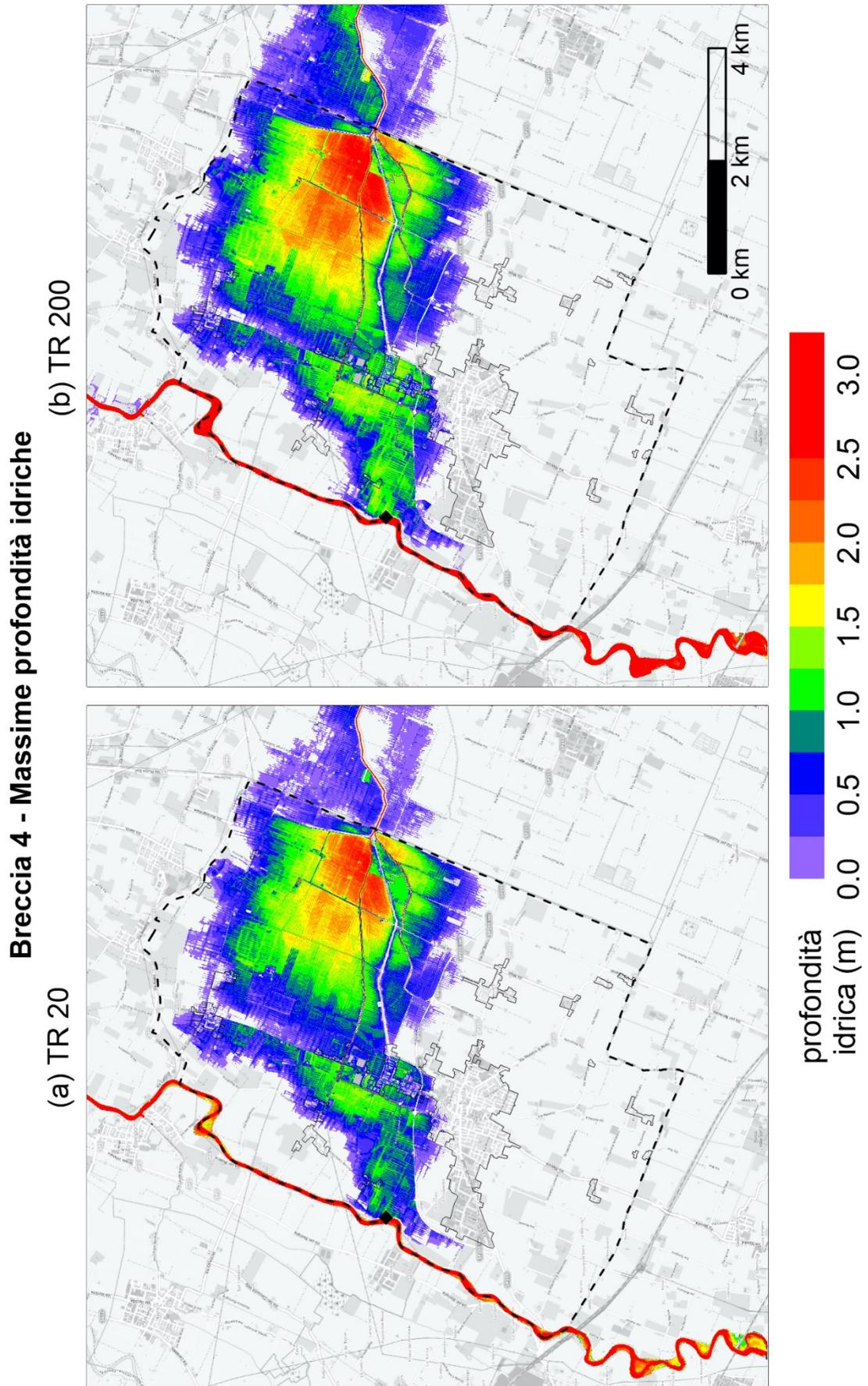


Figura 7-5 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 4.

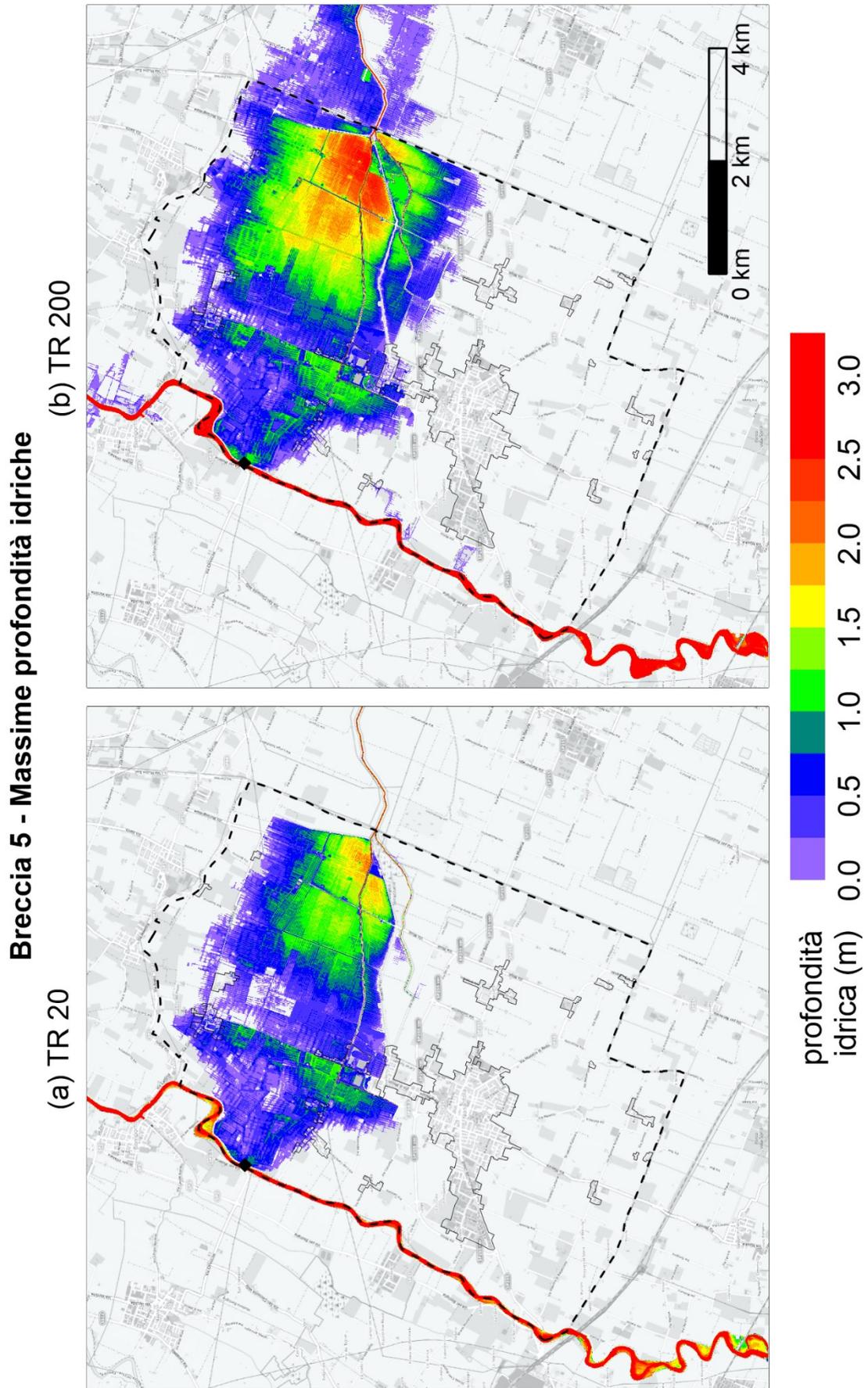


Figura 7-6 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 5.

7.2.3. Descrizione generale della dinamica di allagamento

Nel presente paragrafo è brevemente descritta la dinamica di allagamento per ciascuna delle brecce considerate.

I risultati delle simulazioni relative alla Breccia 1 (per entrambi i tempi di ritorno) mostrano che il fronte di allagamento si propaga in direzione Nord ed è in parte ostacolato dal rilevato della TAV. Tuttavia, il rilevato si interrompe circa 800 m a Est dell'argine destro del fiume Panaro e la linea ferroviaria prosegue in viadotto, consentendo all'allagamento di sottopassarla, proseguire verso Nord e invadere il territorio del Comune di Nonantola (Figura A-1 e Figura A-2). Successivamente, il fronte devia verso Nord-Est e si incanala verso il centro abitato di Nonantola. Il tratto extra-urbano della SP255 contribuisce a proteggere l'area compresa tra la strada stessa e il Panaro, soprattutto per lo scenario TR 20; il tratto urbano della medesima strada provinciale è invece oltrepassato dall'allagamento, che invade il quartiere industriale a Sud della tangenziale (Figura 7-7). L'alluvione colpisce anche la zona Ovest del centro urbano di Nonantola, in sinistra idraulica del canale Torbido, il quale contribuisce a proteggere l'area Est del paese, in particolare per lo scenario TR 20. L'unico punto "critico" che si individua lungo il canale stesso si trova in corrispondenza dei due accessi al parcheggio di via Fosse Ardeatine (Figura 7-7c): infatti, la pista ciclabile costruita al di sopra del tratto tombato del canale si abbassa localmente di circa 50 cm. Per lo scenario TR 200, invece, un lungo tratto della pista ciclabile viene sormontato dall'acqua (Figura 7-7d), anche se i tiranti idrici nella parte Est del centro abitato sono piuttosto contenuti. L'allagamento si addossa a Nord alla tangenziale, che viene sormontata in alcuni punti (specialmente intorno alla Rotatoria "Signora", in modo più marcato per lo scenario TR 200); inoltre, i sottopassi presenti in quel tratto contribuiscono al deflusso verso valle delle acque esondate (Figura 7-7e-f). Risulta quindi allagata anche la parte Nord del centro abitato di Nonantola. La dinamica è poi fortemente influenzata dal reticolo idrografico minore: l'acqua si incanala tra gli argini del canale Torbido e del collettore Bosca, che viene poi sormontato, con conseguente allagamento del territorio a Nord, compreso tra l'argine sinistro del collettore stesso e l'argine sinistro del canale Torbido a valle dell'attraversamento (Figura 7-2). Per lo scenario TR 200, caratterizzato da un volume esondato maggiore rispetto al caso TR 20, si osservano allagamenti più estesi nella zona Nord (Figura 7-2b); in particolare, il fronte si propaga verso Nord, mantenendosi a sinistra del rilevato della SP14, quasi fino alla frazione La Grande, mentre un'altra diramazione del fronte di allagamento supera il collettore Bosca all'altezza della frazione di Case Ponte Fossa e invade tutta l'area delimitata a Sud del collettore stesso, a Est del canale Torbido e a Nord da Via Guercinesca Est. Nella parte conclusiva della simulazione (oltre le 24-36 ore), l'acqua che si incanala lungo il reticolo idrografico minore fuoriesce in alcuni punti dalle arginature dei canali stessi, specialmente per lo scenario più gravoso (Figura A-2); risultano ad esempio interessate alcune aree in destra idraulica del canale Torbido e del collettore Sorgo. In generale, il fenomeno si sviluppa principalmente nelle prime 24 ore dall'innescio della breccia (Figura D-21), con il centro abitato di Nonantola colpito già dopo 6-8 ore. Le massime profondità si riscontrano nelle aree a ridosso dei principali rilevati (argini del canale Torbido, tangenziale, TAV), anche se per questa posizione di breccia non vengono quasi mai superati 2 m di tirante, salvo nei sottopassi (Figura 7-7e-f) e in alcune aree a Nord dove l'acqua si accumula per lo scenario TR 200 (Figura 7-2b).

Eventuali brecce posizionate a valle della Breccia 1 e a monte dell'attraversamento della TAV darebbero origine ad una dinamica molto simile, fatto salvo il tempo di arrivo dell'allagamento, che probabilmente risulterebbe leggermente anticipato rispetto a quello ottenuto per la Breccia 1.

Breccia 1 - Massime profondità idriche: Dettagli Nonantola

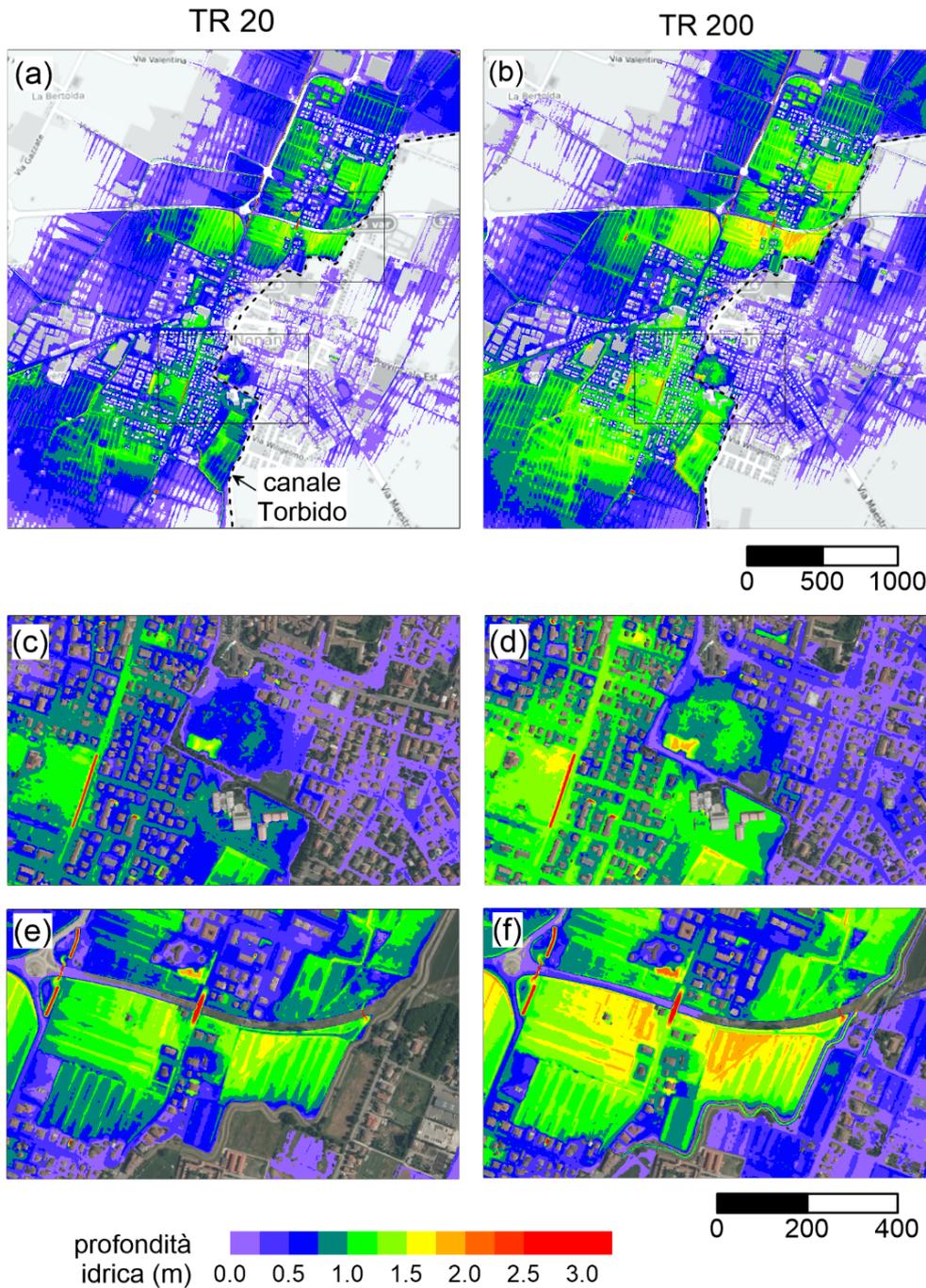


Figura 7-7 – Mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 1 nel centro abitato di Nonantola: (a) TR 20 e (b) TR 200; dettaglio del tratto tombato del canale Torbido per (c) TR 20 e (d) TR 200; dettaglio di alcuni sottopassi della tangenziale a Nord del paese per (e) TR 20 e (f) TR 200. Le due aree di cui si riporta il dettaglio sono identificate con rettangoli in (a-b).

La Breccia 2 è posizionata immediatamente a valle dell'attraversamento della TAV: l'esondazione invade nel giro di poche ore (3-6 ore) il centro abitato di Nonantola (Figura D-22). Il tratto extra-urbano della SP255 non è in grado di trattenere completamente l'allagamento, per cui si allaga anche l'area a Ovest della tangenziale fino alla frazione La Bertolda (Figura A-4), a differenza del caso della Breccia 1. Inoltre, la pista ciclabile in rilevato costruita sul canale Torbido e gli argini del canale stesso nella parte Nord del centro abitato non sono in grado di trattenere del tutto l'acqua esondata, per cui l'allagamento si estende anche nella parte Est dell'abitato (Figura 7-8). Nella zona Nord del territorio comunale, invece, la dinamica è simile a quella dello scenario della Breccia 1, con accumulo progressivo di acqua in sinistra del canale Torbido (Figura A-3 e Figura A-4). Vengono raggiunte le frazioni La Grande, La Grande del Bosco e Bellincina e in parte superata la Via Guercinesca Est. Per lo scenario TR 200, il volume esondato è tale da determinare, nella parte finale della simulazione (oltre 24 ore dopo l'innesco della breccia, Figura D-22), la tracimazione degli argini del canale Torbido e il conseguente allagamento di un'area più estesa, con una fuoriuscita dal territorio comunale verso Est, al confine con il Comune di Crevalcore (Figura A-4). Le massime profondità idriche che si riscontrano sul territorio sono più elevate rispetto al caso della Breccia 1, in particolare viene superato 1 m di altezza idrica in ampie zone della parte Ovest del centro abitato di Nonantola anche per lo scenario TR 20 (Figura 7-3); inoltre, sono ancora più elevati i massimi tiranti idrici nella zona di accumulo a Nord (quasi 3 m per lo Scenario TR 200).

Breccia 2 - Massime profondità idriche: Dettagli Torbido

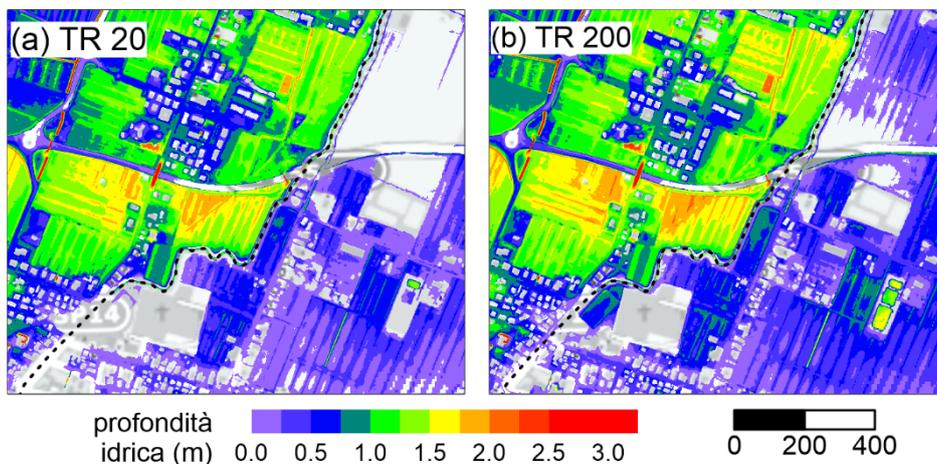


Figura 7-8 – Dettaglio della mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 2 nell'area di sormonto del canale Torbido (linea nera tratteggiata) a Nord di Nonantola: (a) TR 20 e (b) TR 200.

La Breccia 3 è collocata proprio di fronte al tratto iniziale della tangenziale, il cui rilevato funge da ostacolo alla propagazione della corrente, con conseguente innalzamento dei livelli idrici a tergo dello stesso (Figura 7-9). L'elevazione del rilevato non è tuttavia sufficiente a proteggere il centro abitato di Nonantola, che infatti risulta allagato nella parte Ovest (Figura A-5 e Figura A-6): la pista ciclabile sul canale Torbido anche in questo caso contribuisce a proteggere la zona Est, in cui si riscontrano tiranti idrici piuttosto modesti (Figura 7-4). Nella zona Nord del territorio comunale, la dinamica è simile a quella della breccia precedente. Il notevole volume esondato, tuttavia, determina

un accumulo di acqua in destra Torbido, i cui argini risultano sormontati anche per lo scenario TR 20 (Figura A-5). L'allagamento si propaga poi verso Est nel Comune di Crevalcore. Le massime profondità idriche si riscontrano proprio nella zona di accumulo a Nord (2-3 m), ma si osservano tiranti elevati anche in ampie aree del centro abitato di Nonantola (Figura 7-4). Il territorio comunale viene allagato entro le prime 18 ore dall'apertura della breccia (Figura D-23).

Breccia 3 - Massime profondità idriche: Dettagli tangenziale

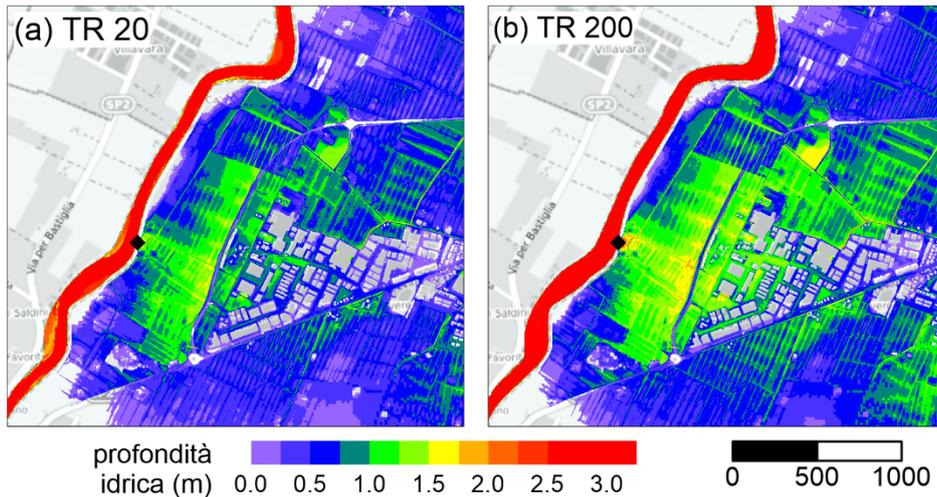


Figura 7-9 – Dettaglio della mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 3 nell'area della breccia e della tangenziale Ovest: (a) TR 20 e (b) TR 200.

La Breccia 4 è ubicata di fronte alla frazione La Bertolda, che infatti viene quasi immediatamente investita dall'allagamento. A Sud le acque sono in parte trattenute dalla tangenziale, che viene sormontata solo in alcuni tratti (Figura A-7 e Figura A-8): a Sud della stessa le aree urbane allagate sono limitate (zona Via San Lorenzo-Via Pirandello, zona Via di Mezzo). Anche la diramazione della tangenziale tra la Rotatoria Signora e la frazione Case Ponte Fossa ostacola in parte la propagazione dell'allagamento, che però si arresta solo contro gli argini del canale Torbido. Nella zona Nord del territorio comunale la dinamica è simile a quella della breccia precedente, così come sono simili in quest'area le massime profondità idriche (Figura 7-5). Per lo scenario TR 200, il territorio comunale interessato viene allagato entro le prime 12 ore (Figura D-24).

I risultati delle simulazioni relative alle breccie 2, 3 e 4, distanziate tra loro meno di 2 km, complessivamente forniscono una valutazione piuttosto dettagliata dei possibili scenari di allagamento che possono coinvolgere il centro abitato di Nonantola da Sud e Ovest, anche tenendo conto delle infrastrutture in rilevato che influenzano la dinamica di propagazione.

Analizzando invece i risultati delle simulazioni della Breccia 5, è possibile valutare un potenziale scenario di allagamento nella parte Nord del territorio comunale, che è prevalentemente adibita ad uso agricolo. Le uniche frazioni allagate sono La Grande, La Grande del Bosco, Bellincina, Campazzo, La Selvatica, Case Ponte Fossa e la propaggine Nord del centro abitato di Nonantola, solo per lo scenario TR 200 (Figura A-9 e Figura A-10). Per lo scenario TR 20, l'intero volume esondato è contenuto in destra del canale Torbido, mentre per lo scenario più gravoso gli argini del canale stesso

vengono sormontati circa 18 ore dopo l'apertura della breccia (Figura D-25) e l'area allagata è più ampia e coinvolge anche i comuni limitrofi (Crevalcore). Le massime profondità idriche si riscontrano a ridosso del canale Torbido (Figura 7-6). Da notare che il rilevato della SP14 rallenta in parte la propagazione dell'allagamento.

Brecce che si aprono in posizioni diverse dalla 5 nel medesimo tratto darebbero luogo a dinamiche di allagamento simili, con differenze legate principalmente alle aree interessate nella zona a ridosso dell'argine del Panaro.

Infine, occorre rilevare che esistono, per quasi tutte le posizioni di breccia, alcune aree che risultano allagate nella parte finale della simulazione, a seguito di fuoriuscita del volume esondato che si incanala lungo alcuni corsi d'acqua del reticolo idrografico minore. In particolare, nel territorio comunale si osservano esondazioni lungo il collettore Sorgo, che in alcuni casi si riempie per rigurgito dal nodo idraulico del Torrazzuolo. Un esempio è riportato nella Figura 7-10 per la Breccia 5: per lo scenario TR 20 il rigurgito lungo il Sorgo non è tale da generare tracimazioni, mentre per lo scenario TR 200 si osservano diffusi allagamenti sia in destra sia in sinistra idraulica. Le aree coinvolte sono prevalentemente ad uso agricolo; i tiranti massimi superano 1.5 m per alcune simulazioni, a causa dell'accumulo tra gli argini del canale Torbido, del collettore Sorgo e della Muzza Abbandonata. Vale tuttavia la pena di notare che la descrizione del moto all'interno del reticolo idrografico minore potrebbe non essere del tutto adeguata: per prima cosa, il DTM di partenza probabilmente non rappresenta correttamente il fondo dei canali a causa della presenza di acqua durante il rilievo LiDAR e quindi la loro capacità di convogliare la portata verso valle è sottostimata; inoltre, non si è considerato che gli argini sormontati potrebbero erodersi e modificare la dinamica di propagazione dell'allagamento, così come potrebbero essere realizzati in corso di evento tagli artificiali nei canali, per indirizzare le acque esondate o preservare determinate aree; infine, sono qui trascurate tutte le possibili manovre su paratoie, idrovore, ecc., che potrebbero influenzare il drenaggio del volume esondato in corso di evento.

Breccia 5 - Massime profondità idriche: Dettagli Torrazzuolo

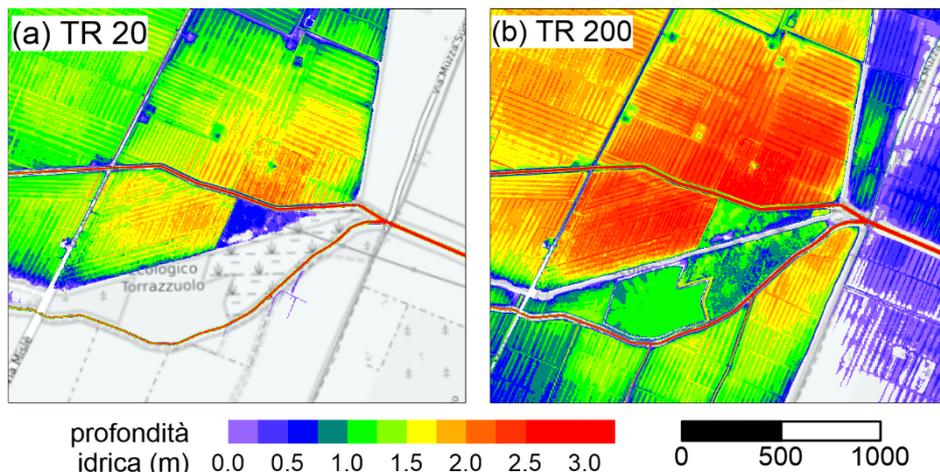


Figura 7-10 – Dettaglio della mappa della massima profondità idrica (in m) per la Breccia 5 nell'area del nodo idraulico del Torrazzuolo: (a) TR 20 e (b) TR 200.

7.2.4. 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 0.6 m/s, ad eccezione di alcuni punti localizzati (si vedano le immagini nell'APPENDICE B). 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 superiori a 1 m/s. Anche nei centri abitati si possono individuare alcune strade con velocità elevate: la Figura 7-11 mostra il dettaglio della zona urbana di Nonantola per due diversi scenari, con uno "zoom" sulle strade invase dalla corrente (Figura 7-11c) con velocità massime dell'ordine di 1-1.5 m/s. Inoltre, nella Figura 7-11d è possibile notare velocità elevate sia all'interno di un sottopassaggio stradale, sia a valle dei rilevati stradali tracimati (zona Rotatoria Signora). Infine, un altro punto "critico" è rappresentato, per la Breccia 1, dal restringimento della corrente che transita al di sotto del viadotto della TAV (Figura B-11).

Massime velocità idriche: Dettagli Nonantola

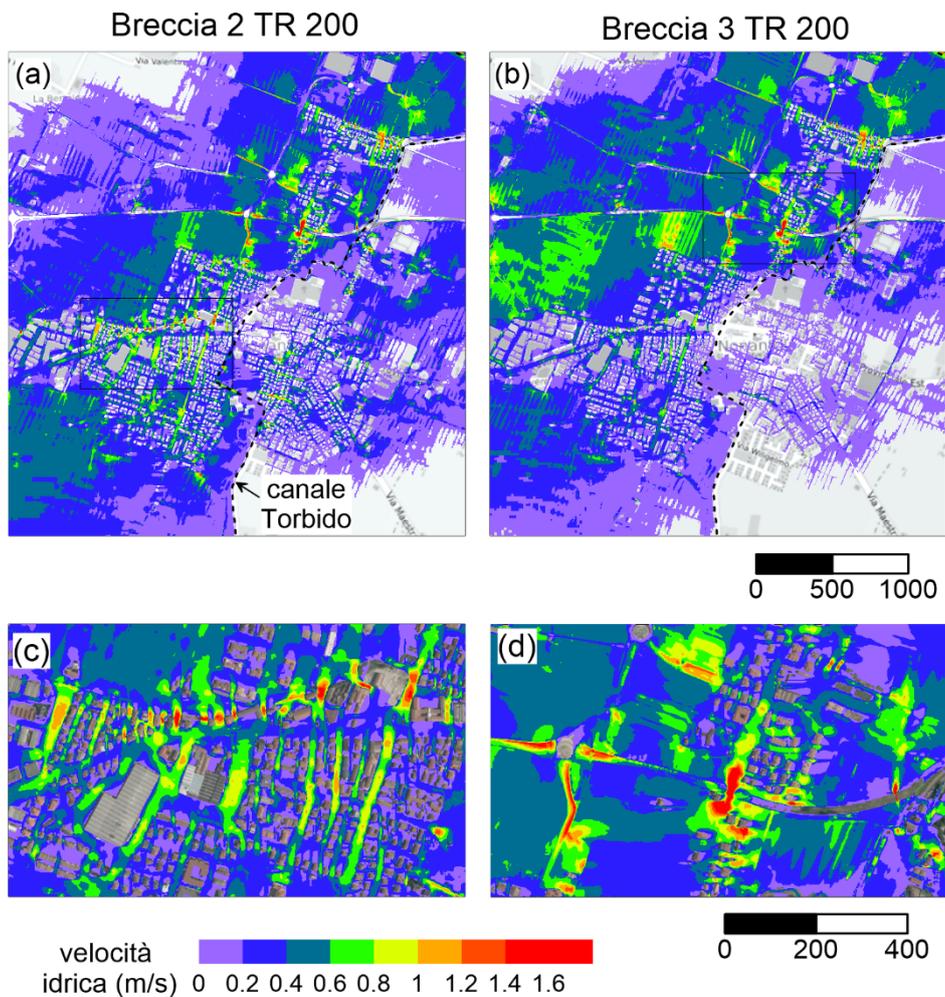


Figura 7-11 – Mappa della massima velocità idrica (in m/s) nel centro abitato di Nonantola: (a) Breccia 2 TR 200 e (b) Breccia 3 TR 200; (c) dettaglio nella zona urbana per Breccia 2 TR 20; (d) dettaglio di un tratto della tangenziale a Nord dell'abitato per Breccia 3 TR 200. Le due aree di cui si riporta il dettaglio sono identificate con rettangoli in (a-b).

7.2.5. 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 7-12 rappresenta i campi di pericolosità idraulica, suddivisa in bassa ($H \leq 0.5$ m), media ($0.5 \leq H \leq 1.0$ m), alta ($1.0 \leq H \leq 1.5$ m), e altissima ($H \geq 1.5$ m) nel piano v - h .

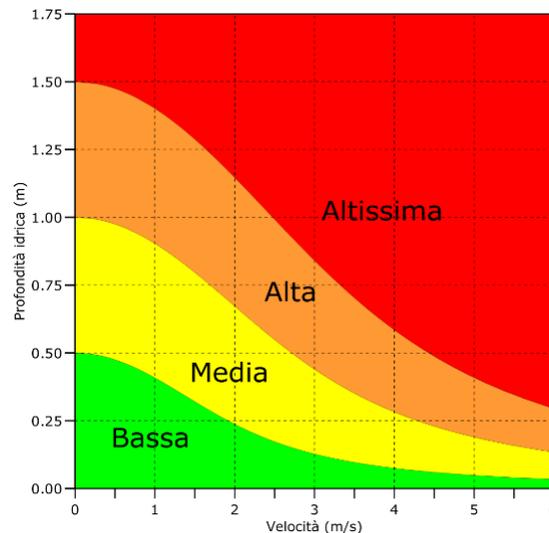


Figura 7-12 – Piano v - h con campi di pericolosità idraulica.

Le mappe che rappresentano le massime profondità totali sono riportate nell'APPENDICE C. Un'area immediatamente identificabile come zona ad altissima pericolosità per tutti gli scenari è quella delimitata dagli argini del collettore Bosca e del canale Torbido, nella parte Nord del territorio comunale, dove le profondità idriche risultano particolarmente elevate per effetto dell'accumulo del volume esondato. La zona coinvolta è però essenzialmente agricola, per cui il rischio (prodotto della pericolosità per gli elementi esposti e per la loro vulnerabilità) risulterebbe piuttosto basso. Invece, va posta attenzione al centro abitato di Nonantola. A titolo di esempio, nella Figura 7-13 è riportato un dettaglio della mappa della massima profondità totale nel centro abitato per la Breccia 2. È possibile individuare aree a pericolosità alta e altissima nella parte Ovest del centro abitato, in sinistra idraulica del canale Torbido, mentre in destra la pericolosità è classificata come bassa (profondità totale inferiore a 0.5 m) quasi ovunque. Nell'area urbana si riscontrano pericolosità altissime in alcune strade, per effetto anche delle

elevate velocità. Inoltre, un'area particolarmente critica è a quella a Sud della tangenziale, dove l'acqua esondata si accumula per effetto della presenza del rilevato.

Breccia 2 - Massime profondità totali: Dettagli Nonantola

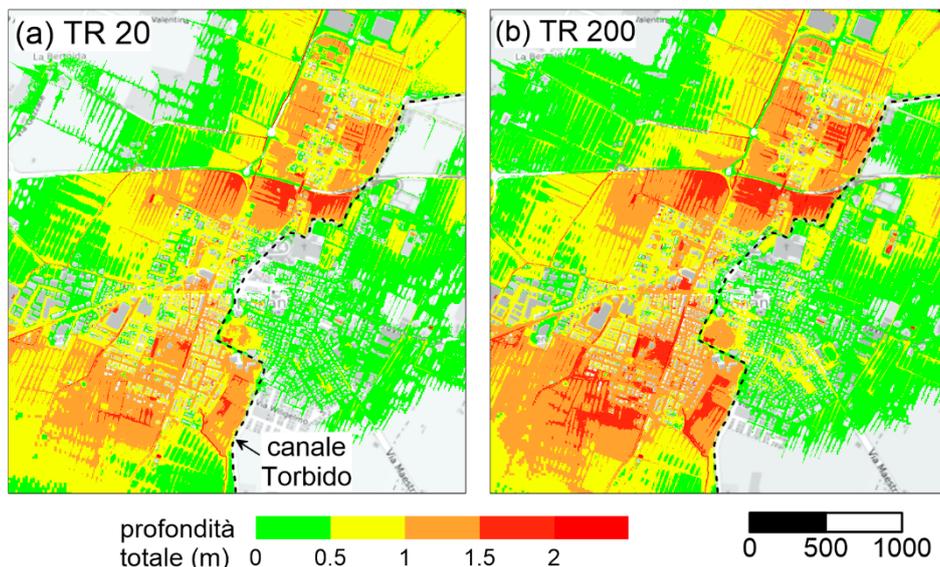


Figura 7-13 – Dettaglio della mappa della massima profondità totale (in m) per la Breccia 2 nel centro abitato di Nonantola: (a) TR 20 e (b) TR 200.

7.2.6. Aree allagate e volumi esondati

La Tabella 7-2 sintetizza i risultati relativi ai volumi esondati e alla superficie allagata a seguito di ciascuna rotta. L'area allagata è riferita esclusivamente al territorio del Comune di Nonantola; si riporta per semplicità anche la percentuale del territorio comunale allagato. Si noti che è stata esclusa dal calcolo dell'area allagata la piccola parte del territorio comunale compresa all'interno delle arginature del Panaro.

Il volume esondato risulta piuttosto variabile per i diversi scenari, in virtù del fatto che alcune breccie sono ubicate in tratti caratterizzati dalla presenza di ostacoli a ridosso dell'argine che riducono la portata in uscita dalla breccia stessa, o in tratti nei quali il piano campagna al piede dell'argine risulta localmente più elevato, e quindi la pensilità dell'argine stesso è ridotta. Per le breccie che si aprono durante il transito dell'onda TR 200, ha una certa influenza sul volume esondato anche l'istante di innesco, che precede il colmo nel caso di sormonto. I volumi esondati maggiori si ottengono infatti per le simulazioni delle Breccie 3 e 4. Come termine di confronto, si tenga presente che i volumi complessivi delle onde di piena sono di $98 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per lo scenario TR 20 e di $133 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per lo scenario TR 200.

Con riferimento alle aree allagate, è possibile notare che per lo scenario TR 20 è coinvolta una porzione del territorio comunale compresa tra il 25% e il 50%, mentre per lo scenario più gravoso tale intervallo sale a circa 40-60%. La massima estensione dell'area allagata, con riferimento al territorio del Comune di Nonantola, si ottiene per le simulazioni delle Breccie 2 e 3.

Confrontando i risultati delle simulazioni di una generica breccia per i due scenari idrologici (TR 20 e TR 200), è possibile osservare che la dinamica del fenomeno risulta indicativamente simile, ad eccezione di alcune differenze dovute al superamento o meno di alcuni rilevati presenti nel territorio; tuttavia, nel caso dello scenario idrologico più gravoso, il volume esondato può essere anche doppio rispetto al caso TR 20. Per questo motivo, l'allagamento risulta più esteso e le quote idriche massime raggiunte sono chiaramente più elevate. Si noti però che, per alcune posizioni di breccia (Breccia 3, ma soprattutto Breccia 4), la porzione di territorio comunale allagato è sostanzialmente la stessa: ciò è dovuto principalmente all'effetto di contenimento garantito da alcuni rilevati presenti nel territorio, che determina un'area allagata simile ma con tiranti idrici massimi più elevati per lo scenario TR 200; tuttavia, l'area complessivamente allagata (considerando quindi anche i comuni limitrofi) in realtà è più estesa nel caso dello scenario più gravoso.

Tabella 7-2 – Aree allagate (solo territorio Comune di Nonantola) e volumi esondati per tutte le simulazioni effettuate.

| Breccia | Area allagata nel Comune (ha) | | Area allagata nel Comune (%) | | Volume esondato totale ($\cdot 10^6$ m ³) | |
|---------|-------------------------------|--------|------------------------------|--------|--|--------|
| | TR 20 | TR 200 | TR 20 | TR 200 | TR 20 | TR 200 |
| 1 | 1420 | 2380 | 26% | 43% | 5.6 | 14.6 |
| 2 | 2370 | 3190 | 43% | 58% | 15.0 | 32.2 |
| 3 | 2670 | 3030 | 49% | 55% | 25.5 | 47.1 |
| 4 | 2220 | 2450 | 41% | 45% | 27.8 | 50.5 |
| 5 | 1550 | 2250 | 28% | 41% | 10.9 | 26.8 |

8. CONCLUSIONI

Nel presente studio si è valutata, mediante modellazione numerica, la dinamica dei possibili allagamenti nel comparto in destra idraulica del fiume Panaro a seguito di rotte arginali (nel tratto compreso tra l'attraversamento della ferrovia MI-BO e Bomporto) che possono interessare il territorio del Comune di Nonantola. Al fine di esplorare un'ampia gamma di possibili scenari di allagamento, sono state effettuate simulazioni con breccie arginali di rilevante ampiezza (confrontabile comunque con i massimi valori storici in fiumi di queste dimensioni) e ubicate in 5 diverse posizioni scelte opportunamente. Ciascuna simulazione è stata ripetuta per due diversi scenari idrologici (tempi di ritorno di 20 e 200 anni). I risultati forniscono informazioni relative alla dinamica dell'allagamento conseguente al cedimento arginale, alle massime profondità e velocità idriche attese e ai tempi di arrivo dell'allagamento. Le simulazioni sono state condotte con un modello idraulico 2D accurato e con una griglia di calcolo ad alta risoluzione (2x2 m nelle aree di maggiore interesse), che permette di ottenere risultati molto dettagliati, in particolare all'interno dei centri abitati. Le immagini riportate nel precedente capitolo permettono di apprezzare il grado di dettaglio conseguito nelle zone urbane.

I risultati relativi all'intero territorio indagato possono essere analizzati congiuntamente per fornire una valutazione finale sull'impatto dei potenziali allagamenti conseguenti a breccie sul Panaro sul Comune di Nonantola.

A questo scopo è stata realizzata la mappa dell'involuppo delle massime profondità totali (indice di pericolosità) ottenute dalle simulazioni delle varie breccie, per ciascuno dei due scenari idrologici considerati. Le mappe sono rappresentate nella Figura 8-1 e nella Figura 8-2, rispettivamente per gli scenari TR 20 e TR 200. L'area complessivamente interessata da potenziali allagamenti è di 3440 ha per lo scenario TR 20 e di 3730 ha per lo scenario TR 200, pari rispettivamente al 63% e al 68% del territorio comunale.

In particolare, si evidenzia che la porzione Sud-Est del Comune non risulta mai coinvolta dall'allagamento, poiché viene "schermata" a Sud dal rilevato della TAV. Un'altra area a basso rischio di alluvione è il dosso morfologico presente lungo il confine comunale a Nord, grazie alla sua elevazione rispetto alla campagna circostante.

Per quanto riguarda invece l'area apparentemente asciutta a ridosso dell'argine destro del Panaro, compresa tra le posizioni delle Breccie 4 e 5, è importante evidenziare che tale area potrebbe essere allagata in caso di innesco di una breccia nel tratto intermedio tra le due breccie qui considerate: non è dunque lecito attribuire a tale area una bassa pericolosità. Lo stesso ragionamento è valido in generale per tutta la fascia al piede dell'arginatura destra del fiume Panaro. Chiaramente, aumentando il numero degli scenari simulati (breccie più ravvicinate) sarebbe possibile migliorare la valutazione della pericolosità in vicinanza delle arginature, mentre nel resto del territorio la mappa di involuppo rimarrebbe sostanzialmente invariata.

Come già evidenziato in precedenza, l'area caratterizzata dalla pericolosità più alta è sicuramente quella delimitata a Sud dagli argini del collettore Bosca e a Est da quelli del canale Torbido: qui infatti si accumula una parte consistente del volume esondato e si

riscontrano tiranti idrici elevati. L'area è ad uso prevalentemente agricolo, anche se sono presenti alcune case sparse.

Inoltre, indici di pericolosità alta o altissima sono riscontrabili in tutta la parte Ovest del centro abitato di Nonantola e zone limitrofe, in sinistra idraulica del canale Torbido, mentre in destra dello stesso la pericolosità è medio-bassa. Un ingrandimento della mappa di inviluppo in quest'area è riportato nella Figura 8-3.

Particolarmente elevata è la pericolosità nella porzione di territorio delimitata a Est dagli argini del canale e a Nord dalla tangenziale (2° stralcio). Anche lungo alcune strade nella zona urbana Sud si riscontrano pericolosità elevate, in questo caso dovute non solo a tiranti idrici elevati, ma anche ad elevate velocità. Si noti che le simulazioni non tengono specificatamente conto del possibile accumulo di volume idrico nei piani interrati (cantine, garage, seminterrati) e nel sistema fognario.

Oltre alla zona residenziale, risulta caratterizzata da una pericolosità alta anche la zona industriale a Ovest di Nonantola ("Gazzate").

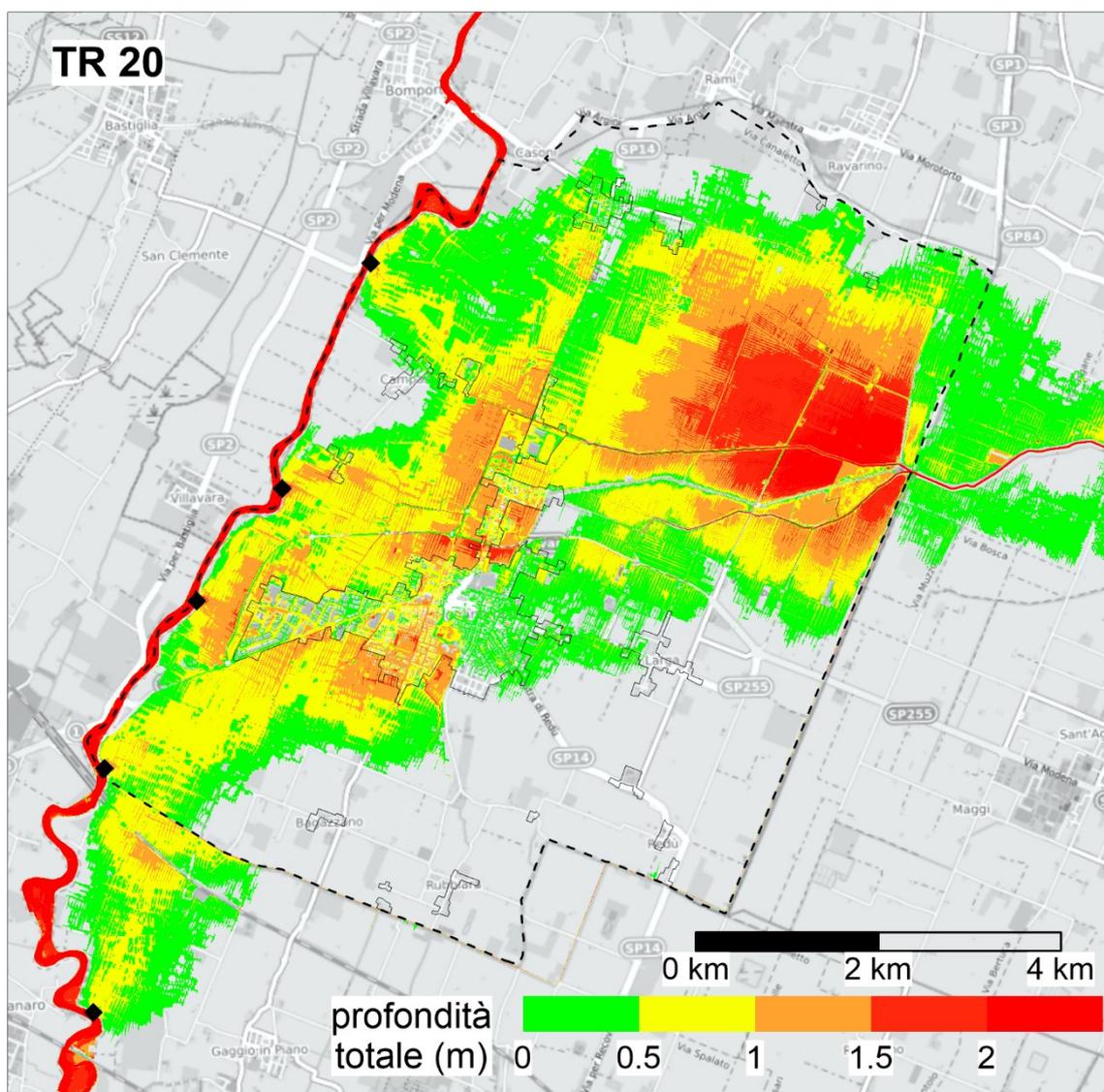


Figura 8-1 – Inviluppo della massima profondità totale (pericolosità) di tutte le brecce ipotizzate per lo scenario TR 20.

Per quanto riguarda gli altri principali centri abitati presenti nel territorio comunale, è possibile individuare alcune frazioni che non presentano particolari rischi in caso di alluvione: Bagazzano, Bonaghino, Case Pellegrini, Rubbiara, Ampergola, Redù, Case Limpido, La Fornace (tutte collocate nella parte Sud-Est del Comune) e Cantone (a Nord). La frazione di Case Via Larga è lambita dall'allagamento per alcuni scenari simulati, ma con tiranti idrici modesti (bassa pericolosità). Infine, si riscontrano pericolosità medio-alte nelle frazioni di La Bertolda, Case Ponte Fossa, Case Reggiani, Campazzo, La Selvatica, La Grande, La Grande del Bosco e Bellincina.

Infine, si ricordi che per quantificare correttamente il rischio idraulico sarebbe necessario accompagnare la presente valutazione della pericolosità idraulica con un'analisi dettagliata degli elementi esposti e della loro vulnerabilità.

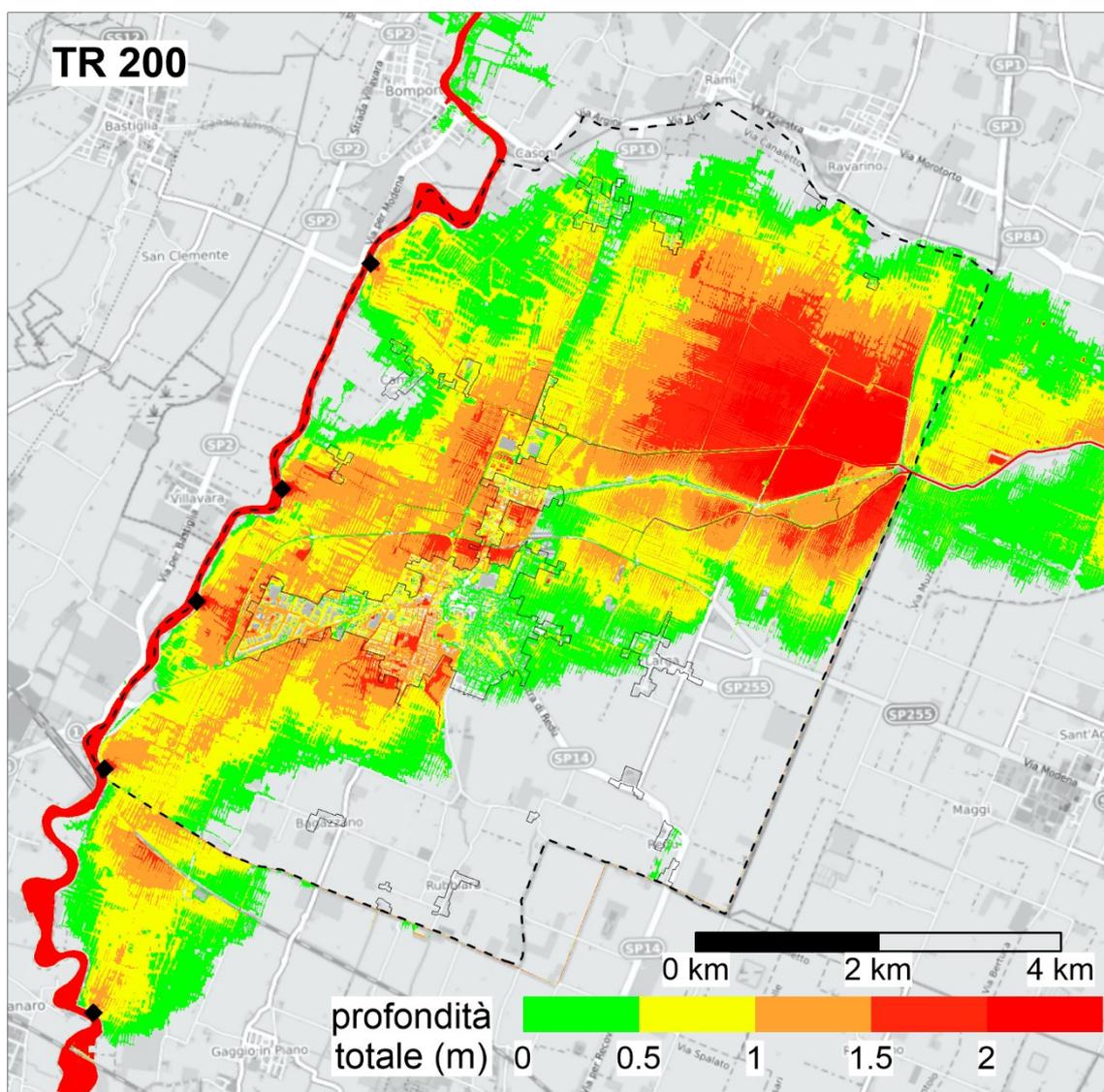


Figura 8-2 – Involuppo della massima profondità totale (pericolosità) di tutte le brecce ipotizzate per lo scenario TR 200.

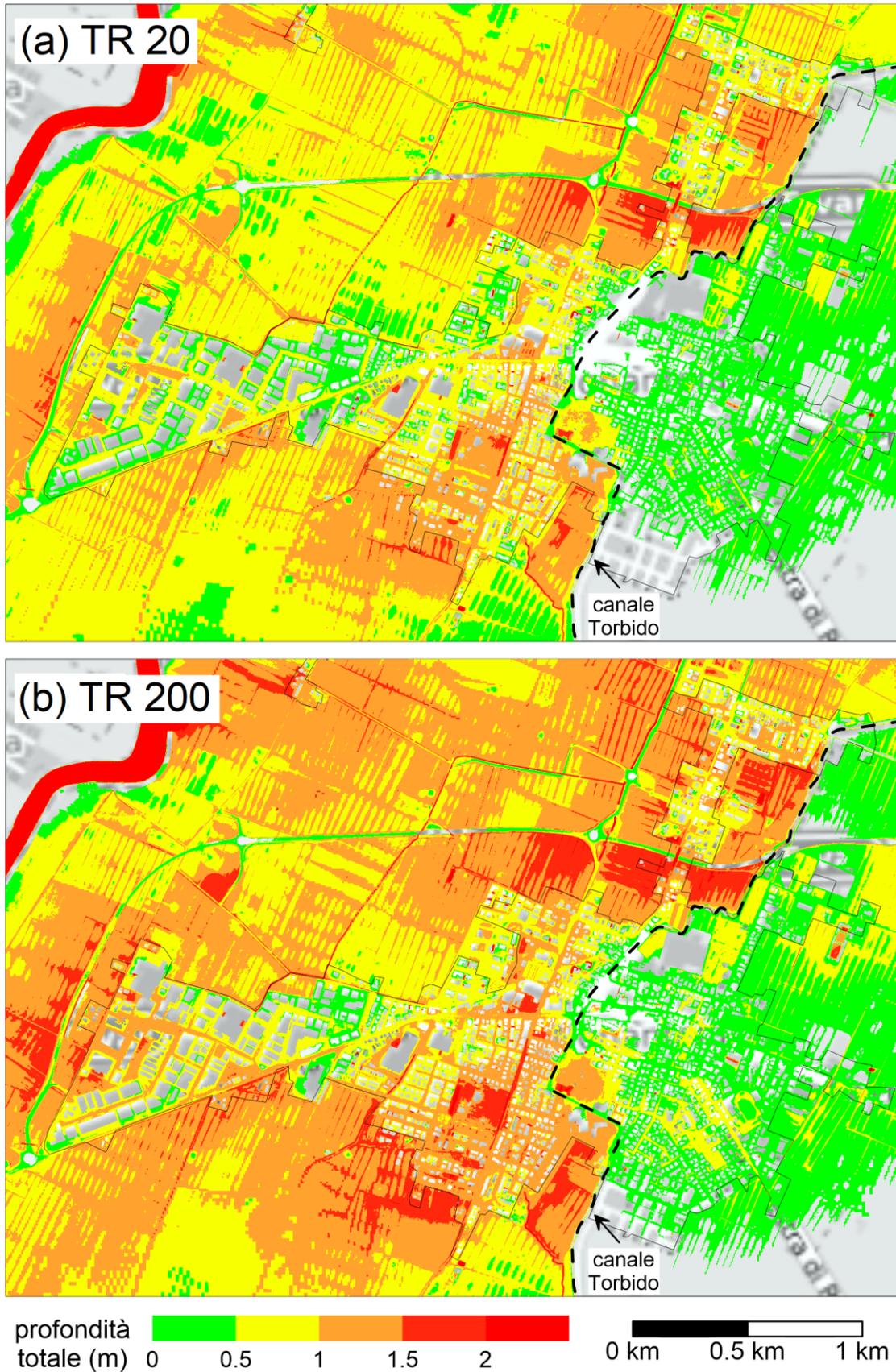


Figura 8-3 – Centro abitato di Nonantola: inviluppo della massima profondità totale (pericolosità) di tutte le breccie ipotizzate per lo scenario (a) TR 20 e (b) TR 200.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] *Direttiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.*
- [2] Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, «Relazione tecnica sulla verifica funzionale delle arginature del fiume Panaro,» 2016.
- [3] L. Moratti e M. Pellegrini, «Alluvioni e dissesti verificatisi nel settembre 1972 e 1973 nei bacini dei fiumi Secchia e Panaro (Province di Modena e Reggio Emilia),» *Bollettino della Associazione mineraria subalpina*, vol. 14, n. 2, pp. 323-374, 1977.
- [4] E. Nora e A. Ghinò, «Alluvioni e terremoti - Principali rischi naturali di Modena nel Novecento,» in *La città e l'ambiente - Le trasformazioni ambientali e urbane a Modena nel Novecento. Annale dell'Atlante storico ambientale urbano di Modena*, Modena, Edizioni APM, 2008, pp. 75-91.
- [5] L. D'Alpaos, A. Brath, V. Fioravante, G. Gottardi, P. Mignosa e S. Orlandini, «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, 2014.
- [6] ETATEC et al., «Adeguamento strutturale e funzionale del sistema arginale tramite interventi di sistemazione morfologica dell'alveo, adeguamento in quota e in sagoma a valle della cassa al confine provinciale ... (MO-E-1346),» 2017.
- [7] Università degli Studi di Parma, «Progetto RESILIENCE - Relazione delle attività del POA 2016,» 2017.
- [8] J. Schubert e B. Sanders, «Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency,» *Advances in Water Resources*, vol. 41, pp. 49-64, 2012.
- [9] U. Maione, P. Mignosa e M. Tomirotti, «Idrogrammi sintetici per la progettazione di opere di difesa idraulica del territorio,» in *Atti del XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Genova, 2000.
- [10] R. Vacondio, A. Dal Palù, A. Ferrari, P. Mignosa, F. Aureli e S. Dazzi, «A non-uniform efficient grid type for GPU-parallel Shallow Water Equations models,» *Environmental Modelling & Software*, vol. in press, 2016.
- [11] R. Vacondio, A. Dal Palù e P. Mignosa, «GPU-enhanced finite volume shallow water solver for fast flood simulations,» *Environmental Modelling & Software*, vol. 57, pp. 60-75, 2014.
- [12] R. Vacondio, F. Aureli, A. Ferrari, P. Mignosa e A. Dal Palù, «Simulation of the January 2014 flood on the Secchia River using a fast and high-resolution 2D parallel shallow-water numerical scheme,» *Natural Hazards*, vol. 80, n. 1, pp. 103-125, 2016.
- [13] Autorità di Bacino del fiume Po, «PAI - LINEE GENERALI DI ASSETTO IDROGEOLOGICO E QUADRO DEGLI INTERVENTI - Bacino del Panaro,» 2008.

APPENDICE A. DINAMICA DI ALLAGAMENTO

Si riportano di seguito, per ciascuno scenario simulato, le mappe delle profondità idriche in quattro istanti significativi della simulazione, che permettono di visualizzare l'evoluzione dell'allagamento. Per meglio valutare la dinamica complessiva, si faccia riferimento ai filmati forniti come materiale digitale allegato.

Breccia 1 - TR 20

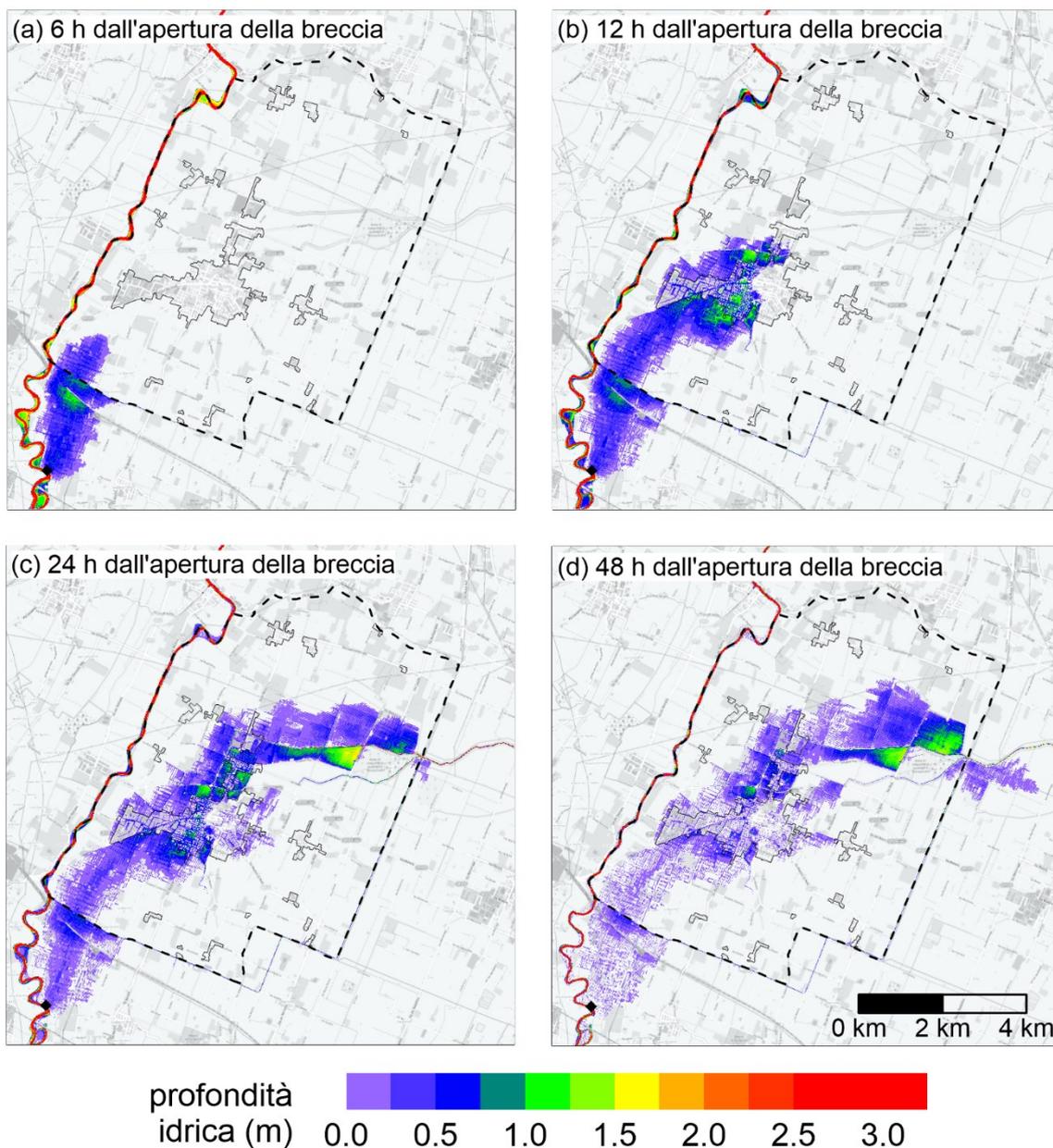


Figura A-1 – Breccia 1 TR 20: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescò della breccia.

Breccia 1 - TR 200

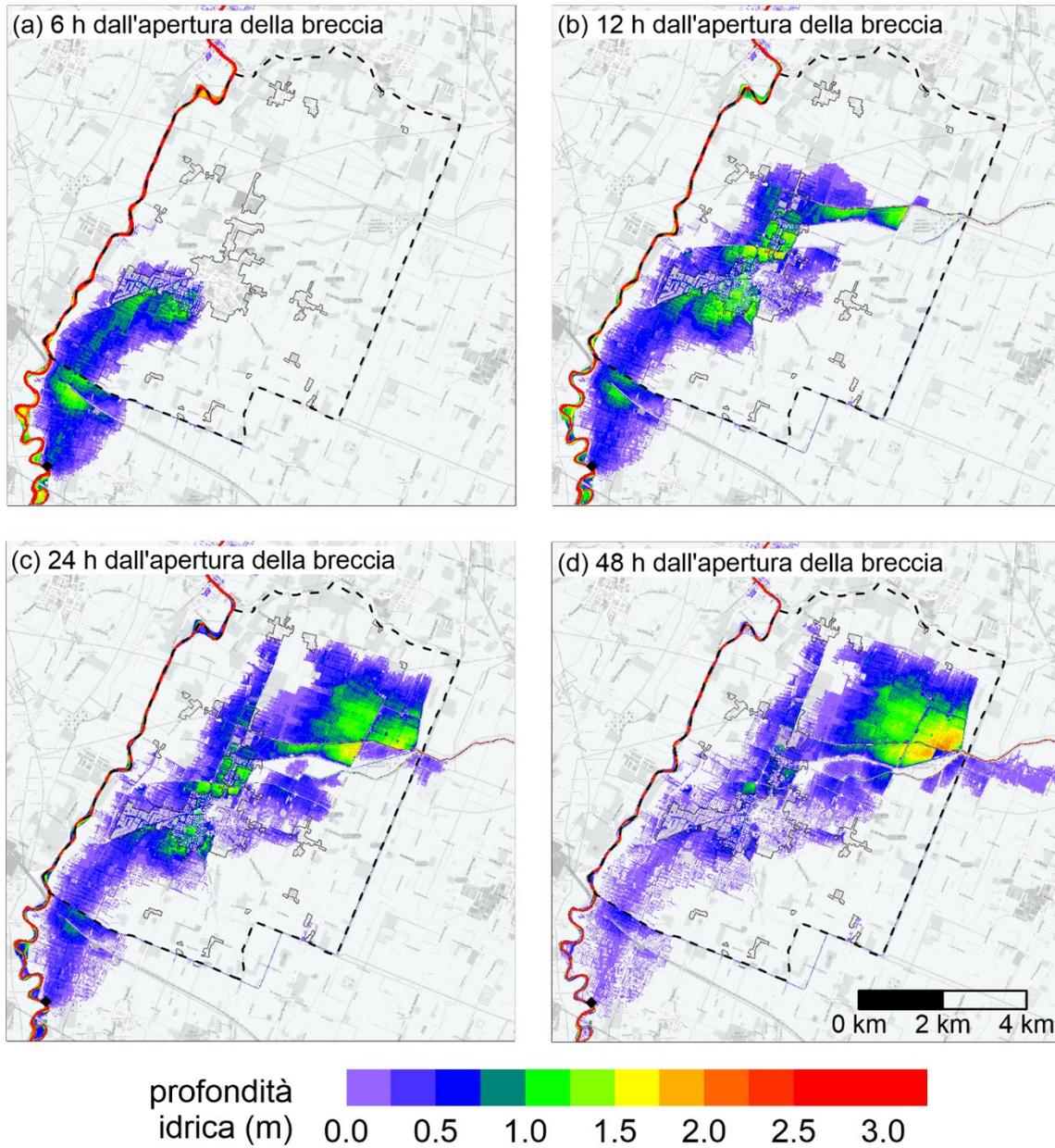


Figura A-2 – Breccia 1 TR 200: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescò della breccia.

Breccia 2 - TR 20

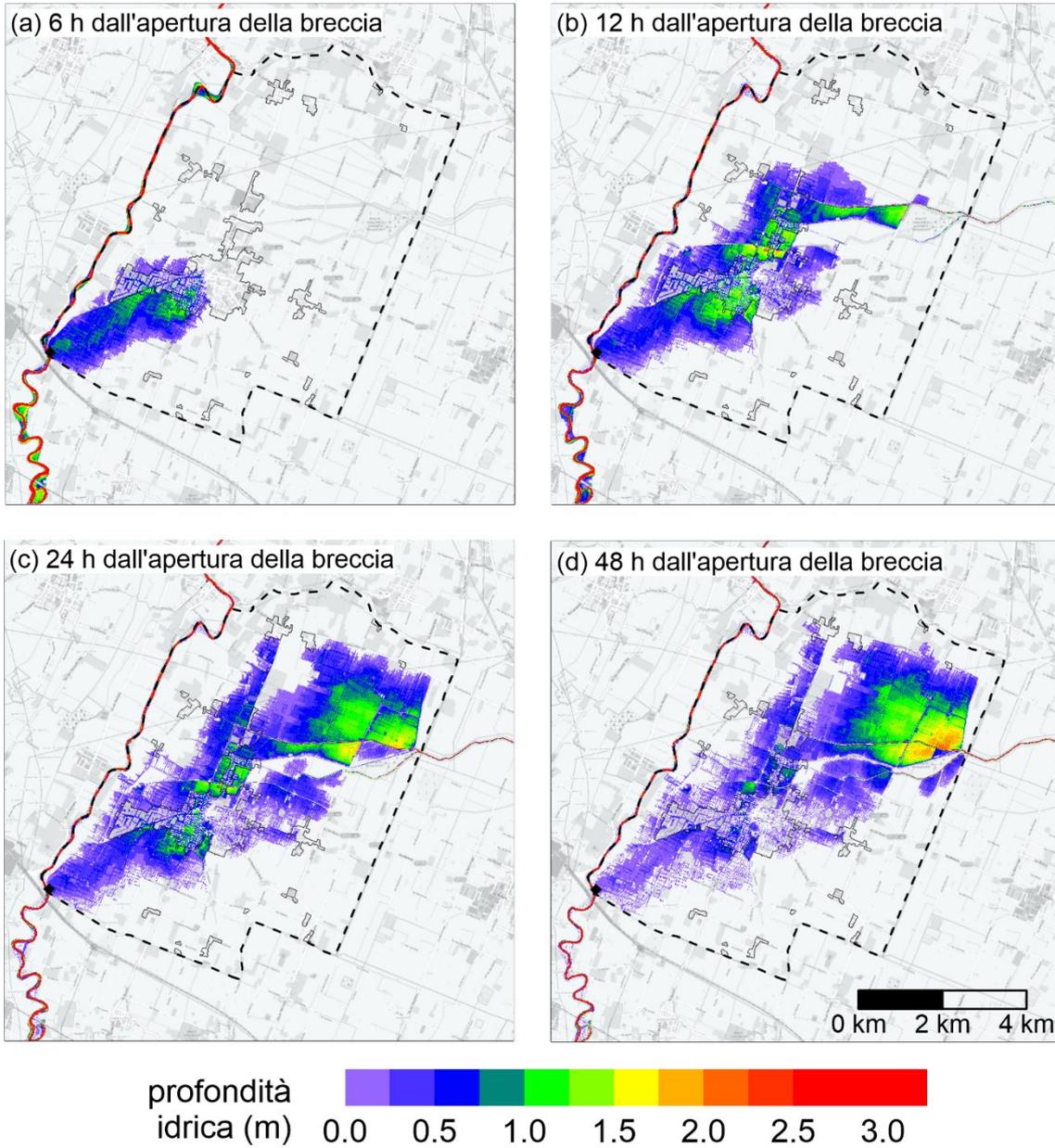


Figura A-3 – Breccia 2 TR 20: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 2 - TR 200

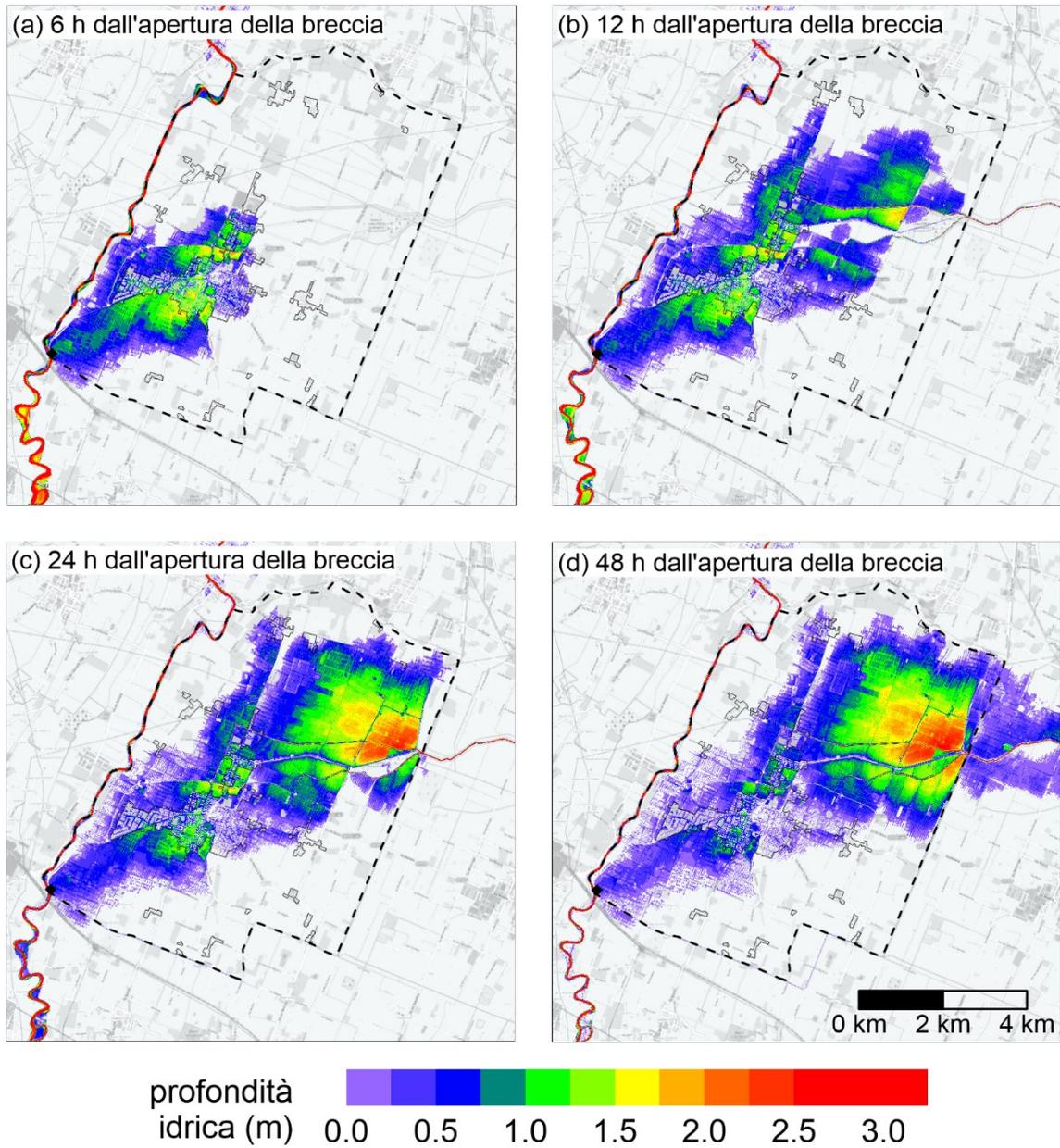


Figura A-4 – Breccia 2 TR 200: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 3 - TR 20

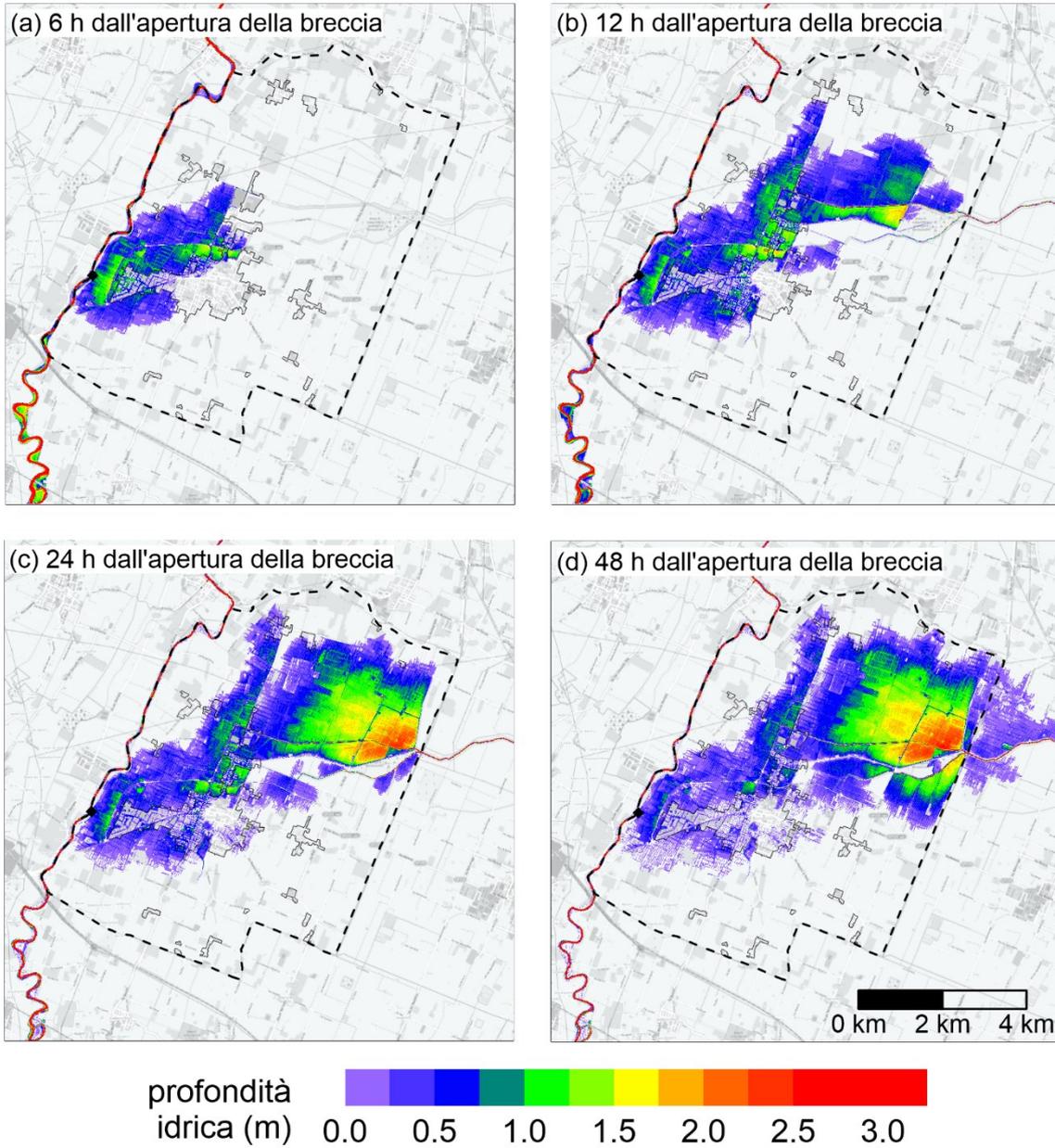


Figura A-5 – Breccia 3 TR 20: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescò della breccia.

Breccia 3 - TR 200

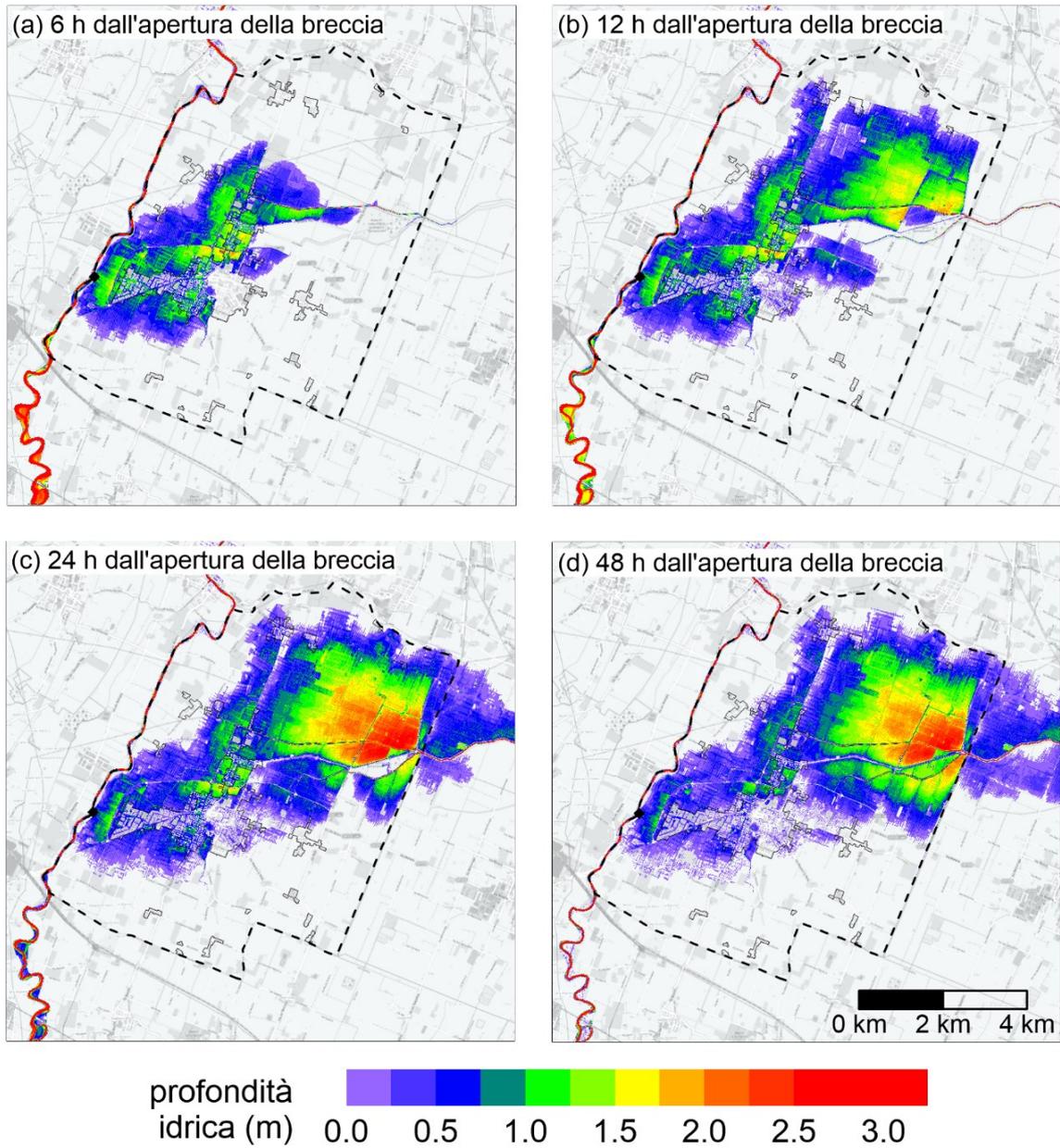


Figura A-6 – Breccia 3 TR 200: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 4 - TR 20

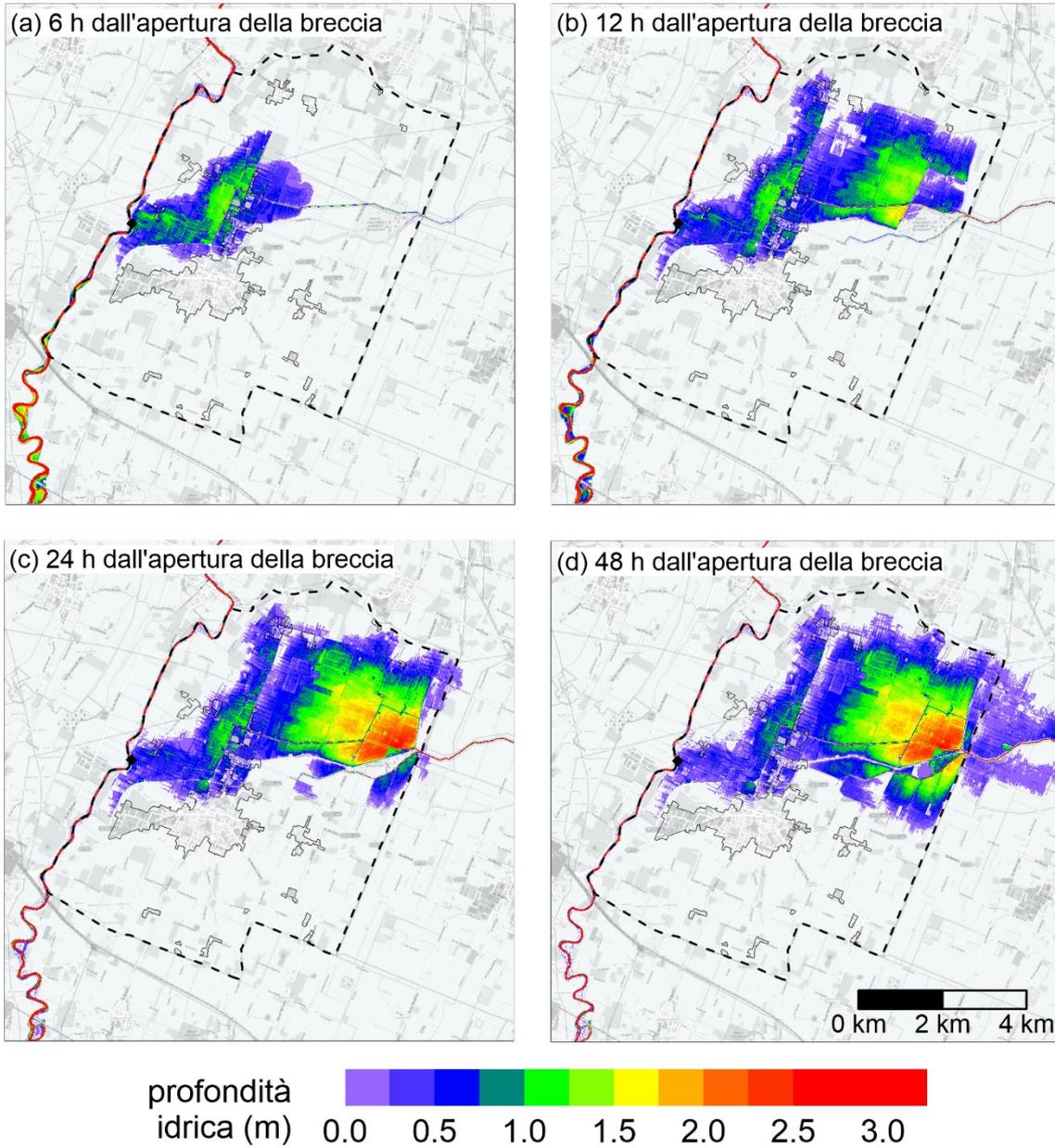


Figura A-7 – Breccia 4 TR 20: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 4 - TR 200

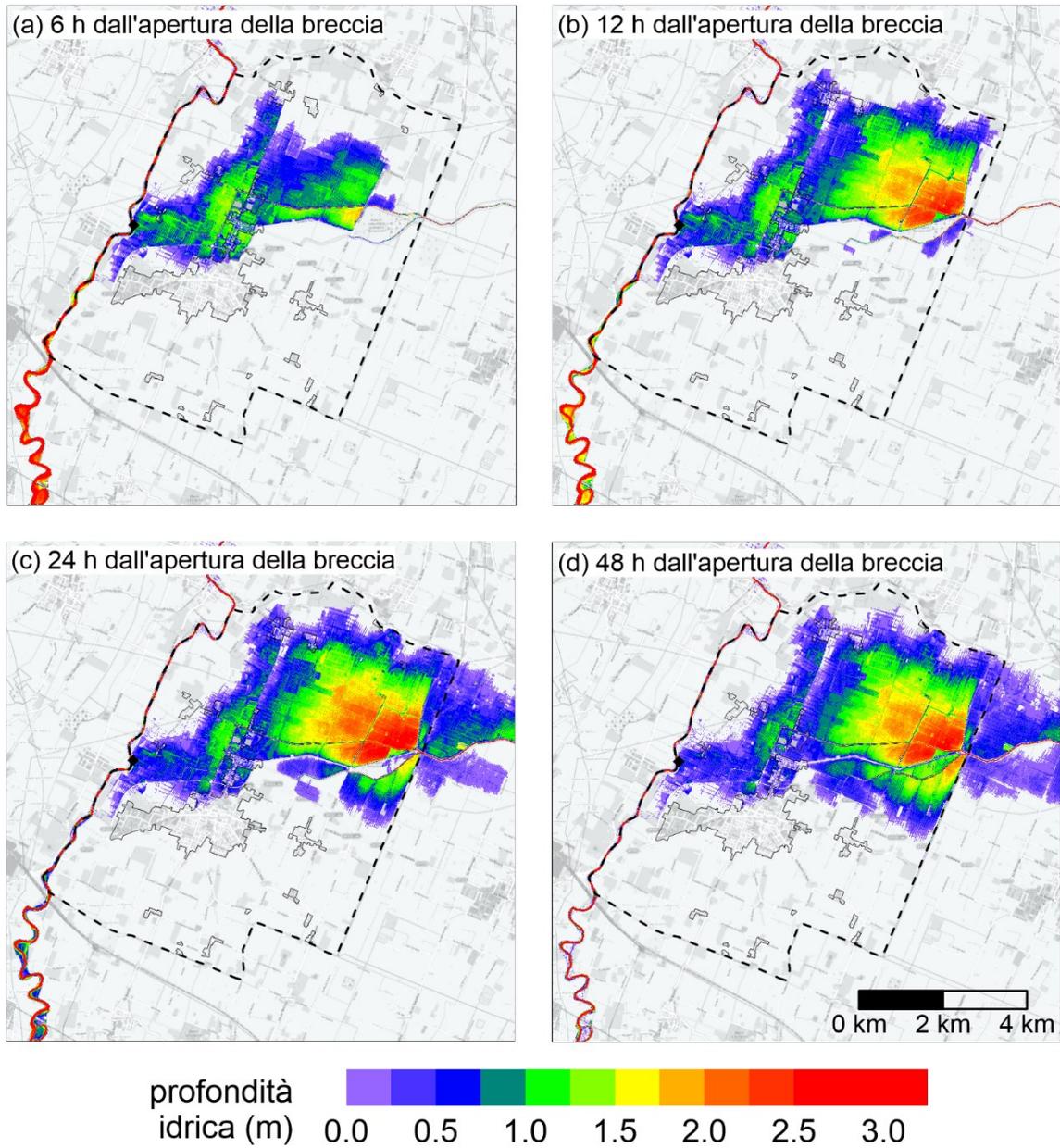


Figura A-8 – Breccia 4 TR 200: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 5 - TR 20

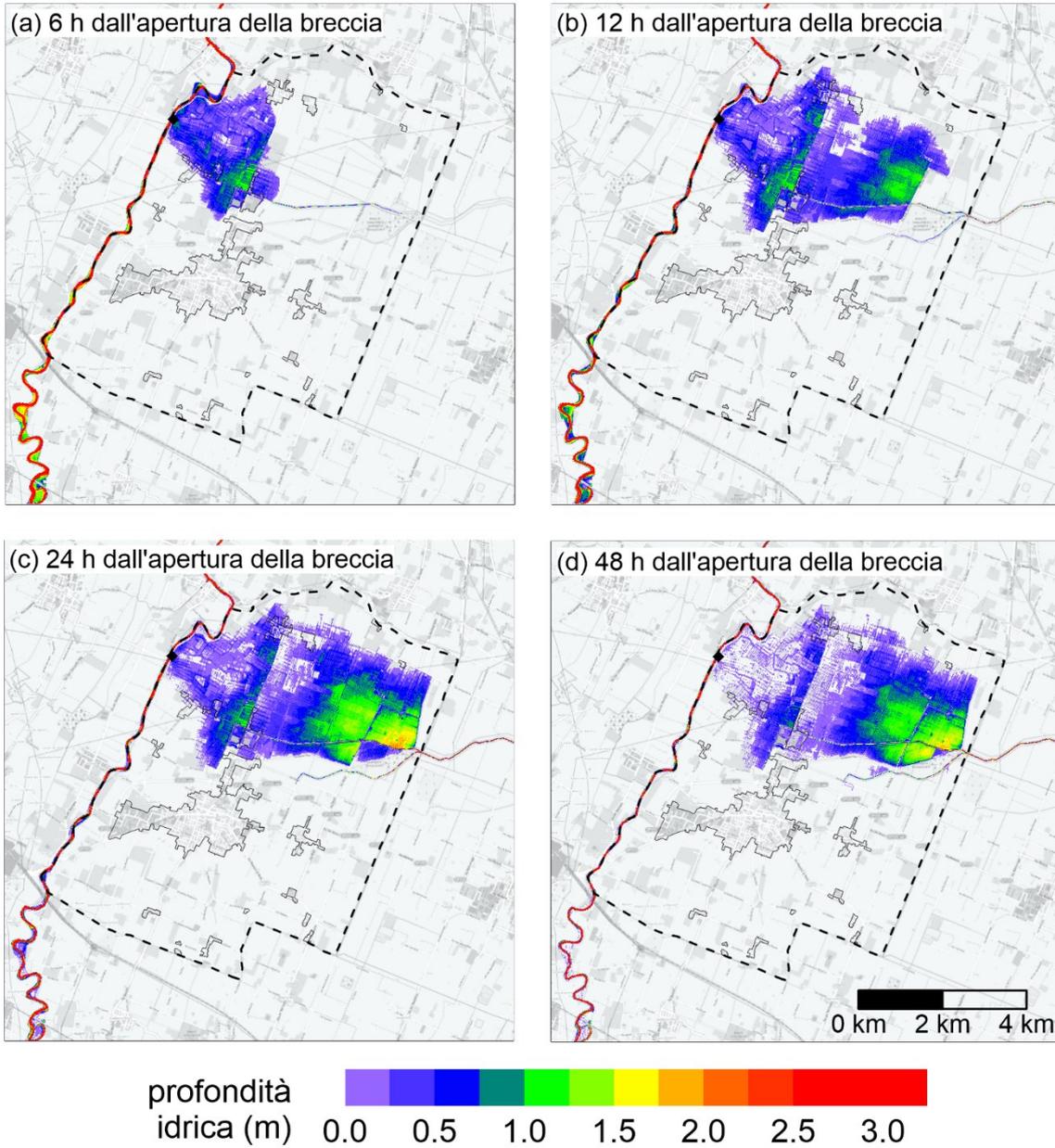


Figura A-9 – Breccia 5 TR 20: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescio della breccia.

Breccia 5 - TR 200

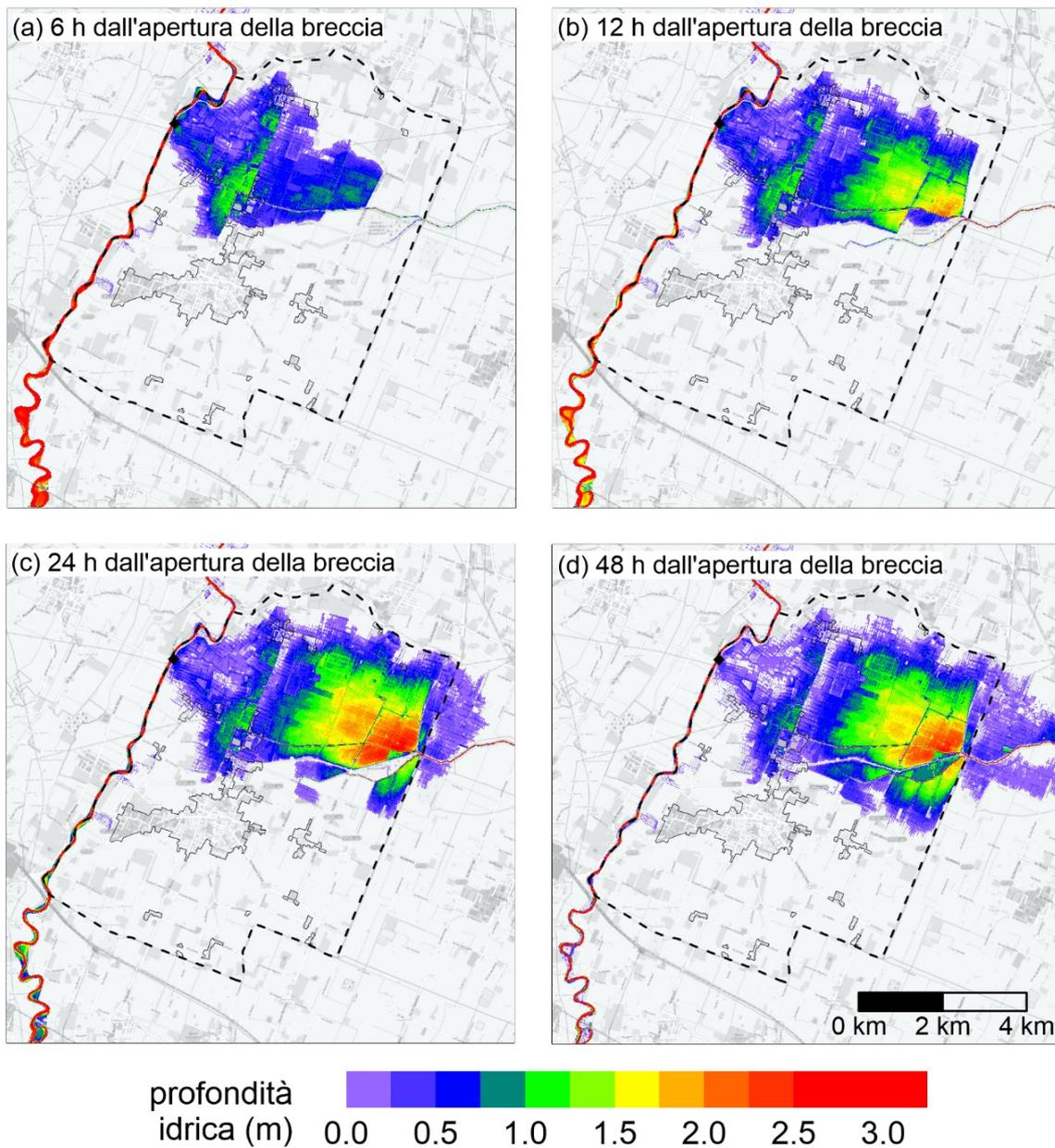


Figura A-10 – Breccia 5 TR 200: mappa delle profondità idriche 6, 12, 24 e 48 ore dopo l'innescò della breccia.

APPENDICE B. MAPPE DELLE MASSIME VELOCITA' IDRICHE

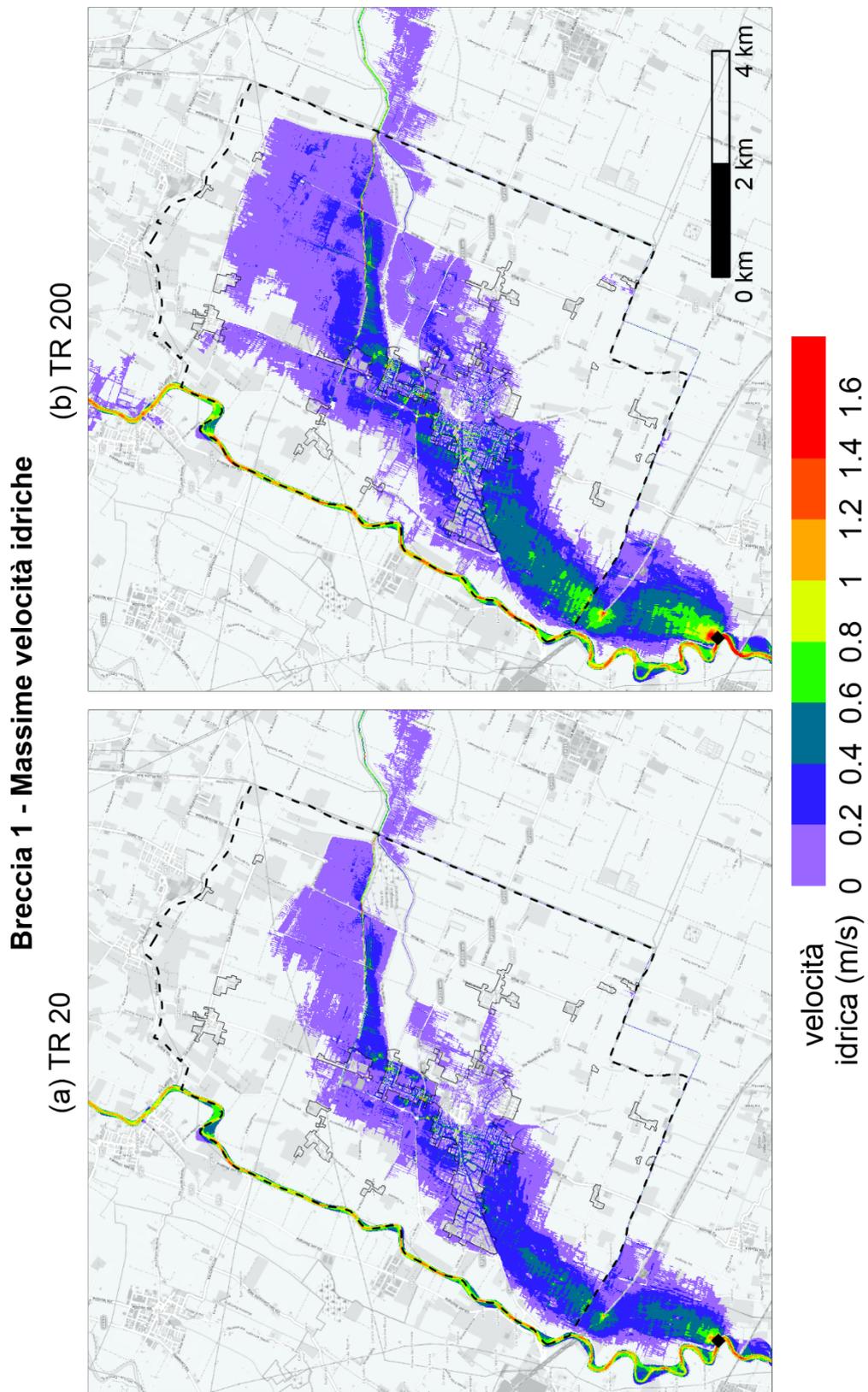


Figura B-11 – Mappa delle massime velocità idriche (in m/s) per la Breccia 1.

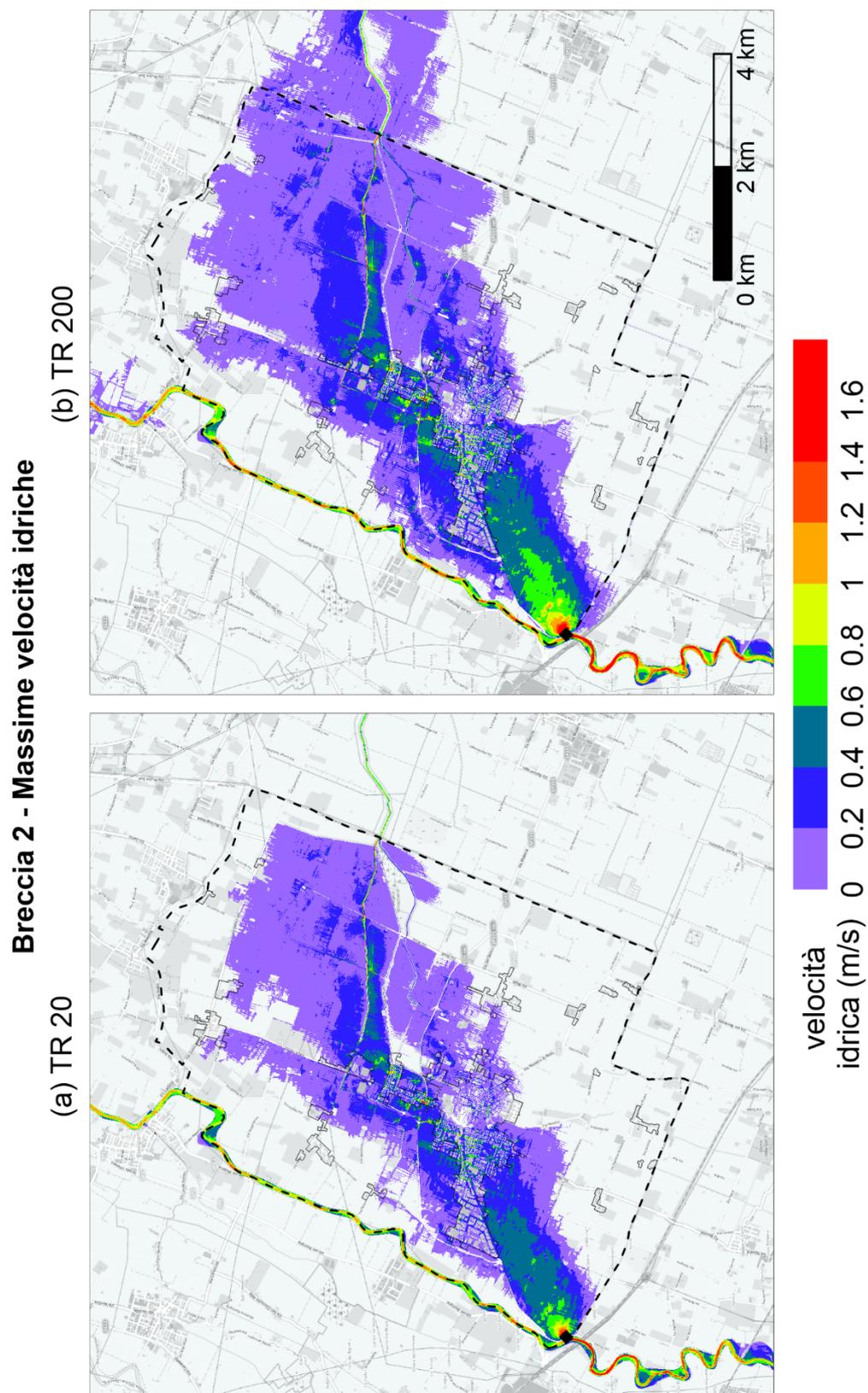


Figura B-12 – Mappa delle massime velocità idriche (in m/s) per la Breccia 2.

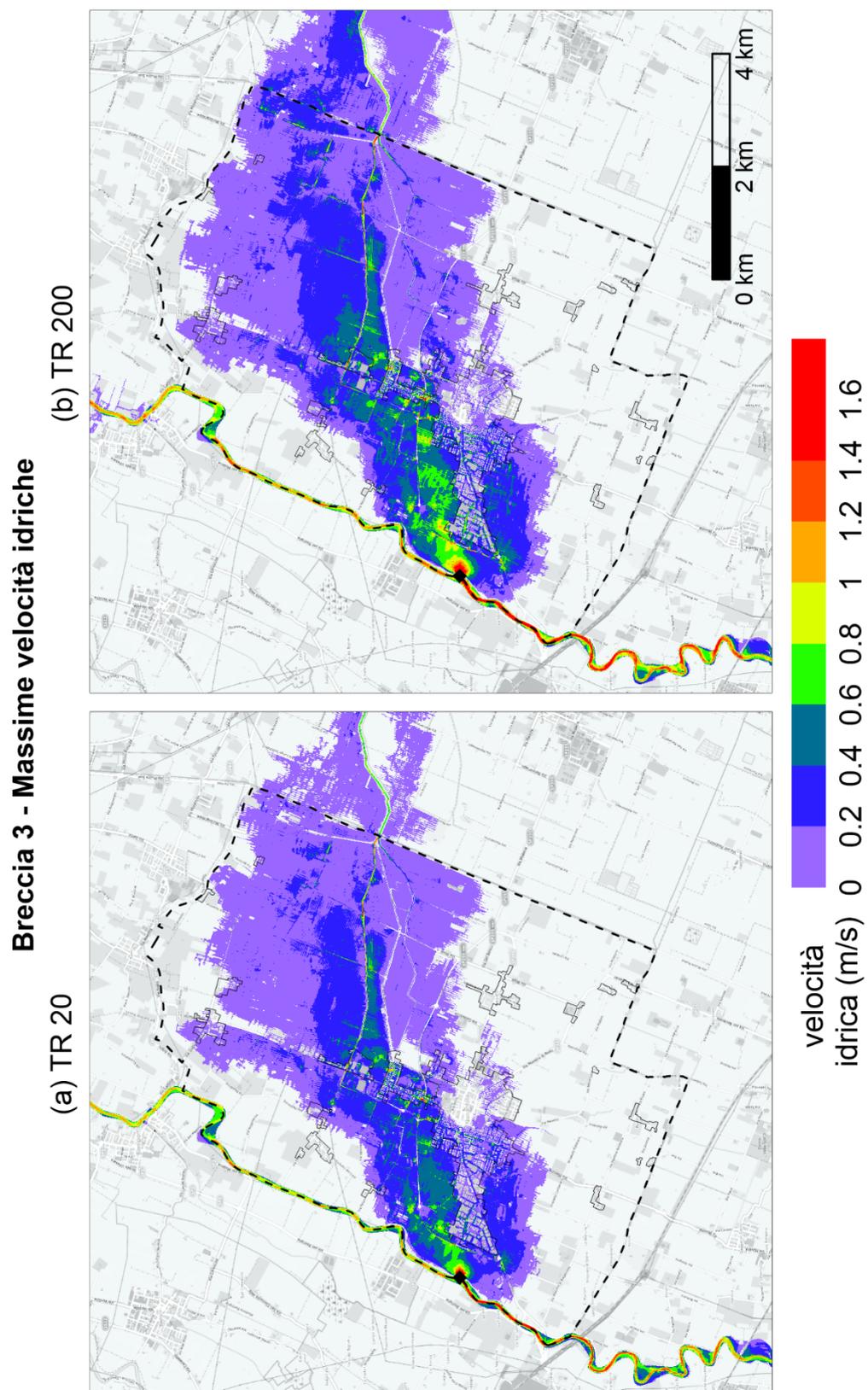


Figura B-13 – Mappa delle massime velocità idriche (in m/s) per la Breccia 3.

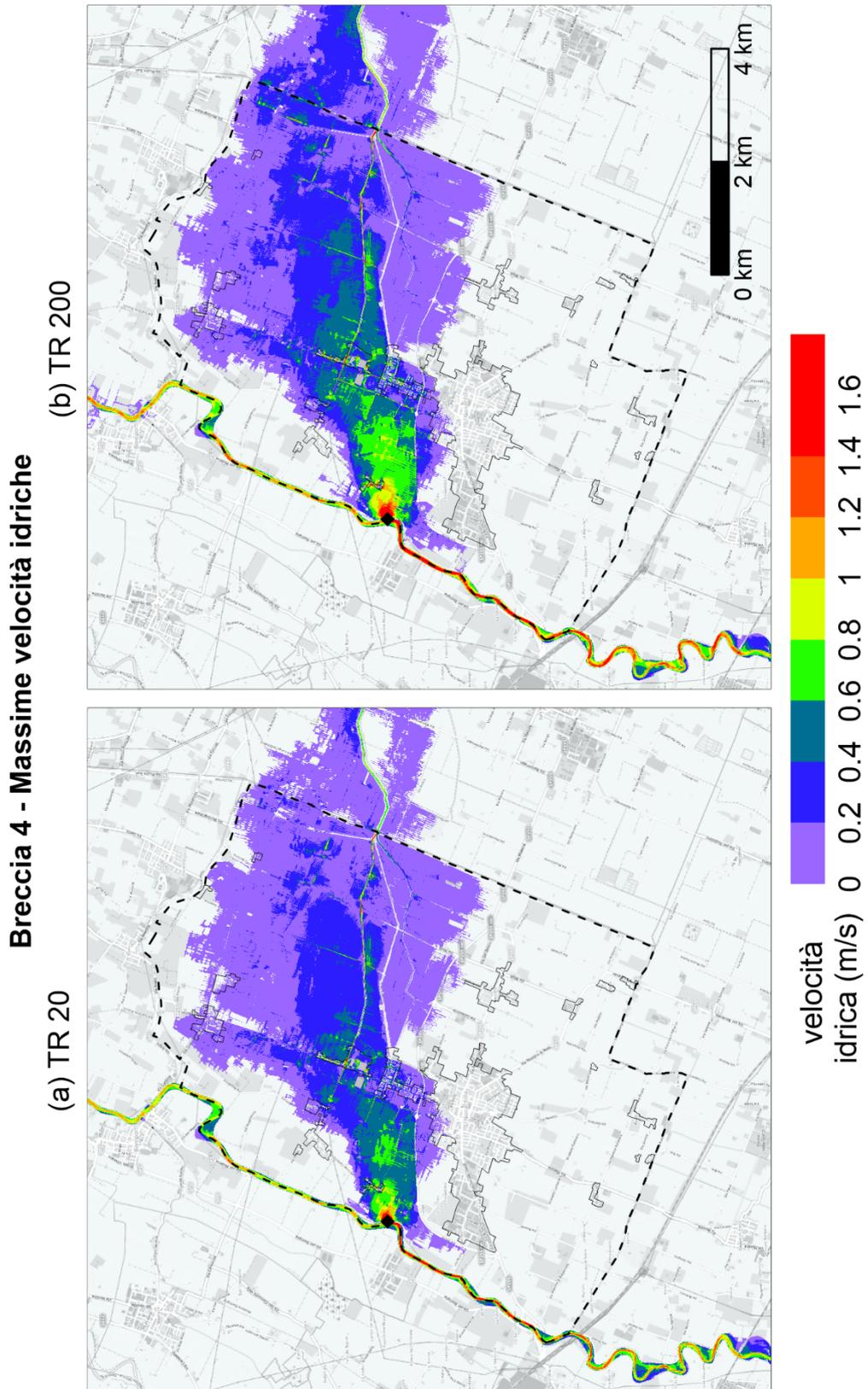


Figura B-14 – Mappa delle massime velocità idriche (in m/s) per la Breccia 4.

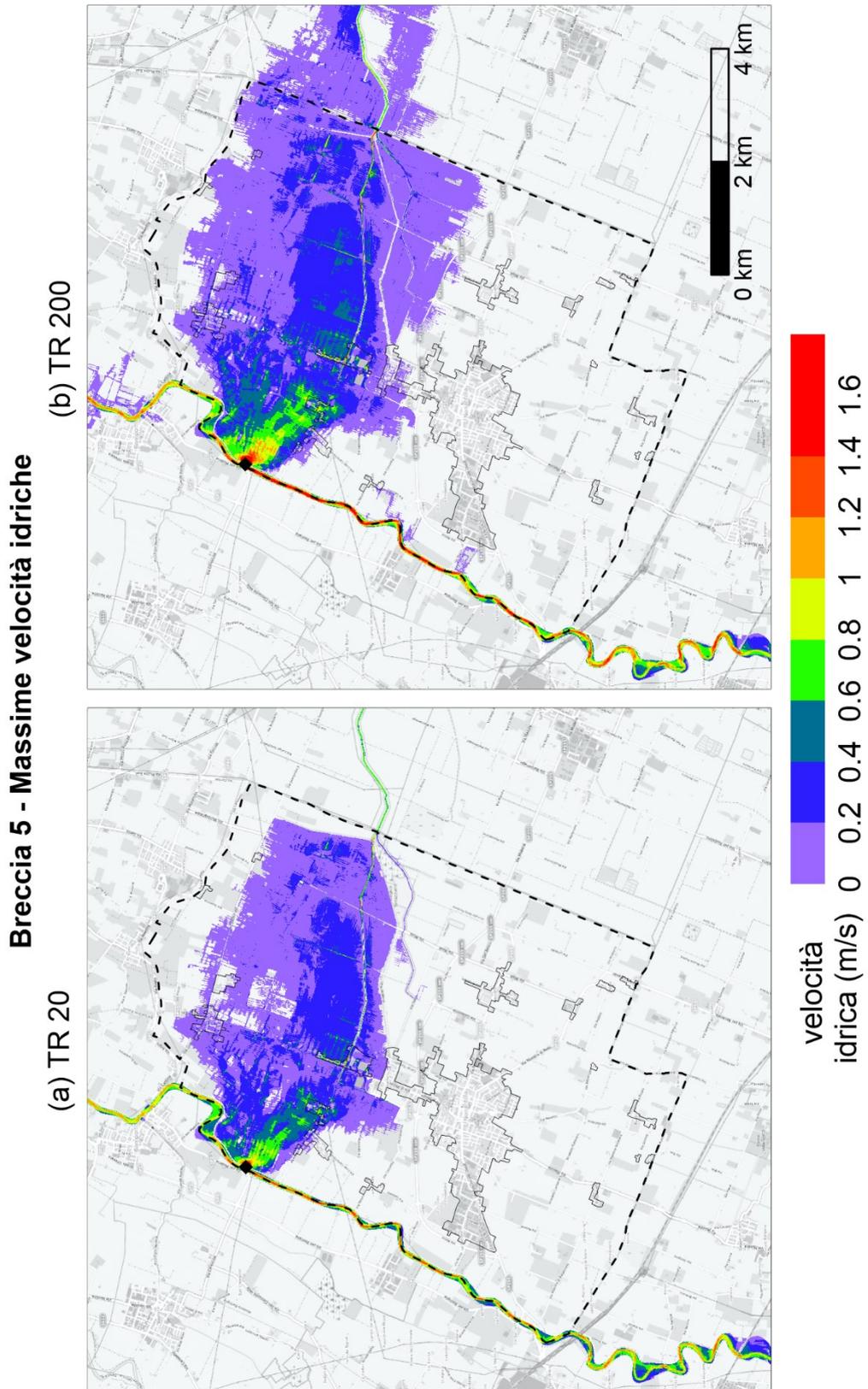


Figura B-15 – Mappa delle massime velocità idriche (in m/s) per la Breccia 5.

APPENDICE C. MAPPE DELLA PERICOLOSITÀ

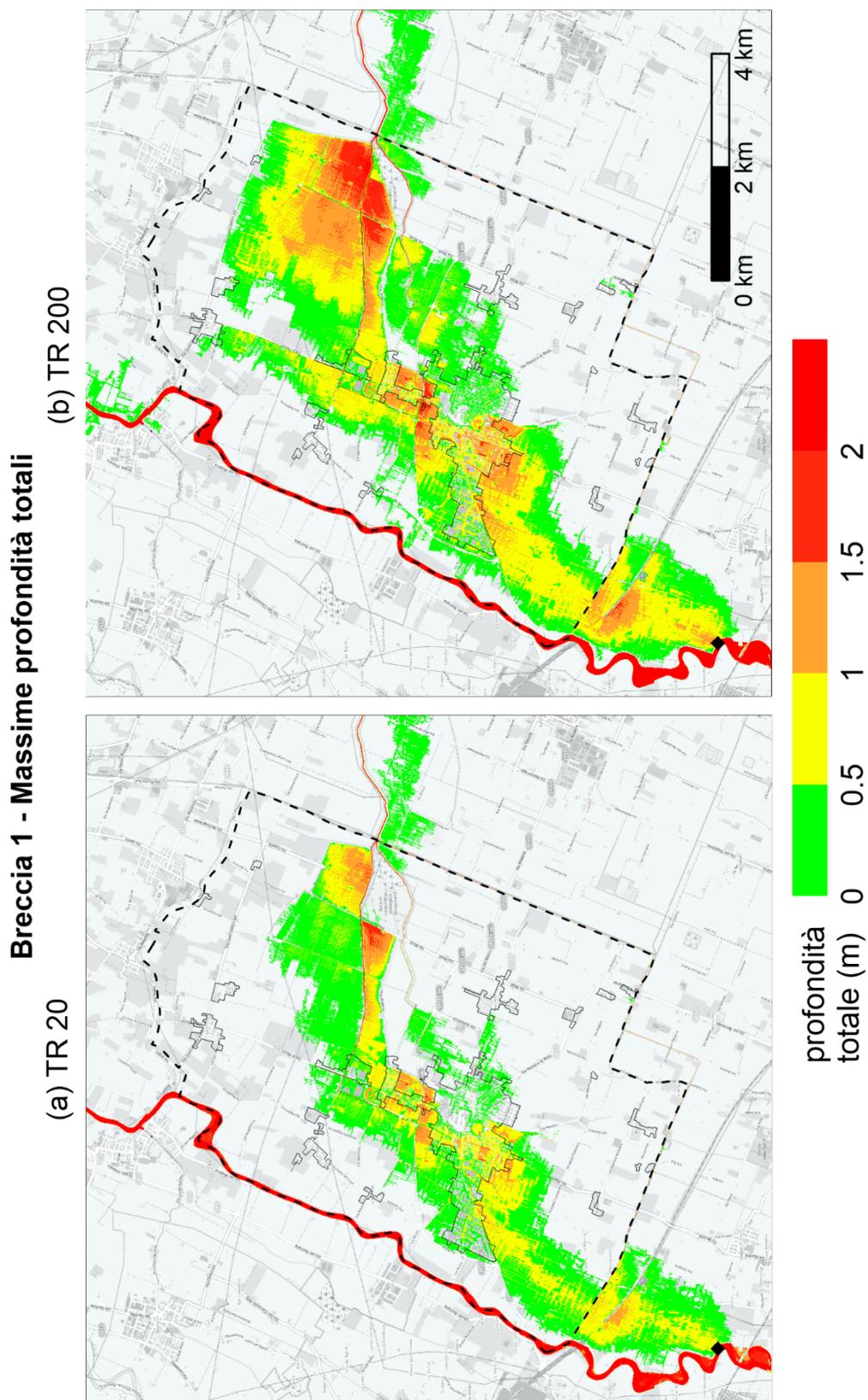


Figura C-16 – Mappa delle massime profondità totali (in m) per la Breccia 1.

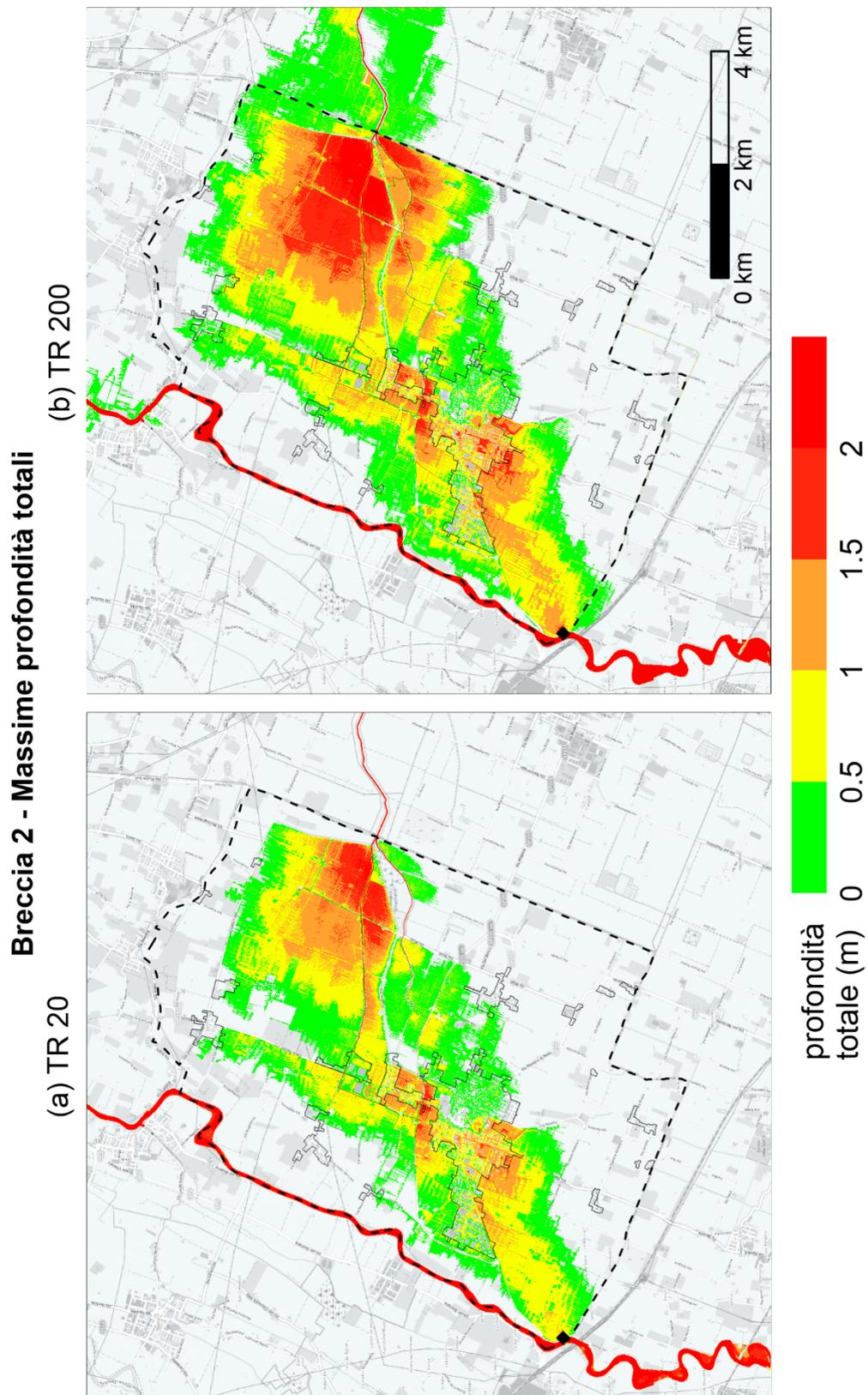


Figura C-17 – Mappa delle massime profondità totali (in m) per la Breccia 2.

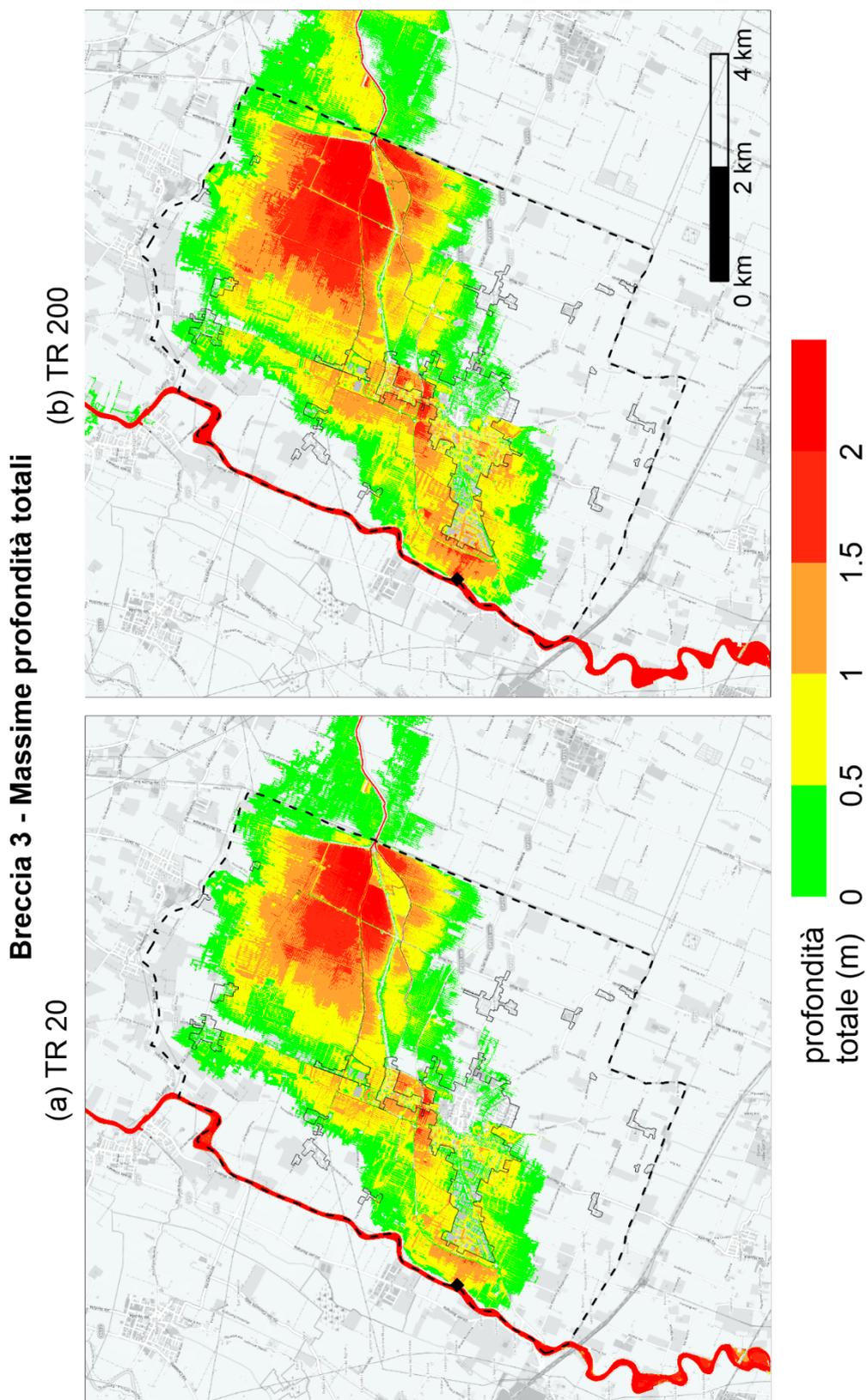


Figura C-18 – Mappa delle massime profondità totali (in m) per la Breccia 3.

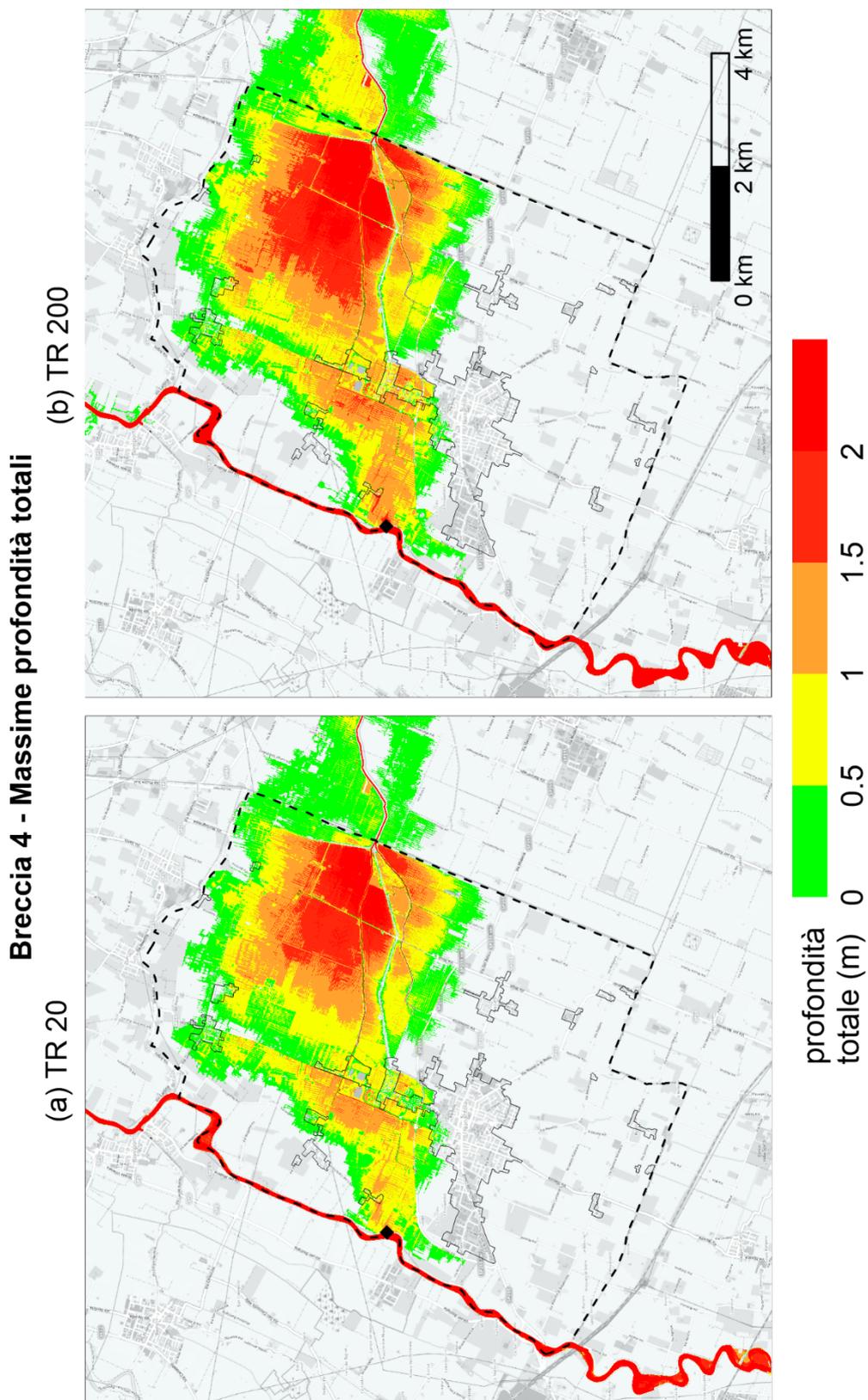


Figura C-19 – Mappa delle massime profondità totali (in m) per la Breccia 4.

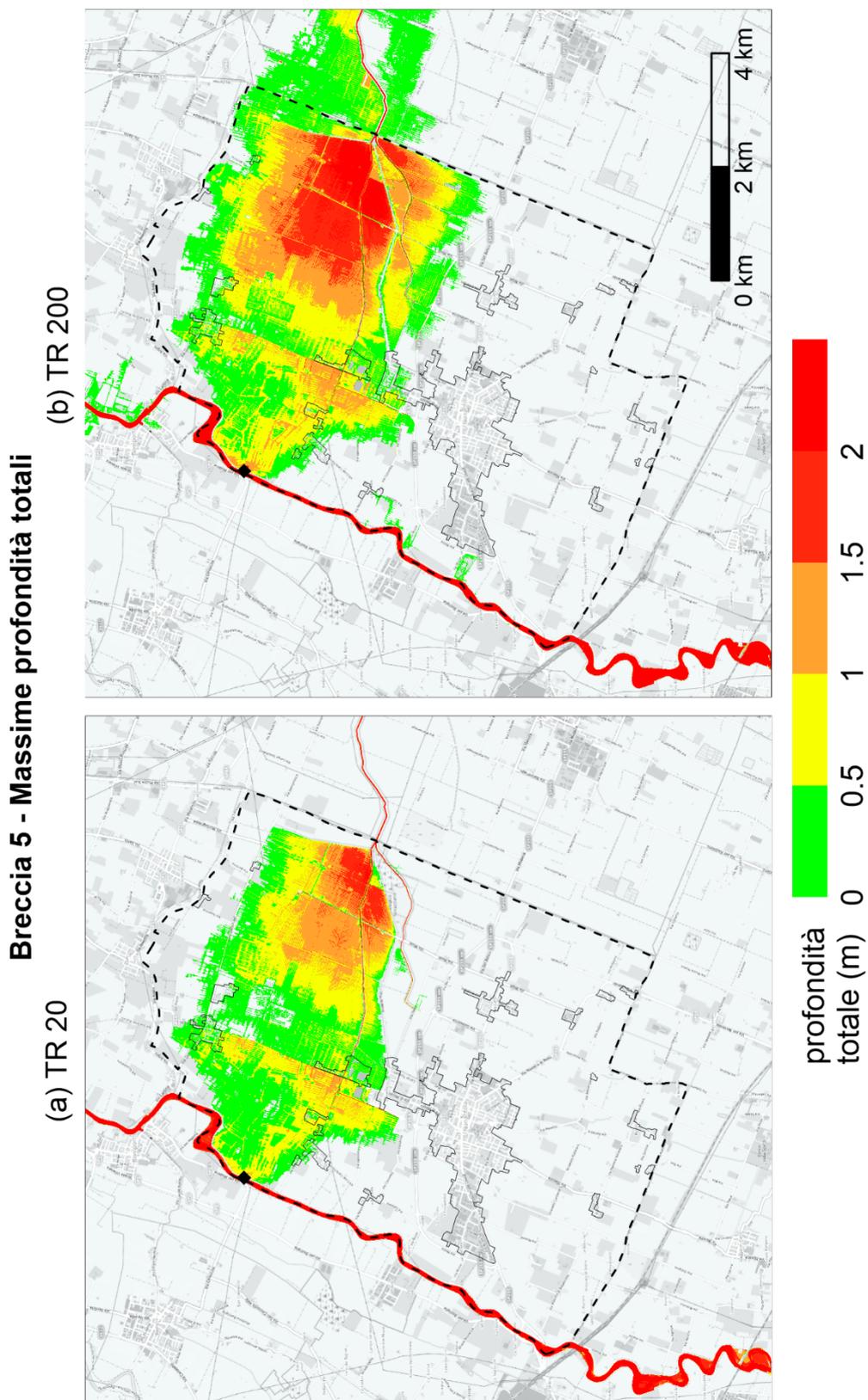


Figura C-20 – Mappa delle massime profondità totali (in m) per la Breccia 5.

APPENDICE D. MAPPE DEI TEMPI DI ARRIVO

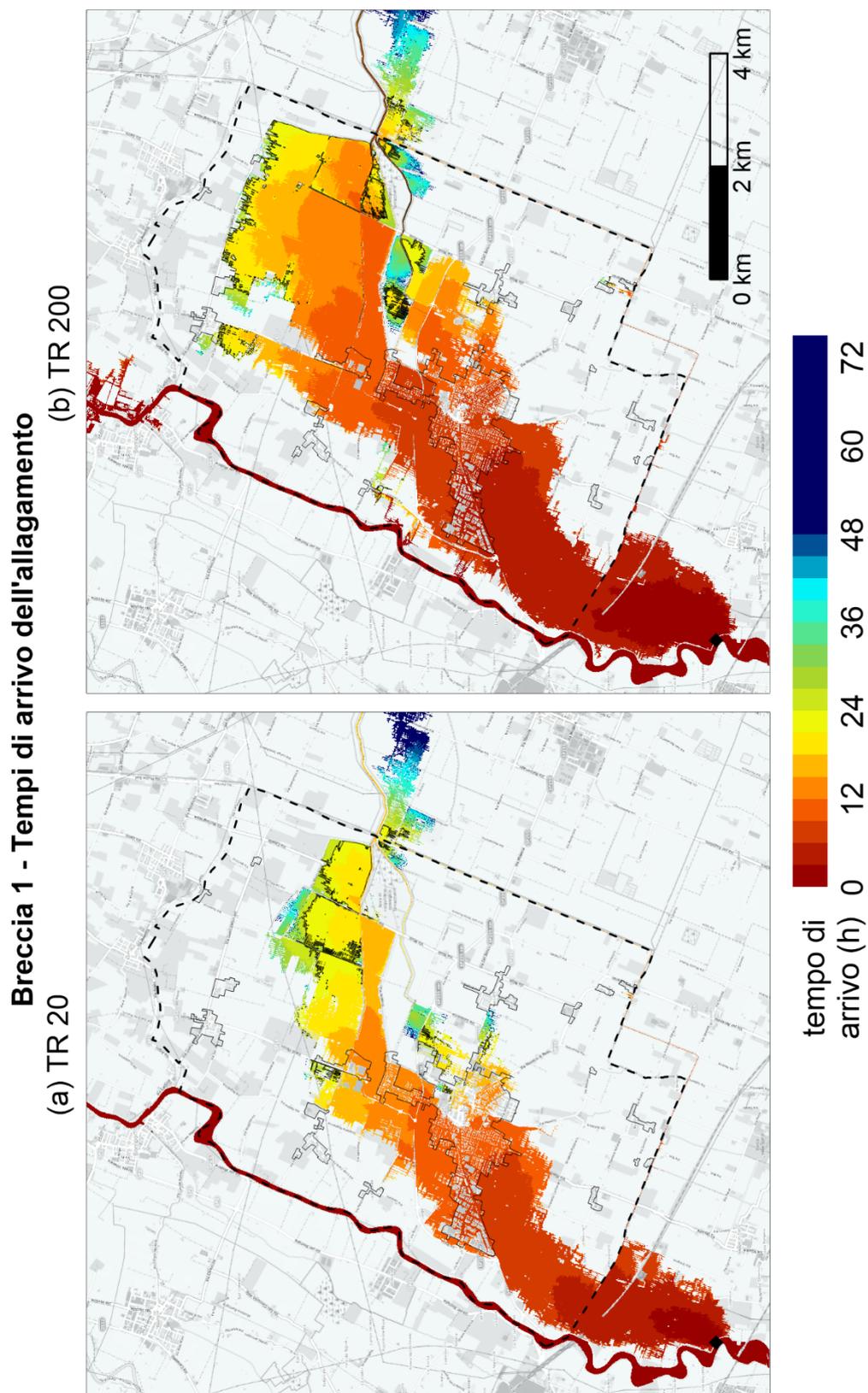


Figura D-21 – Mappa dei tempi di arrivo (in ore) per la Breccia 1.

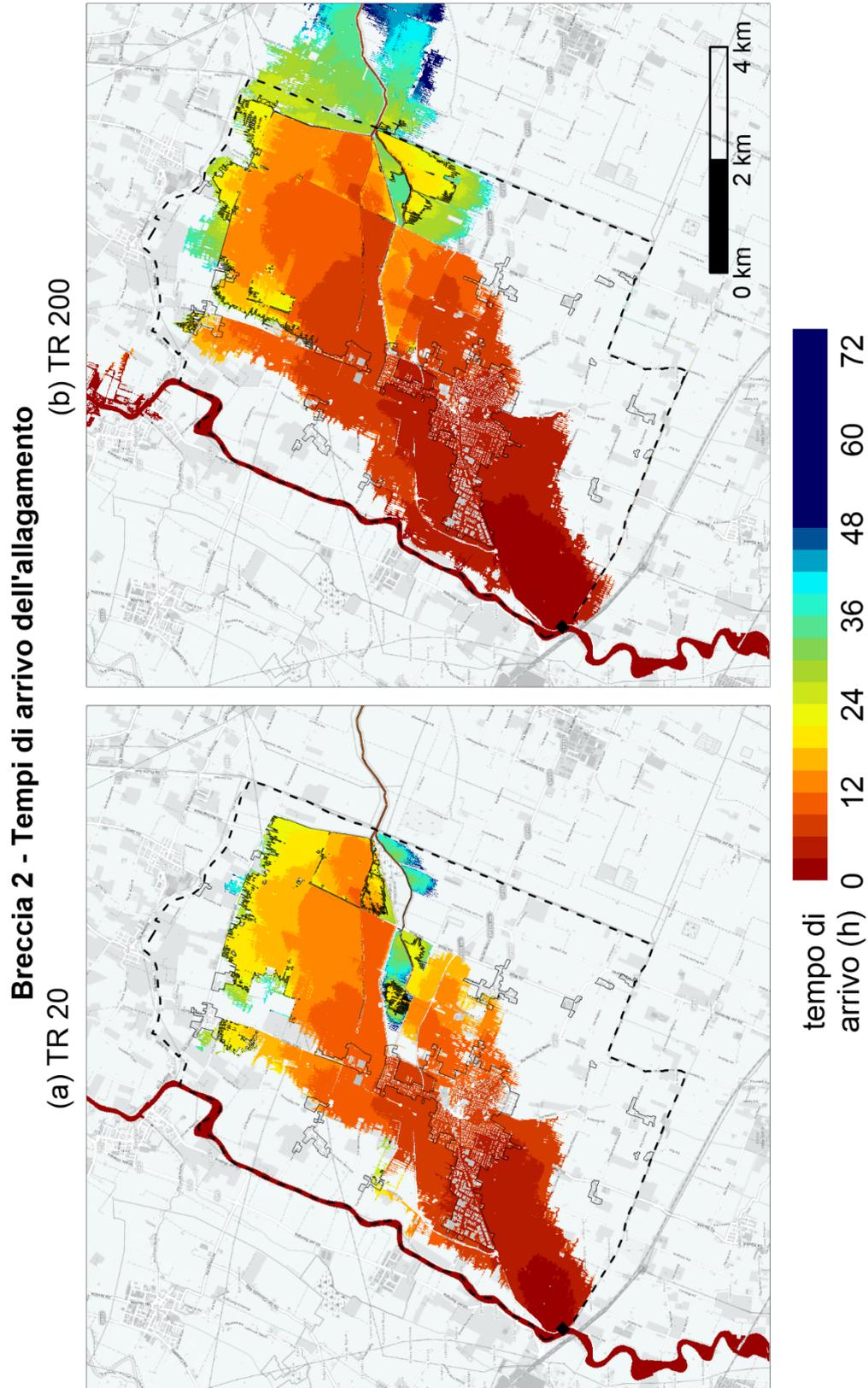


Figura D-22 – Mappa dei tempi di arrivo (in ore) per la Breccia 2.

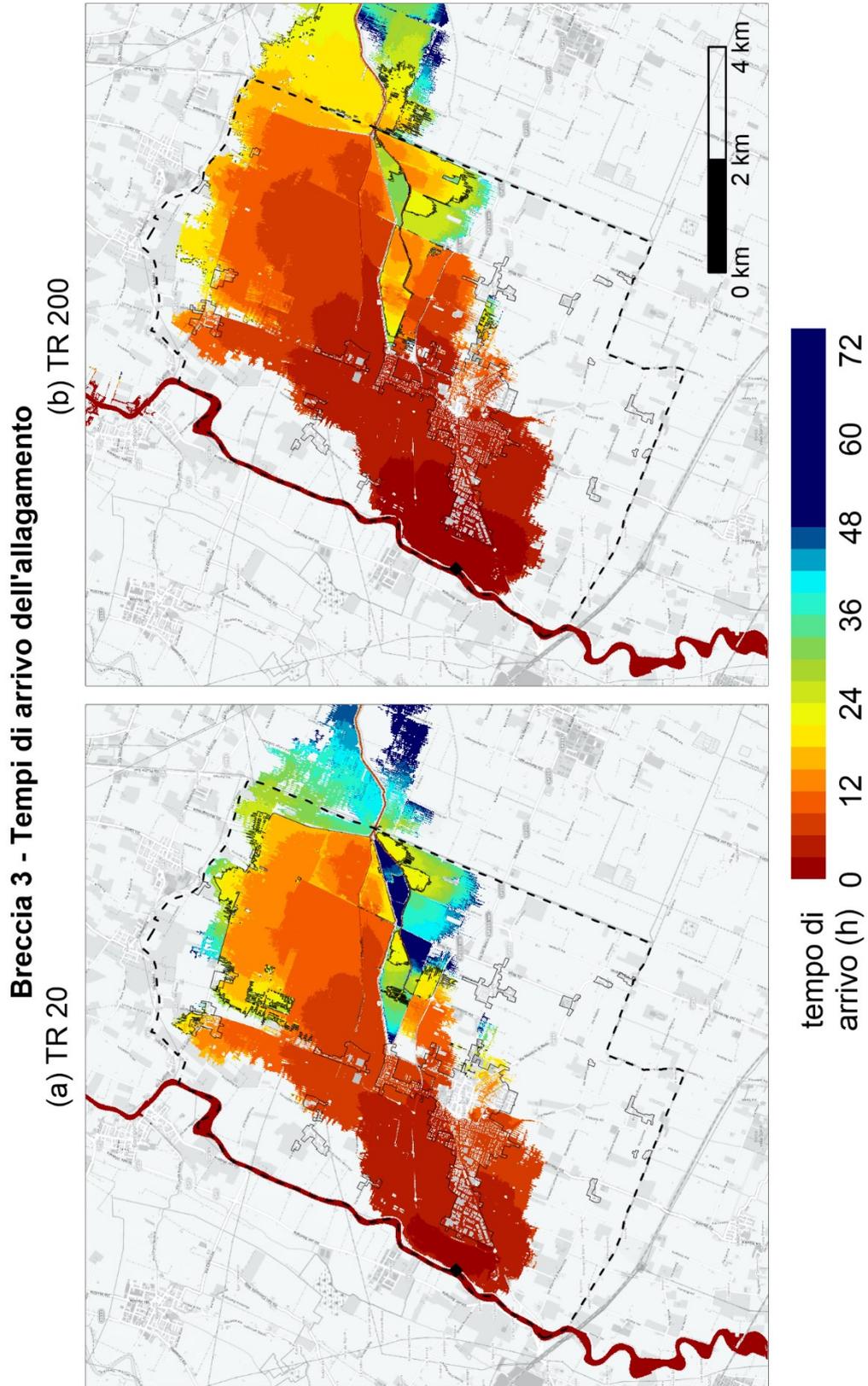


Figura D-23 – Mappa dei tempi di arrivo (in ore) per la Breccia 3.

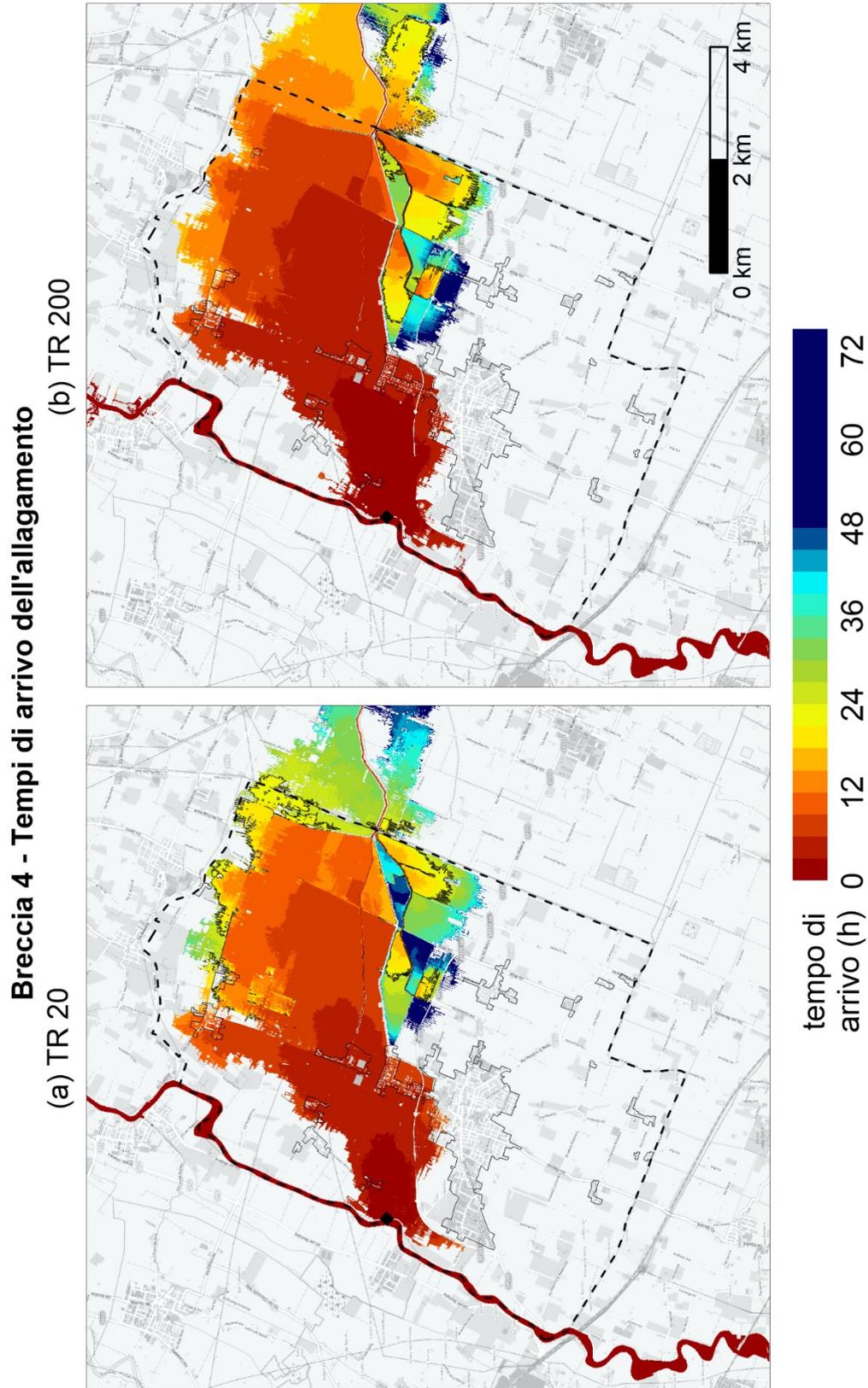


Figura D-24 – Mappa dei tempi di arrivo (in ore) per la Breccia 4.

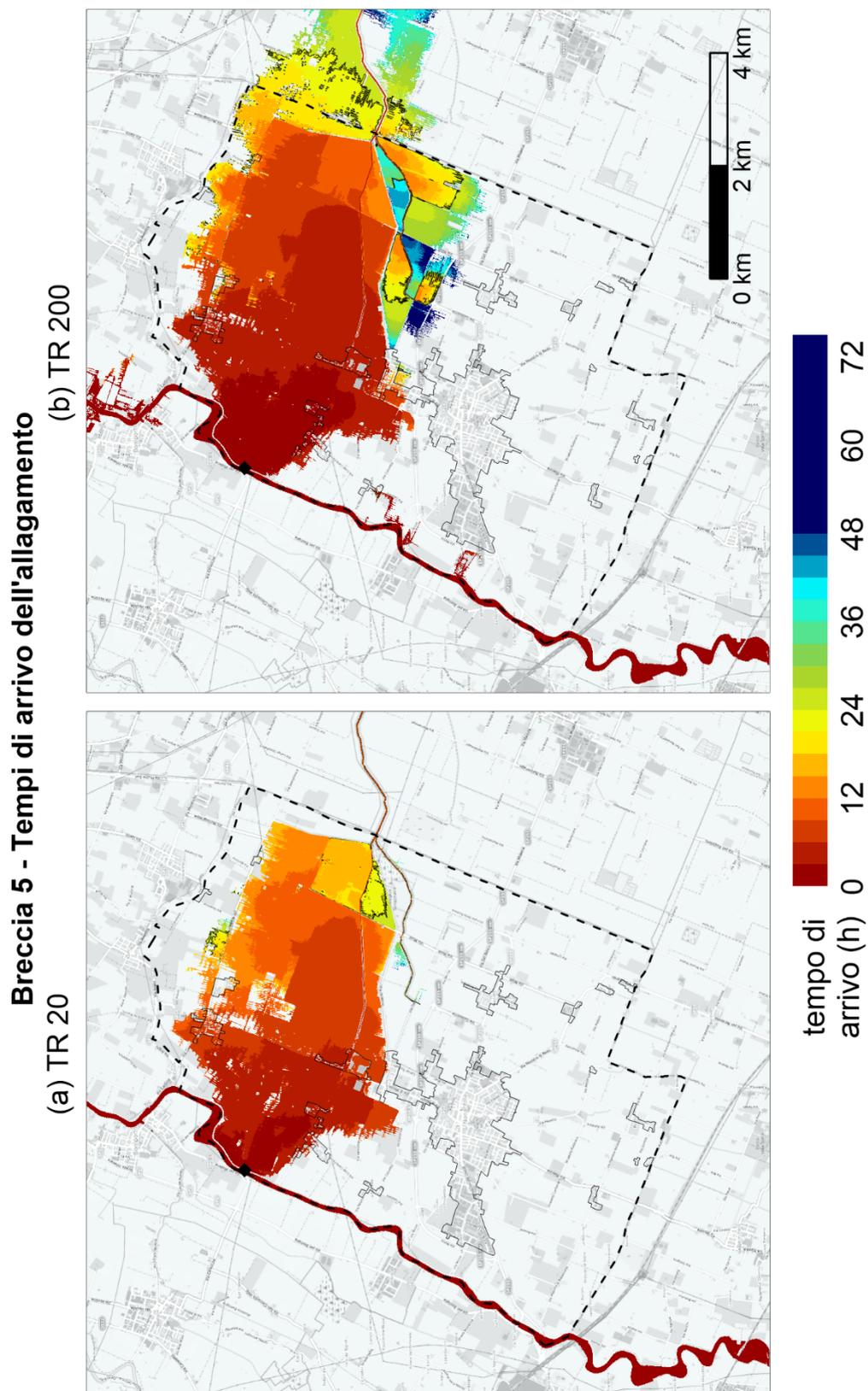


Figura D-25 – Mappa dei tempi di arrivo (in ore) per la Breccia 5.

APPENDICE E. ELENCO DEI PRODOTTI DIGITALI ALLEGATI

1) RELAZIONE:

Copia digitale della presente relazione.

- Relazione_tecnica.pdf

2) SHAPEFILE POSIZIONE BRECCE:

Shapefile che identifica il punto di innesco delle varie brecce simulate sul fiume Panaro.

- Posizione_brecce_PanaroDX.shp (+ .shx, .dbf, .prj)

3) TAVOLE PDF:

Tavole che rappresentano le mappe delle profondità idriche massime per i diversi scenari simulati, in scala 1:25000 e formato PDF.

- TAVOLA 1. Breccia 1 – Profondità idriche massime
- TAVOLA 2. Breccia 2 – Profondità idriche massime
- TAVOLA 3. Breccia 3 – Profondità idriche massime
- TAVOLA 4. Breccia 4 – Profondità idriche massime
- TAVOLA 5. Breccia 5 – Profondità idriche massime
- TAVOLA 6. Inviluppo di tutte le brecce – Profondità idriche massime

4) FILMATI SCENARI DI ALLAGAMENTO:

Filmati in formato MP4 dell'evoluzione degli allagamenti (mappe della profondità idrica restituita con scansione semioraria).

- Filmato_Breccia1_TR20.mp4
- Filmato_Breccia1_TR200.mp4
- Filmato_Breccia2_TR20.mp4
- Filmato_Breccia2_TR200.mp4
- Filmato_Breccia3_TR20.mp4
- Filmato_Breccia3_TR200.mp4
- Filmato_Breccia4_TR20.mp4
- Filmato_Breccia4_TR200.mp4
- Filmato_Breccia5_TR20.mp4
- Filmato_Breccia5_TR200.mp4

5) MAPPE RASTER IN FORMATO GEOTIFF NONANTOLA:

Mappe digitali in formato GeoTiff delle mappe degli inviluppi, geo-referenziate nel sistema di riferimento UTM32_ED50 e limitate al territorio del Comune di Nonantola.

Nonantola_Breccia1_TR20

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia1_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia1_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia1_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia1_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia1_TR200

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia1_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia1_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia1_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia1_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia2_TR20

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia2_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia2_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia2_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia2_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia2_TR200

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia2_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia2_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia2_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia2_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia3_TR20

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia3_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia3_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia3_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia3_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia3_TR200

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia3_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia3_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia3_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia3_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia4_TR20

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia4_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia4_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia4_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia4_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia4_TR200

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia4_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia4_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia4_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia4_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia5_TR20

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia5_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia5_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia5_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia5_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Nonantola_Breccia5_TR200

- Mappa_MAXTIRANTE_Breccia5_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXPROFTOT_Breccia5_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_MAXVEL_Breccia5_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_TEMPOARR_Breccia5_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Inviluppi_Nonantola_TR20

- Mappa_INVILUPPO_MAXTIRANTE_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_INVILUPPO_MAXPROFTOT_TR20_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)

Inviluppi_Nonantola_TR200

- Mappa_INVILUPPO_MAXTIRANTE_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)
- Mappa_INVILUPPO_MAXPROFTOT_TR200_Panaro.tif (+ .prj, .tfw)