

**PIANO STRALCIO DIFESA DALLE ALLUVIONI (PSDA) DEI BACINI  
ABRUZZESI E DEL BACINO INTERREGIONALE DEL FIUME SANGRO**

**AGGIORNAMENTO DELLE AREE DI PERICOLO IDRAULICO DEL  
FIUME ATERNO-PESCARA E AFFLUENTI PER APPROFONDIMENTI  
DEL QUADRO CONOSCITIVO**

**RELAZIONE ILLUSTRATIVA DELLO STUDIO**

**“SVILUPPO E IMPLEMENTAZIONE DELLE INDAGINI IDRAULICHE  
CON APPROCCIO MULTISCALE DELLE UOM IT131 E IT023 PER LA  
DIFESA E LA GESTIONE DEL TERRITORIO – APPLICAZIONE AL CASO  
STUDIO DELL’ATERNO-PESCARA”**

## SOMMARIO

Il presente documento sintetizza gli approcci tecnico-metodologici, i dati ed i risultati impiegati per analizzare gli scenari di esondazione del fiume Pescara ed affluenti e recepirne gli esiti nella pianificazione di bacino costituita dal Piano Stralcio Difesa Dalle Alluvioni (PSDA) dei Bacini Abruzzesi.

A tal fine, è stato implementato uno specifico studio idrologico-idraulico, redatto da parte dell'Università dell'Aquila - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale – nell'ambito di un Accordo con l'Autorità di bacino distrettuale dell'Appennino Centrale.

In particolare, l'attività ha riguardato l'esecuzione di rilievi territoriali per l'aggiornamento dello stato dei luoghi, la revisione delle condizioni idrologiche per gli scenari di piena attesi e la simulazione delle dinamiche idrauliche per riprodurre i fenomeni di esondazione.

Il quadro conoscitivo elaborato consente di aggiornare le condizioni del rischio di esondazione nel bacino del fiume Pescara e di focalizzare alcuni punti di particolare criticità e possibili strategie di mitigazione del rischio.

## INDICE

|  |    |
|--|----|
| 1. Premesse .....                                    | 8  |
| 2. Sintesi dello studio .....                        | 10 |
| 2.1. Obiettivi dello studio.....                     | 10 |
| 2.2. Approccio metodologico.....                     | 10 |
| 2.3. Metodologia numerica.....                       | 10 |
| 2.4. Il quadro di riferimento idrologico.....        | 11 |
| 2.5. Il quadro di riferimento piano altimetrico..... | 14 |
| 2.6. Implementazione delle griglie numeriche .....   | 14 |
| 2.7. Metodologia di restituzione dei risultati ..... | 16 |
| 3. Approccio metodologico .....                      | 18 |
| 3.1. Considerazioni generali .....                   | 18 |
| 3.2. Analisi idrodinamica .....                      | 20 |
| 3.3. Definizione degli scenari di simulazione .....  | 23 |
| 3.4. Sintesi e restituzione dei risultati.....       | 27 |
| 4. Implementazione numerica .....                    | 30 |
| 4.1. Considerazioni generali .....                   | 30 |
| 4.2. Griglie numeriche .....                         | 30 |
| 5. Risultati.....                                    | 36 |
| 5.1. Considerazioni generali .....                   | 36 |
| 5.2. Approfondimenti puntuali .....                  | 37 |
| 5.2.1. La zona aeroportuale di Pescara.....          | 37 |
| 5.2.2. La zona di foce del Pescara .....             | 41 |
| 5.2.3. La zona di località Santa Filomena.....       | 44 |

---

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 5.2.4. | La zona delle vasche di laminazione del fiume Aterno-Raio ..... | 47 |
| 5.2.5. | La zona di Popoli.....  | 47 |
|        | Riferimenti Bibliografici .....                                 | 49 |

## LISTA DELLE TABELLE

|   |    |
|---|----|
| Tabella 2-1: Valori della portata al colmo degli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno..... | 13 |
| Tabella 4-1: Sintesi delle caratteristiche principali delle griglie computazionali.....         | 35 |

## LISTA DELLE TABELLE

|   |    |
|---|----|
| Figura 2-1: Localizzazione delle sezioni in corrispondenza delle quali sono state stimate le portate per assegnati tempi di ritorno. ....   | 13 |
| Figura 2-2: Aste fluviali riprodotte numericamente. ....  | 15 |
| Figura 2-3: Domini di calcolo implementati. ....  | 16 |
| Figura 3-1: Risultato del primo passo di applicazione del metodo di stima del contributo distribuito. .   | 26 |
| Figura 3-2: Risultato del secondo passo di applicazione del metodo di stima del contributo distribuito.<br>.....  | 27 |
| Figura 4-1: Estensione geografica dei nuovi rilievi LiDAR.....  | 31 |
| Figura 4-2: Localizzazione delle sezioni rilevate a terra.....  | 32 |
| Figura 4-3: Aste fluviali riprodotte numericamente. ....  | 33 |
| Figura 4-4: Domini di calcolo implementati. ....  | 34 |
| Figura 5-1: Perimetrazione del PSDA (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde). Nella mappa sono indicati i due sottopassaggi a cui sono verosimilmente dovute le differenze rilevate rispetto all'aggiornamento. ....                 | 38 |
| Figura 5-2: Perimetrazione individuata nell'aggiornamento (P4 - rosso, P3 - arancione). ....  | 38 |
| Figura 5-3: Sottopasso di via Raiale per l'accesso sull'asse attrezzato (Raccordo Autostradale Pescara-Chieti). ....  | 39 |
| Figura 5-4: Sottopasso di via Raiale all'asse attrezzato (Raccordo Autostradale Pescara-Chieti).....  | 39 |
| Figura 5-5: Perimetrazione ottenuta nell'ambito del presente studio (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde) nella configurazione attuale dei sottopassi (1 e 2 in Figura 5-1). ....   | 40 |
| Figura 5-6: Perimetrazione ottenuta nell'ambito del presente studio (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde) che prevede l'installazione di porte stagne in corrispondenza dei sottopassi (1 e 2 in Figura 5-1).....                 | 40 |
| Figura 5-7: Attuale configurazione della foce fluviale del Pescara (mappa in alto) e Piano Regolatore Portuale vigente (mappa in basso). Il Nord coincide con l'asse verticale delle mappe. ....  | 42 |
| Figura 5-8: Inizio del processo di esondazione per l'idrogramma con tempo di ritorno pari a 50 anni (così come ottenuto nel presente studio) in corrispondenza dell'area in cui il PRP prevede un incremento delle quote della sponda destra..... | 43 |

Figura 5-9: Fasce di pericolosità. In alto sono riportati i risultati ottenuti in configurazione attuale, in basso quelli in configurazione futura (considerando gli effetti delle vasche di Cepagatti, della chiusura dei sottopassaggi in corrispondenza dell'area aeroportuale, delle opere previste dal PRP del porto di Pescara). ..... 45

Figura 5-10: Fasce di pericolosità in Località Santa Filomena. In alto sono riportati i risultati ottenuti in configurazione attuale, in basso quelli in presenza di ipotetici presidi idraulica a difesa dell'area commerciale. .... 46

Figura 5-11: Identificazione di punti in cui ha origine il processo di esondazione nei pressi del comune di Popoli..... 48

## 1. PREMESSE

L'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale e l'Università degli Studi dell'Aquila, per il tramite del gruppo di ricerca del Laboratorio di Idraulica Ambientale e Marittima del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale, hanno sottoscritto un accordo istituzionale di collaborazione.

L'accordo, volto all'aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico e idraulico in parola, mira a raggiungere i seguenti obiettivi.

- Obiettivo n. 1: aggiornamento e verifica del quadro conoscitivo della configurazione del terreno tramite il rilievo delle aste fluviali di interesse, e delle relative aree pertinenziali, effettuato con tecniche e strumentazioni adeguate.
- Obiettivo n. 2: verifica ed eventuale aggiornamento del quadro conoscitivo idrologico delle aree di interesse.
- Obiettivo n. 3: utilizzo di un approccio multiscala e multifisico per la riproduzione del deflusso fluviale considerando anche, nelle aree di foce, l'interazione tra deflusso fluviale e l'idrodinamica costiera (con particolare riferimento al sovrizzo idrico indotto dalla componente meteorologica, dalla componente astronomica e dalla componente indotta dalle onde).

L'area di riferimento è l'Unità di Gestione ITR131 denominata "Regionale Abruzzo" all'interno del Distretto idrografico dell'Appennino centrale così come definito ai sensi della L. 221/2015. In particolare, le attività riguardano il Fiume Tordino e il Fiume Aterno-Pescara, compreso il suo affluente Sagittario. Per quanto attiene l'Obiettivo n. 1, le analisi si estendono anche al Fiume Vomano.

Questa relazione, in merito all'Obiettivo n.3, mira a descrivere l'approccio metodologico dell'analisi idrodinamica, i dati di riferimento e i risultati ottenuti per il caso studio del bacino del Fiume Aterno-Pescara.

In particolare:

- il Capitolo §2 sintetizza le caratteristiche dello studio;

- il Capitolo §3 illustra nel dettaglio l'approccio metodologico dello studio;
- il Capitolo §4 sintetizza l'implementazione numerica;
- il Capitolo §5 sintetizza i risultati ottenuti.

In allegato si riportano, in versione grafica, i risultati dello studio. Inoltre, è da ritenersi parte integrante di questo documento, un progetto QGIS che permette la consultazione agevole dei risultati.

## 2. SINTESI DELLO STUDIO

### 2.1. OBIETTIVI DELLO STUDIO

L'obiettivo principale delle attività effettuate sinergicamente dall'Università e dall'Autorità consiste nella verifica e aggiornamento del quadro idrodinamico dei bacini idrografici che ricadono nel territorio della Regione Abruzzo. In particolare, le attività si basano sull'utilizzo delle più aggiornate informazioni in termini di quadro idrologico e di configurazione del terreno.

### 2.2. APPROCCIO METODOLOGICO

Gli obiettivi dello studio sono raggiunti tramite l'applicazione di modellazione numerica mirata alla riproduzione delle caratteristiche idrodinamiche bidimensionali del processo fisico di esondazione.

A tal proposito, si osserva che la caratterizzazione e la quantificazione delle aree potenzialmente allagabili e della conseguente pericolosità idraulica rappresenta un problema di particolare complessità, poiché non può essere analizzato con l'utilizzo di tecniche standard. Infatti, si sottolinea che è importante rappresentare la variazione delle caratteristiche idrodinamiche (profondità e velocità del deflusso) lungo la direzione trasversale e, in misura minore, lungo la direzione verticale al fine di riprodurre l'influenza delle caratteristiche plano-altimetriche del terreno sulle caratteristiche idrodinamiche del deflusso. Pertanto, è difficile accettare l'ipotesi di monodimensionalità del moto ed è necessario ricorrere a modellazioni in grado di rappresentarne la bidimensionalità (nel piano orizzontale). Tale ipotesi non si limita alla sola rappresentazione delle aree inondate, ma è da intendersi relativa anche alle caratteristiche del deflusso nell'alveo inciso che, caratterizzato tipicamente da singolarità planimetriche, è difficilmente inquadrabile come un moto monodimensionale.

La risoluzione numerica permette di conoscere, nei punti computazionali, le caratteristiche quantitative del deflusso. In particolare, sono estratti i valori locali della profondità idrica e del campo di velocità (integrato sulla verticale). Tali informazioni permettono la perimetrazione della pericolosità idraulica e la valutazione qualitativa delle caratteristiche salienti del processo di esondazione.

### 2.3. METODOLOGIA NUMERICA

Per le simulazioni idrodinamiche è stato utilizzato il modello numerico HEC-RAS (versione 6.6), con approccio puramente bidimensionale. Il modello matematico utilizzato, che possiede tutti i requisiti

necessari all'ottenimento di risultati affidabile, è costituito dalle equazioni (bidimensionali) delle acque basse (*Shallow Water Equations, SWE*). Il metodo numerico utilizzato è denominato Euleriano-Lagrangiano (*Eulerian-Lagrangian Method, ELM-SWE*).

La discretizzazione spaziale segue lo schema numerico ai volumi finiti, in cui i valori discreti sono mediati sugli elementi che costituiscono una griglia non strutturata costituita da maglie di diversa forma (griglia computazionale con elementi geometrici che possiedono un numero di spigoli inferiori, o al più uguali, a otto). Le equazioni sono integrate nel tempo utilizzando il metodo di Crank-Nicolson.

La discretizzazione spaziale utilizzata permette di tener conto delle caratteristiche del terreno anche su una scala spaziale inferiore rispetto alla risoluzione della griglia di calcolo. Tale obiettivo è raggiunto con la stima (effettuata nella fase che precede la risoluzione numerica) di alcune caratteristiche idrauliche delle singole maglie che costituiscono la griglia numerica (es. il raggio idraulico, la curva di invaso, etc...).

#### **2.4. IL QUADRO DI RIFERIMENTO IDROLOGICO**

La metodologia e gli schemi di calcolo per la stima degli idrogrammi da utilizzare per le simulazioni idrodinamiche sono stati selezionati in base al contesto idrografico esaminato per rappresentare, nel modo più realistico possibile, le caratteristiche di formazione delle onde di piena, anche a partire dall'attuale quadro conoscitivo desumibile dal Piano Stralcio di Difesa dalle Alluvioni (PSDA).

Gli scenari idrologici considerati sono definiti in funzione della combinazione tra gli di assegnati tempi di ritorno della pianificazione (compresi tra 20 e 500 anni) e un intervallo di variazione delle durate degli eventi meteorici caratteristico dei bacini indagati al fine di fornire una stima affidabile degli idrogrammi di piena più gravosi per le sezioni significative del reticolo idrografico dei bacini in esame.

Le caratteristiche dei deflussi sono state determinate tramite l'applicazione di un modello continuo a parametri distribuiti di trasformazione degli afflussi in deflussi. In particolare, si è utilizzato un modello semi-distribuito per la definizione delle piogge e un modello distribuito (a parametri continui) per la trasformazione degli afflussi in deflussi.

L'applicazione della metodologia ha permesso di disporre degli idrogrammi (variazione temporale della portata) in una serie di sezioni significative del reticolo idrografico (così come mostrato in Figura 2-1).

La **Tabella 2-1** sintetizza i risultati dello studio idrologico, in termini di portata al colmo dell'idrogramma per i tempi di ritorno indagati.

Il quadro idrologico è utile altresì per la definizione della condizione al contorno in corrispondenza della foce. In tal caso è importante conoscere la condizione al contorno di valle rappresentata dal livello del mare. Si sottolinea che le perturbazioni a cui si associano elevati valori della portata di deflusso sono (tipicamente) meteorologicamente diverse da quelle che inducono le variazioni del livello del mare. Pertanto, il tempo di ritorno dei livelli del mare considerate nelle analisi è inferiore rispetto a quello della portata contemporanea. L'analisi delle informazioni per i fiumi della Regione Abruzzo permette di identificare un tempo di ritorno compreso tra 2 e 10 anni da associare a una verosimile condizione al contorno di valle. La stima del tempo di ritorno è stata effettuata utilizzando le informazioni contemporanee relative al livello del mare (tramite l'analisi della serie temporale dei livelli acquisita dalla Stazione Mareografica di Ortona - appartenente alla Rete Mareografica Nazionale) e relative alle portate defluenti. Con un metodo semplificato, è stato correlato il livello del mare con la portata defluente. I risultati hanno evidenziato una lieve variabilità del livello del mare al variare del valore della portata al colmo degli idrogrammi. In altre parole, al variare del tempo di ritorno delle portate, il tempo di ritorno dei livelli del mare rimane sostanzialmente invariato. Si osserva che l'analisi di contemporaneità dei livelli del mare e delle portate è stato effettuato considerando il livello totale. È bene ricordare che tale livello è dato dalla sovrapposizione della componente astronomica (deterministica) e della componente meteorologica (stocastica). Alla luce dei risultati dell'analisi, la condizione al contorno di valle è stata posta a +0.75 m. Ipotizzando una sovrapposizione del livello di alta marea (ad esempio di un valore medio delle alte maree astronomiche in sizigia) con il livello meteorologico, l'analisi ha evidenziato che quest'ultimo è associato ad un tempo di ritorno pari a 2 anni. Analogamente, ipotizzando una sovrapposizione "costruttiva" con la componente astronomica in condizioni di quadratura (ovvero in concomitanza del valore medio delle alte maree astronomiche in quadratura), il tempo di ritorno associato alla componente meteorologica è pari a circa 10 anni.

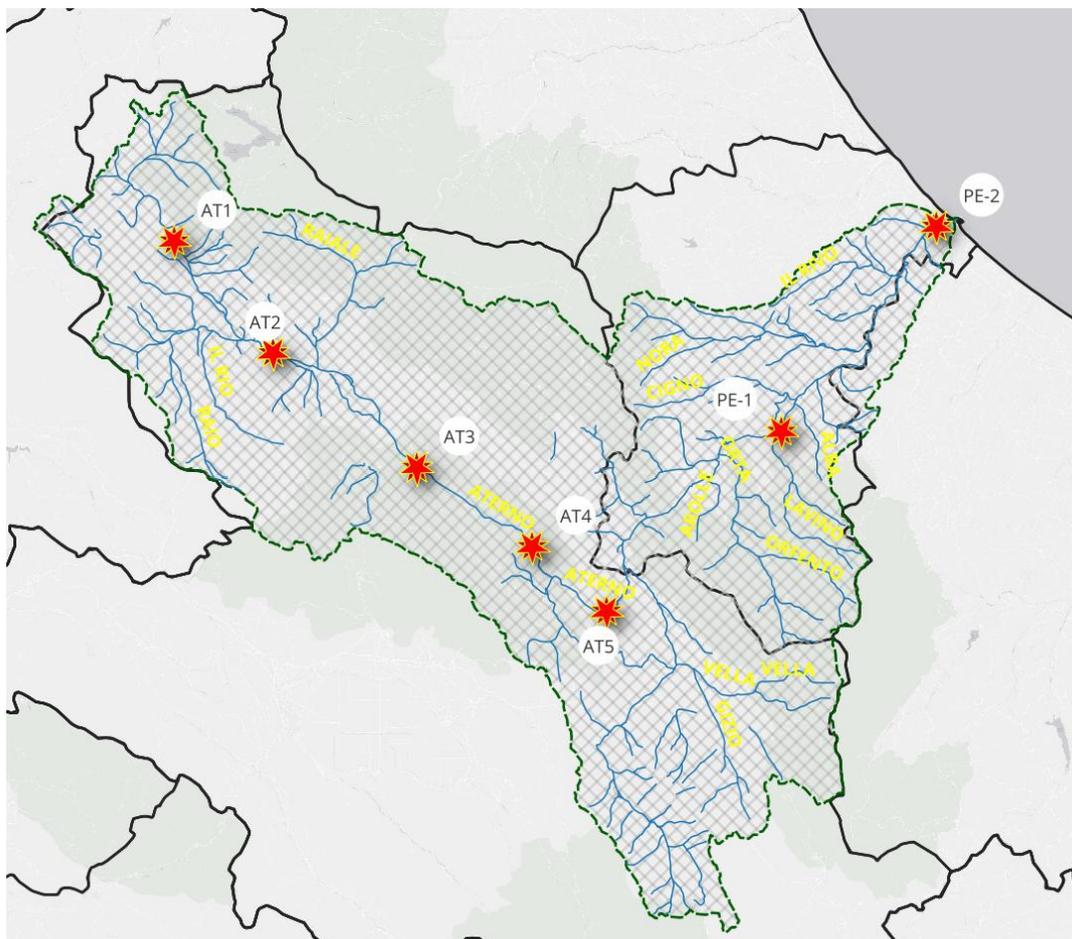


Figura 2-1: Localizzazione delle sezioni in corrispondenza delle quali sono state stimate le portate per assegnati tempi di ritorno.

Tabella 2-1: Valori della portata al colmo degli idrogrammi per assegnato tempo di ritorno.

|             | TR20 | TR50 | TR100 | TR200 | TR500 |
|-------------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>AT1*</b> | 79   | 118  | 150   | 182   | 228   |
| <b>AT2</b>  | 95   | 138  | 175   | 215   | 269   |
| <b>AT3</b>  | 264  | 370  | 456   | 548   | 672   |
| <b>AT4</b>  | 307  | 431  | 534   | 640   | 781   |
| <b>AT5</b>  | 391  | 547  | 676   | 806   | 983   |
| <b>PE1*</b> | 413  | 639  | 828   | 1022  | 1300  |
| <b>PE2*</b> | 818  | 1202 | 1507  | 1822  | 2246  |

## 2.5. IL QUADRO DI RIFERIMENTO PLANO ALTIMETRICO

Per lo studio, sono stati acquisiti nuovi rilievi topografici ed aerei, effettuati ad hoc per l'analisi. In particolare, il reticolo idrografico oggetto di studio (per un'estensione lineare di circa 170 km) è stato rilevato tramite un'applicazione specifica della tecnica LiDAR. Il volo ha riguardato un'area di estensione pari a circa 550 km<sup>2</sup>. Tale tecnica (aerea) ha il pregio di riuscire a fornire informazioni dettagliate riguardo alla configurazione (aggiornata) del terreno. Pertanto, si è acquisito un modello digitale del terreno con risoluzione spaziale pari a 1 m. Il modello digitale del terreno, ottenuto dal rilievo, è stato validato con una serie di misurazioni a terra effettuate con antenna GPS ad alta precisione.

Tuttavia, la tecnica LiDAR non è in grado di misurare (a meno di utilizzare tecniche alternative basate sulla stessa tecnologia) la configurazione batimetrica nelle aree con sommergenza superiore a poche decine di centimetri. Pertanto, con l'obiettivo di conoscere il dettaglio della configurazione batimetrica negli alvei incisi (in particolare quelli caratterizzati da profondità elevate), è stato effettuato un rilievo topo-batimetrico "a terra". Tale rilievo ha riguardato la misura di circa 460 sezioni trasversali, che comprendono anche la misura delle caratteristiche geometriche degli attraversamenti implementati nelle griglie numeriche.

## 2.6. IMPLEMENTAZIONE DELLE GRIGLIE NUMERICHE

L'indagine ha riguardato le aste fluviali mostrate in Figura 2-2.

In particolare, sono stati riprodotti numericamente le seguenti aste fluviali:

- Aterno
- Pescara
- Raio
- Vera-Raiale
- Vella-Gizio-Sagittario
- Tirino
- Lavino
- Orta
- Nora
- Pescara

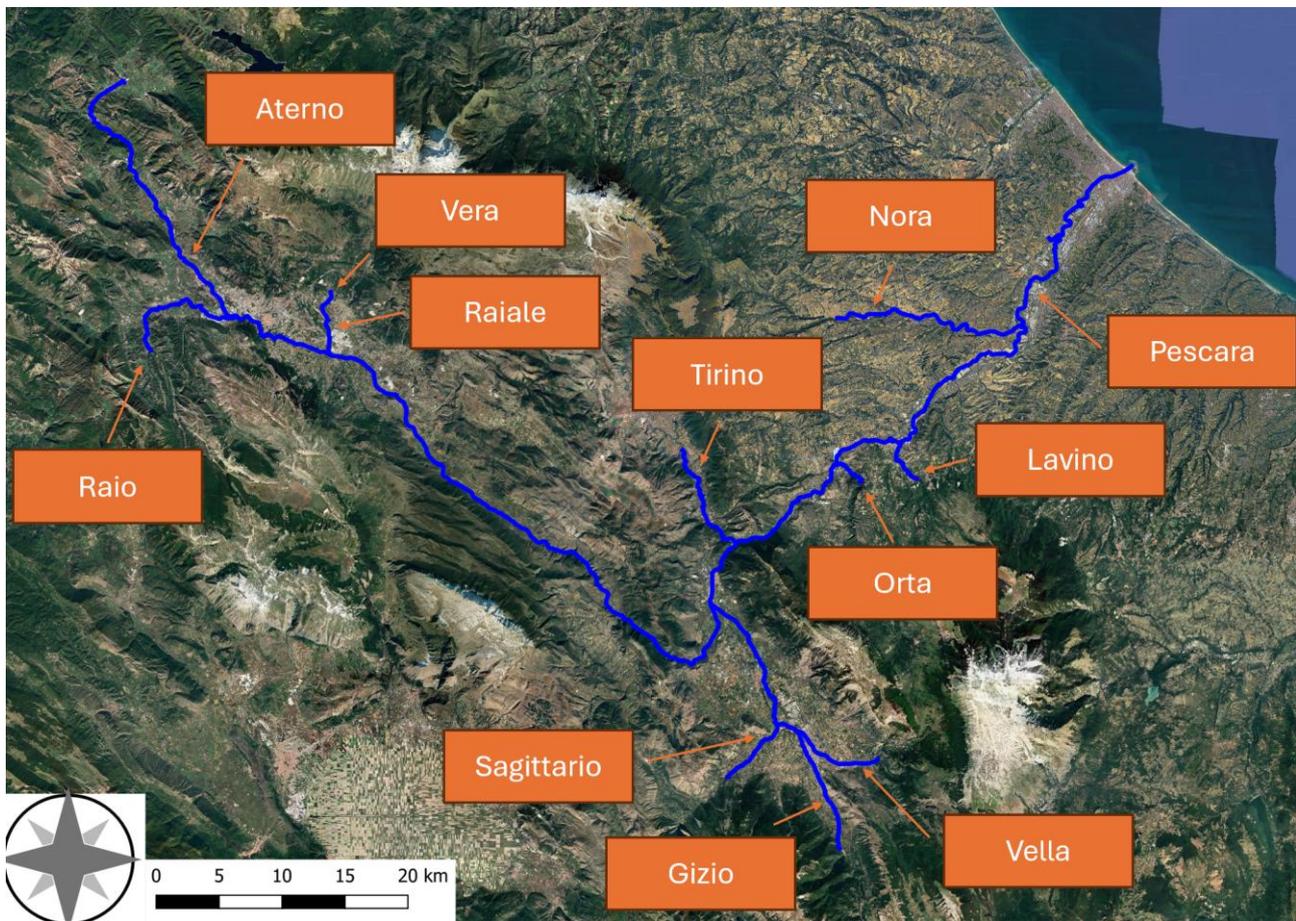


Figura 2-2: Aste fluviali riprodotte numericamente.

Le simulazioni numeriche sono state effettuate implementando una serie di nove griglie. Si sottolinea che le informazioni idrologiche sono riprodotte con approccio disaccoppiato rispetto agli aspetti idraulici e idrodinamici. Pertanto, l'idrologia è rappresentata nell'analisi idrodinamica esclusivamente con la definizione delle condizioni al contorno. Ne consegue che i domini utilizzati per l'analisi di studio sono divisi in tratti idrologicamente omogenei, ovvero per i quali possono essere utilizzate le informazioni desunte dall'analisi idrologica in termini di idrogrammi di piena definiti in corrispondenza del contorno di monte. Al fine di poter riprodurre gli effetti idrologici sull'idrodinamica, con la finalità di rappresentare in modo accurato la propagazione dell'onda di piena, lungo l'alveo inciso si è assegnato un contributo, anch'esso sotto forma di idrogramma (ovvero variabile nel tempo), stimato con l'obiettivo di riprodurre l'informazione idrologica nella sezione di valle (in cui la condizione al contorno non può essere espressa in termini di idrogramma). Pertanto, la necessità di implementare diverse griglie numeriche è motivata dall'informazione idrologica che impone la macro-discretizzazione: le

simulazioni numeriche sono effettuate per diverse zone, procedendo da monte verso valle. Le condizioni al contorno di monte ogni zona sono definite in funzione delle informazioni idrologiche note alla sezione terminale. Al fine di limitare gli effetti al contorno, ogni zona ha un'area di sovrapposizione con quella posta più a monte (a meno, ovviamente, di quella posta più a monte).

La Figura 2-3 mostra l'estensione di ogni dominio di calcolo.

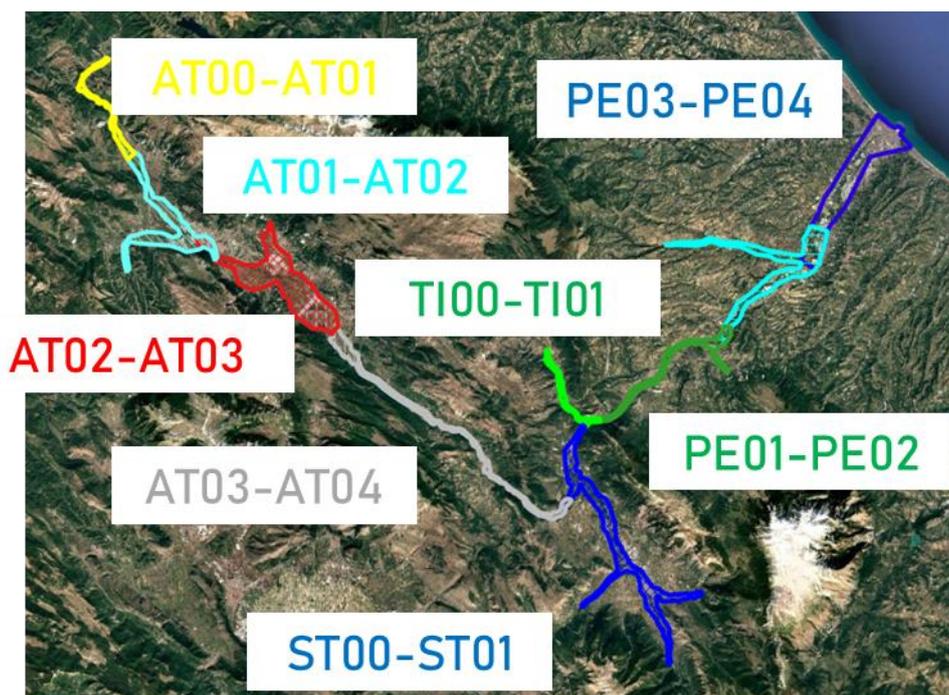


Figura 2-3: Domini di calcolo implementati.

## 2.7. METODOLOGIA DI RESTITUZIONE DEI RISULTATI

Uno dei risultati principali dello studio è costituito dalla perimetrazione delle fasce di pericolosità (a cui si rimanda per i dettagli). La pericolosità è stata perimetrata utilizzando la stessa metodologia utilizzata dal vigente PSDA:

- Pericolosità P4: profondità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 50 anni superiore a 1 m, ovvero velocità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 50 anni superiore a 1 m/s;
- Pericolosità P3: profondità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 50 anni superiore a 0.5 m, profondità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 1 m, ovvero velocità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 1 m/s;

- Pericolosità P2: profondità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 0.0 m
- Pericolosità P1: profondità massima dell'evento con tempo di ritorno pari a 200 anni superiore a 0.0 m

Si osserva che la mera applicazione dei criteri ai risultati numerici porta ad ottenere mappe di pericolosità molto frammentate e di difficile utilizzo ed interpretazione. Pertanto, le mappe calcolate sono state regolarizzate applicando i criteri descritti nel seguito.

- Eliminazione delle aree non pericolose circondate da aree con assegnata pericolosità: in tal caso alle aree "isolate" è stata assegnata una pericolosità pari a quella delle aree circostanti.
- I contorni delle aree sono stati regolarizzati al fine eliminare la dipendenza dalla risoluzione spaziale delle griglie numeriche.
- Le piccole aree (estensione inferiore a 100 m<sup>2</sup> ovvero con rapporto tra estensione e perimetro inferiore a 2) con assegnata pericolosità, prossime ad aree con pericolosità superiore, sono state accorpate a queste ultime.

### 3. APPROCCIO METODOLOGICO

#### 3.1. CONSIDERAZIONI GENERALI

L'obiettivo delle attività, sinergicamente effettuate dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile-Architettura e Ambientale dell'Università degli Studi dell'Aquila e dall'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale, i cui risultati sono descritti in questo documento, sono primariamente riferiti alla valutazione della pericolosità idraulica del Fiume Aterno-Pescara.

I risultati di tali studi sono potenzialmente utilizzabili per l'aggiornamento del quadro conoscitivo posto alla base della pianificazione nel II ciclo del PGRA, misure di controllo e monitoraggio idraulico.

L'obiettivo è raggiunto attraverso la riproduzione numerica del deflusso fluviale associate a tempi di ritorno compresi tra 20 e 500 anni. In particolare, la pericolosità idraulica è valutata utilizzando, per eventi associati a tempi di ritorno compresi tra 50 e 200 anni, gli stessi criteri attualmente definiti dal Piano Stralcio Difesa Alluvioni della Regione Abruzzo (nel seguito indicato semplicemente come PSDA).

La caratterizzazione e la quantificazione delle aree potenzialmente allagabili e della conseguente pericolosità rappresenta un problema di particolare complessità poiché non può essere analizzato con l'utilizzo di tecniche standard. Infatti, si sottolinea come, in questo caso, sia importante rappresentare la variazione delle caratteristiche idrodinamiche (profondità e velocità del deflusso) lungo la direzione trasversale e, in misura minore, lungo la direzione verticale al fine di riprodurre l'influenza della configurazione plano-altimetrica del terreno sulle caratteristiche idrodinamiche del deflusso. Pertanto, è difficile accettare l'ipotesi di monodimensionalità del moto ed è necessario ricorrere a modellazioni in grado di rappresentarne la bidimensionalità (nel piano orizzontale). Tale ipotesi non si limita alla sola rappresentazione delle aree inondate, ma è da intendersi relativa anche alle caratteristiche del deflusso nell'alveo inciso che, caratterizzato tipicamente da singolarità planimetriche, è difficilmente inquadrabile come un moto monodimensionale.

Per le simulazioni idrodinamiche è stato utilizzato il modello numerico HEC-RAS (versione 6.6). Il modello, che rappresenta uno *standard de facto* in ambito di modellazione idraulica, giunto ad un grado

di maturità tale da renderlo applicabile a casi reali, è in grado di risolvere le equazioni bidimensionali delle acque basse (2D SWE).

La discretizzazione spaziale segue lo schema a volumi finiti, in cui i valori discreti sono mediati sugli elementi che costituiscono una griglia non strutturata costituita da maglie di diversa forma con un numero di lati inferiore o al più uguale a otto. Le equazioni sono integrate nel tempo utilizzando il metodo semi-implicito di Crank-Nicolson. Alcuni dettagli del modello sono descritti nel paragrafo §3.2.

L'indagine numerica è effettuata con un approccio multiscala, adatto a trarre informazioni a scale adeguate alla pianificazione del territorio. Tale approccio si fonda sull'incremento del dettaglio delle simulazioni (e dei sopralluoghi mirati) in funzione dei risultati numerici ottenuti.

In particolare, è stata effettuata una prima analisi alla grande scala. In questa prima fase, si è riprodotta l'eterogeneità delle caratteristiche idrauliche che derivano dall'utilizzo del suolo. Nel dettaglio, sono riprodotte macroaree omogenee dal punto di vista dell'utilizzo del suolo e quindi del coefficiente di scabrezza idraulica. Sulla base dei risultati ottenuti alla grande scala, nello specifico in termini di estensione delle aree allagate, si esegue una analisi alla media scala. La finalità del secondo livello di dettaglio dell'analisi consiste nel riprodurre numericamente i dettagli relativi all'utilizzo del suolo (es. presenza di edifici, strade, etc...) limitatamente alle aree individuate nell'ambito della prima fase (alla grande scala). Ulteriore obiettivo è identificare gli attraversamenti fluviali che sono potenzialmente responsabili di un'influenza sul deflusso. In altre parole, le componenti aeree degli attraversamenti (es. gli impalcati) non sono riprodotte nella media scala. I risultati delle simulazioni sono dunque utilizzati per individuare gli attraversamenti i cui impalcati influenzano le caratteristiche del deflusso e che devono essere riprodotti nel terzo livello di dettaglio (piccola scala) attraverso la definizione di specifiche scale di deflusso desunti dalla letteratura e resi disponibili dal modello numerico utilizzato.

Si sottolinea che gli aspetti idrologici (ottenuti nell'ambito dello stesso accordo) sono riprodotti con approccio disaccoppiato rispetto agli aspetti idraulici e idrodinamici. Pertanto, l'idrologia è rappresentata nell'analisi idrodinamica esclusivamente con la definizione delle condizioni al contorno. Ne consegue che i domini utilizzati per l'analisi del fiume (o ancor meglio, dei fiumi) oggetto di studio sono divisi in tratti idrologicamente omogenei, ovvero per i quali possano essere utilizzate le informazioni desunte dall'analisi idrologica in termini di idrogrammi di piena definiti in corrispondenza del contorno di monte e di incremento della portata sino alla sezione di valle.

I risultati delle analisi idrodinamiche sono restituiti in formato discreto (*raster*) contenenti i massimi valori stimati, per ogni simulazione, delle profondità idriche, delle velocità della corrente e della quota della superficie libera, in modo da rendere semplice l'identificazione delle aree allagate. Inoltre, è delineata la perimetrazione a diversa pericolosità idraulica, come già anticipato, così come definito dal PSDA.

### **3.2. ANALISI IDRODINAMICA**

Come già anticipato, la caratterizzazione e la quantificazione delle aree potenzialmente allagabili rappresenta un problema di particolare complessità poiché non può essere analizzato con l'utilizzo di tecniche semplificate (es. monodimensionali).

Per il raggiungimento degli obiettivi dello studio e nel rispetto dell'approccio metodologico, è stato selezionato il modello numerico HEC-RAS (versione 6.6). Il modello è parte integrante del Sistema di Analisi del deflusso fluviale (River Analysis System – RAS) ed è sviluppato dal centro idrologico (Hydrologic Engineering Center - HEC) del corpo militare degli Stati Uniti (US Army Corps of Engineers). In particolare, per le finalità dello studio, è stata utilizzata la componente che risolve il problema transitorio bidimensionale dei deflussi fluviali.

In estrema sintesi, HEC-RAS è un insieme di modelli votato alla riproduzione numerica del deflusso delle acque in regime stazionario (portata costante) o transitorio (idrogrammi di piena), alla conseguente modifica morfodinamica dovuta al trasporto solido di fondo e in sospensione, e alla valutazione degli effetti sulla qualità delle acque. Il modello è implementato sia con approccio monodimensionale, sia con approccio bidimensionale.

In ambito idrodinamico, il modulo numerico bidimensionale risolve le equazioni non lineari delle acque basse. Pertanto, è trascurata la deviazione della distribuzione della pressione da quella idrostatica e le componenti verticali delle velocità sono trascurate. Gli effetti della turbolenza sono riprodotti tramite la definizione di una viscosità cosiddetta "di vortice" che ha l'obiettivo di introdurre un'ulteriore resistenza al moto indotta dalle fluttuazioni (turbolente). Tuttavia, si sottolinea, che tale effetto è trascurato nelle simulazioni effettuate.

I modelli matematici del tipo *delle acque basse* sono in grado di riprodurre una grande varietà di fenomeni fisici. Nello specifico, le equazioni delle acque basse bidimensionali (2D SWE) sono di pratico interesse nei riguardi delle correnti a superficie libera sotto l'influenza della gravità quando le ipotesi di

monodimensionalità influiscono significativamente (e negativamente) sull'affidabilità dei risultati (sinuosità planimetriche dell'alveo inciso, processi di esondazione, etc...).

Le 2D SWE che governano il problema sono ottenute imponendo la conservazione della massa e la conservazione della quantità di moto per un flusso a superficie libera che si verifica assumendo l'invariabilità della configurazione del fondo e imponendo le seguenti ipotesi:

- l'acqua è assunta incomprimibile;
- l'accelerazione verticale delle particelle di acqua è assunta trascurabile comparata con la componente longitudinale; ne consegue che la pressione dinamica è distribuita idrostaticamente;
- la pendenza del fondo è piccola;
- il regime del flusso è assolutamente turbolento, per cui le dissipazioni energetiche, correlate principalmente all'attrito sul fondo, sono proporzionali al quadrato dell'intensità di velocità del flusso.

Introducendo un sistema di riferimento Cartesiano (Oxyz) nel quale l'asse z è diretto lungo la verticale (parallela alla direzione di azione della gravità) e il piano x-y è ortogonale alla direzione verticale, il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali può scriversi come segue:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = S_h$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + g h (S_{bx} + S_{fx}) + T_x = 0$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + g h (S_{by} + S_{fy}) + T_y = 0$$

nelle quali:

- h (m): profondità del deflusso;
- g (m/s<sup>2</sup>): accelerazione di gravità;
- u(v) (m/s): velocità mediata sulla profondità in direzione x(y)
- q<sub>x</sub> (q<sub>y</sub>) (m<sup>2</sup>/s): portata per unità di larghezza in direzione x (y)
- S<sub>h</sub> (m/s): portata laterale per unità di larghezza
- S<sub>fx</sub> (S<sub>fy</sub>) (-): termini di attrito in direzione x (y)

- $T_x$  ( $T_y$ ) (-): termini turbolenti in direzione x (y)

I termini relativi alla pendenza ( $S_{bx}$ ,  $S_{by}$ ) sono definiti in funzione della quota del fondo:

$$S_{bx} = -\frac{\partial z_B}{\partial x}; S_{by} = -\frac{\partial z_B}{\partial y}$$

nella quale  $z_B$  è la quota del fondo espressa rispetto a un predefinito datum (generalmente coincidente con il livello medio del mare).

Per risolvere il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali è necessario specificare le relazioni di chiusura per i termini di attrito ( $S_{fx}$ ,  $S_{fy}$ ), i termini turbolenti ( $T_x$ ,  $T_y$ ), il valore della portata laterale per unità di larghezza ( $S_h$ ).

Inoltre, è necessario imporre adeguate condizioni al contorno a cui è possibile associare condizioni imposte all'interno del dominio di calcolo.

Per lo studio in epigrafe, sono di interesse le condizioni al contorno (la cosiddetta frontiera del dominio di calcolo), in corrispondenza degli attraversamenti che interferiscono con il deflusso fluviale e, infine, le condizioni imposte lungo l'alveo inciso per riprodurre l'incremento della portata procedendo verso valle (ovvero la stima del termine  $S_h$ ).

In particolare, sono state utilizzate le seguenti condizioni al contorno:

- imposizione dell'idrogramma di piena in ingresso nel dominio di calcolo come condizione al contorno di monte (e desunta dai risultati dello studio idrologico);
- imposizione del livello idrico in uscita al dominio di calcolo come condizione al contorno di valle in corrispondenza della foce (e desunta dai risultati dello studio idrologico);
- imposizione della condizione di libera uscita del flusso nei tratti terminali delle diverse zone in cui è stata suddivisa l'intera area in esame;
- scala di deflusso in corrispondenza delle infrastrutture che interferiscono con il deflusso fluviale (ovvero gli attraversamenti);
- portata distribuita lungo l'asta fluviale, intesa come contributo laterale, per simulare la formazione e la propagazione dell'onda di piena.

Lo scopo delle simulazioni numeriche è di risolvere le equazioni che governano il problema in corrispondenza di una serie di nodi computazionali che costituiscono la griglia numerica. Il dominio

computazionale è discretizzato tramite l'implementazione di una griglia non strutturata composta di elementi di forma variabile, ma con un numero di lati inferiore, o al più uguale, a otto. Per le equazioni di conservazione, la discretizzazione spaziale segue lo schema a volumi finiti, in cui i valori discreti sono mediati su volumi finiti della griglia, mentre per la discretizzazione temporale è usato uno schema semi-implicito di Crank-Nicolson. È opportuno sottolineare che il modello numerico implementa una tecnica numerica in grado di riprodurre, seppur parzialmente, la configurazione topo-batimetrica ad una scala spaziale inferiore rispetto a quella degli elementi utilizzati per discretizzare il dominio di calcolo (Casulli, 2008). In sintesi, ogni cella computazionale contiene alcune informazioni aggiuntive (es. raggio idraulico, volume e area della sezione trasversale, relazione tra profondità e volume idrico) che possono essere calcolate preliminarmente alla risoluzione numerica dell'equazioni che governano il problema utilizzando le informazioni topo-batimetriche con risoluzione nativa (nel caso specifico, pari a 1 m). In questo modo, la configurazione topo-batimetrica non viene utilizzata (per limitare i costi computazionali), ma vengono utilizzate alcune informazioni di sintesi (da essa derivanti) affinché il metodo numerico possa tenerne conto nella risoluzione della conservazione della massa.

Per i dettagli delle equazioni risolte dal modello e delle condizioni al contorno si rimanda a Brunner (2020).

### **3.3. DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI SIMULAZIONE**

Come anticipato (si veda il paragrafo §3.1), l'indagine numerica è effettuata con un approccio multiscala, adatto a trarre informazioni a scale adeguate rispetto alle finalità dello studio.

Per quanto riguarda gli aspetti idrologici, gli scenari di simulazione di cui sopra, sono stati valutati per cinque diversi tempi di ritorno: 20 anni, 50 anni, 100 anni, 200 anni e 500 anni. Tale diversità è rappresentata dagli idrogrammi in ingresso nel dominio e in quelli distribuiti lungo il corso del fiume. Si sottolinea che gli aspetti idrologici (descritti nella relazione “D2.1 - Aggiornamento Studio Idrologico - Relazione tecnico-metodologica - Applicazione al caso studio dell'Aterno-Pescara” redatta nell'ambito dell'accordo) sono riprodotti con approccio disaccoppiato rispetto agli aspetti idraulici e idrodinamici. Pertanto, l'idrologia è rappresentata nell'analisi idrodinamica esclusivamente con la definizione delle condizioni al contorno. Ne consegue che i domini utilizzati per l'analisi dei Fiumi oggetto di studio sono divisi in tratti idrologicamente omogenei, ovvero per i quali possono essere utilizzate le informazioni desunte dall'analisi idrologica in termini di idrogrammi di piena definiti in corrispondenza del contorno di monte e di incremento della portata sino alla sezione di valle.

Più nel dettaglio, l'idrologia è rappresentata nell'analisi idrodinamica esclusivamente con la definizione delle condizioni al contorno. Ne consegue che i domini utilizzati per l'analisi di studio sono divisi in tratti idrologicamente omogenei, ovvero per i quali possono essere utilizzate le informazioni desunte dall'analisi idrologica in termini di idrogrammi di piena definiti in corrispondenza del contorno di monte. Al fine di poter riprodurre gli effetti idrologici sull'idrodinamica, con la finalità di rappresentare in modo accurato la propagazione dell'onda di piena, lungo l'alveo inciso si è assegnato un contributo, anch'esso sotto forma di idrogramma (ovvero variabile nel tempo), stimato con l'obiettivo di riprodurre l'informazione idrologica nella sezione di valle (in cui la condizione al contorno non può essere espressa in termini di idrogramma). Pertanto, la necessità di implementare diverse griglie numeriche è motivata dall'informazione idrologica che impone la macro-discretizzazione: le simulazioni numeriche sono effettuate per diverse zone, procedendo da monte verso valle. Le condizioni al contorno di monte ogni zona sono definite in funzione delle informazioni idrologiche note alla sezione terminale. Al fine di limitare gli effetti al contorno, ogni zona ha un'area di sovrapposizione con quella posta più a monte (a meno, ovviamente, della prima area di monte).

Un elemento di attenzione è rappresentato dalla definizione quantitativa del contributo mirato a riprodurre l'incremento (idrologico) della portata procedendo verso valle. Tale contributo deve permettere di riprodurre, in ogni tratto di alveo simulato, il valore della portata associato al tempo di ritorno considerato. E' da notare che l'incremento della portata procedendo verso valle, per assegnato tempo di ritorno, è soltanto legato sia all'incremento dell'area sottesa alle sezioni localizzate via via sempre più in basso, ma anche alla modifica delle caratteristiche dell'evento critico (in particolare in termini di durata). Con l'obiettivo di stimare quantitativamente la variazione temporale del contributo da assegnare lungo l'alveo inciso (ovvero il termine  $S_h$  nell'equazione di continuità), è stato applicato un metodo semplificato di origine idrologica. In particolare, siano definite due sezioni idrologiche (S1 e S2) in corrispondenza delle quali sono noti gli idrogrammi dallo studio idrologico (siano Q1 e Q2). E' possibile calcolare il contributo necessario affinché l'idrogramma Q1 si trasformi nell'idrogramma Q2 tramite l'applicazione del metodo (idrologico) di Muskingum:

$$Q_2^{(n+1)} = C_0 Q_1^{(n+1)} + C_1 Q_1^{(n)} + C_2 Q_2^{(n)} + (1 - C_2) S_h^{(n+1)} \Delta x$$

nella quale:

$$C_0 = \frac{\Delta t - 2\mathcal{K}\mathcal{X}}{\Delta t + 2\mathcal{K}(1 - \mathcal{X})}$$

$$C_1 = \frac{\Delta t + 2\mathcal{K}\mathcal{X}}{\Delta t + 2\mathcal{K}(1 - \mathcal{X})}$$

$$C_2 = \frac{-\Delta t + 2\mathcal{K}(1 - \mathcal{X})}{\Delta t + 2\mathcal{K}(1 - \mathcal{X})}$$

ove  $\Delta x$  e  $\Delta t$  sono, rispettivamente, la distanza tra le due sezioni S1 e S2 e la risoluzione temporale degli idrogrammi. Il coefficiente  $\mathcal{K}$  ha le dimensioni di un tempo e si può dimostrare che coincide con il tempo necessario affinché l'idrogramma si propaghi dalla sezione di monte a quella di valle che si sta considerando. Il coefficiente adimensionale  $\mathcal{X}$  è un fattore di peso, con valore compreso tra 0.0 e 0.5, che indica l'importanza della dinamica nella propazione dell'idrogramma. La determinazione del valore da assegnare ai parametri  $\mathcal{K}$  e  $\mathcal{X}$  può essere effettuata sulla base delle misure degli idrogrammi nella sezione di monte e di valle del tratto di interesse. Nel caso in esame, le stime idrologiche sono utilizzate per valutare sia i valori di  $\mathcal{K}$  e  $\mathcal{X}$ , sia il valore di  $S_h$ . Il metodo di stima è diviso in due diversi passi. Nel primo, si ipotizza che non ci sia un contributo tra le due sezioni. In questo modo si identificano i valori di  $\mathcal{K}$  e  $\mathcal{X}$  che permettono di ottenere nella sezione di valle (S2) la stessa "fase" dell'idrogramma. In sostanza, con un metodo di ottimizzazione numerica, si cercano i valori di  $\mathcal{K}$  e  $\mathcal{X}$  che permettono di osservare il massimo dell'idrogramma calcolato in S2 con quello stimato idrologicamente nella stessa sezione. Al termine della prima fase di applicazione del metodo, tuttavia, il valore al colmo dell'idrogramma non può essere lo stesso. Pertanto, nella seconda fase, si identifica il valore di  $S_h$  che permette di stimare un valore al colmo uguale (e contemporaneo) a quello ottenuto dallo studio idrologico. Si evidenzia che il metodo può essere utilizzato anche per sezioni intermedie (tra S1 e S2) considerando la variazione (ovvero l'incremento) dell'estensione del bacino idrografico sotteso. In questo modo, è possibile tener conto della non linearità dell'incremento della portata, dipendente dalla variazione (non lineare) dell'incremento dell'estensione dei bacini idrografici sottesi.

A titolo di esempio, si mostra un'applicazione del metodo. La Figura 3-1 mostra il risultato del primo passo. Noti gli idrogrammi Q1 e Q2 dallo studio idrologico, si stimano i valori di  $\mathcal{K}$  e  $\mathcal{X}$  che permettono di stimare un idrogramma (Q2 stimata nella legenda in figura) il cui massimo avviene nello stesso istante dell'idrogramma Q2. La Figura 3-2 mostra il risultato del secondo passo, che permette di quantificare il contributo tra le due sezioni affinché si abbia anche lo stesso valore al colmo dell'idrogramma calcolato.

La definizione della condizione al contorno di valle richiede una discussione dedicata. Nella zona che rappresenta il tratto terminale del corso d'acqua, in corrispondenza della foce, la condizione al

contorno di valle è rappresentata dal livello del mare. Si sottolinea che le perturbazioni a cui si associano elevati valori della portata di deflusso sono (tipicamente) meteorologicamente diverse da quelle che inducono le variazioni del livello del mare. Pertanto, il tempo di ritorno dei livelli del mare considerate nelle analisi è inferiore rispetto a quello della portata contemporanea. L'analisi delle informazioni per i fiumi della Regione Abruzzo permette di identificare un tempo di ritorno compreso tra 2 e 10 anni da associare a una verosimile condizione al contorno di valle.

La stima del tempo di ritorno è stata effettuata utilizzando le informazioni contemporanee relative al livello del mare (tramite l'analisi della serie temporale dei livelli acquisita dalla Stazione Mareografica di Ortona - appartenente alla Rete Mareografica Nazionale) e relative alle portate defluenti. Con un metodo semplificato, è stato correlato il livello del mare con la portata defluente. I risultati hanno evidenziato una lieve variabilità del livello del mare al variare del valore della portata al colmo degli idrogrammi. In altre parole, al variare del tempo di ritorno delle portate, il tempo di ritorno dei livelli del mare rimane sostanzialmente invariato. Si osserva che l'analisi di contemporaneità dei livelli del mare e delle portate è stato effettuato considerando il livello totale.

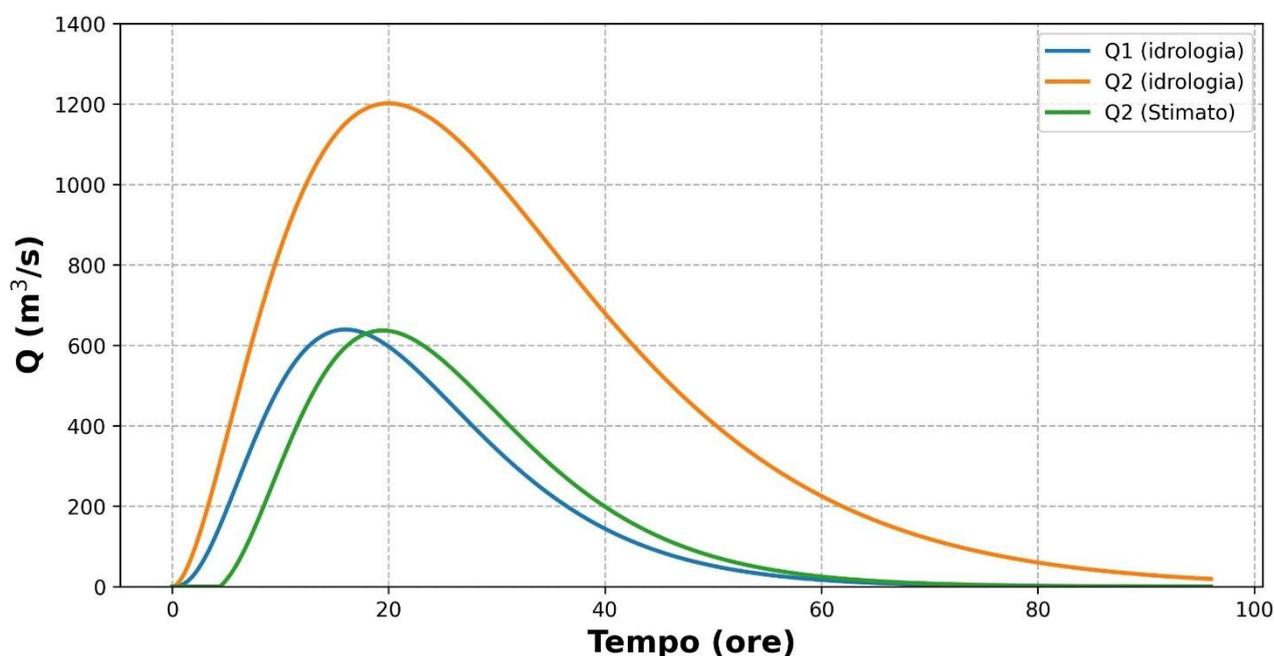


Figura 3-1: Risultato del primo passo di applicazione del metodo di stima del contributo distribuito.

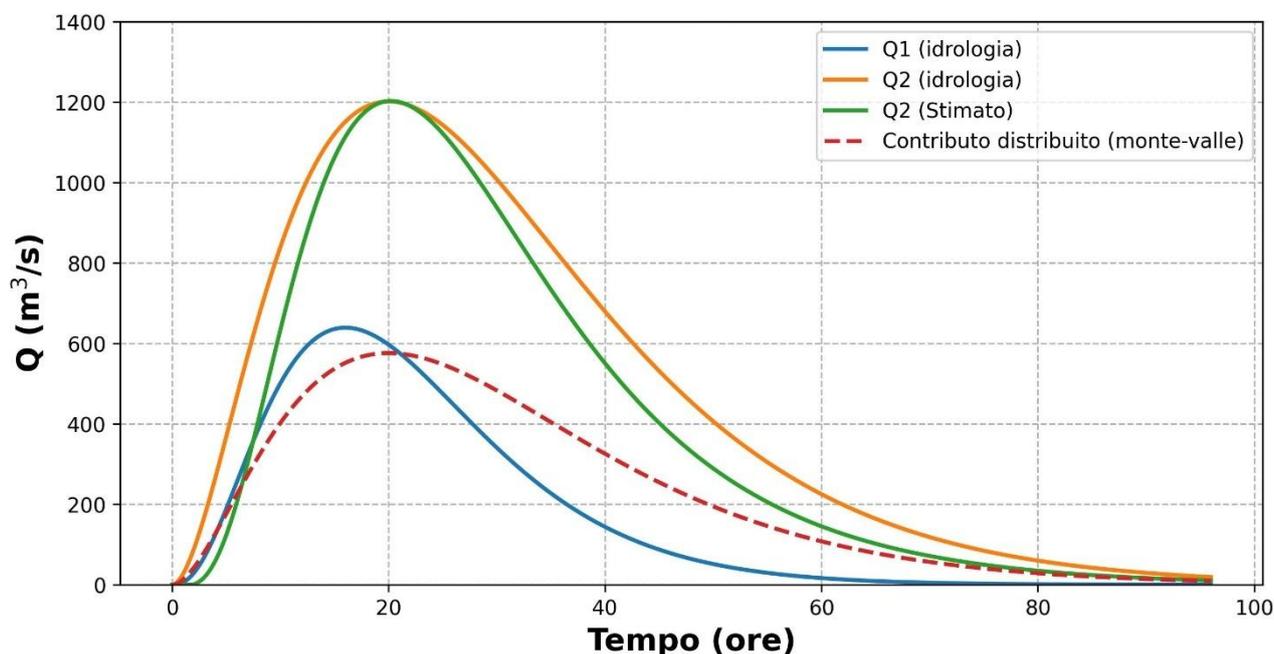


Figura 3-2: Risultato del secondo passo di applicazione del metodo di stima del contributo distribuito.

È bene ricordare che tale livello è dato dalla sovrapposizione della componente astronomica (deterministica) e della componente meteorologica (stocastica). Alla luce dei risultati dell'analisi, la condizione al contorno di valle è stata posta a +0.75 m. Ipotizzando una sovrapposizione del livello di alta marea (ad esempio di un valore medio delle alte maree astronomiche in sizigia) con il livello meteorologico, l'analisi ha evidenziato che quest'ultimo è associato ad un tempo di ritorno pari a 2 anni. Analogamente, ipotizzando una sovrapposizione "costruttiva" con la componente astronomica in condizioni di quadratura (ovvero in concomitanza del valore medio delle alte maree astronomiche in quadratura), il tempo di ritorno associato alla componente meteorologica è pari a circa 10 anni.

### 3.4. SINTESI E RESTITUZIONE DEI RISULTATI

L'applicazione diretta della modellazione numerica permette di ottenere, per i diversi scenari di simulazione, le caratteristiche del deflusso in corrispondenza dei nodi di calcolo. Nel particolare, sono disponibili i valori locali (ovvero, in corrispondenza di ogni nodo di calcolo) di profondità (ovvero di quota della superficie libera), di intensità di velocità, di direzione della velocità.

Tali informazioni permettono di caratterizzare il deflusso da un punto di vista fisico (es. connessioni idrauliche, interazione con i corpi arginali, effetti locali degli attraversamenti, etc...). Tuttavia, a causa della intrinseca complessità dei fenomeni, è di difficile utilizzabilità per fini di gestione del territorio.

Con lo scopo di quantificare il "pericolo" associato alle caratteristiche di deflusso esistono diverse metodologie. Nel caso specifico del PSDA, le classi di pericolosità sono definite come segue:

- *Pericolosità molto elevata (P4)*: profondità locale in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 50 anni superiore a 1.0 m, oppure intensità di velocità in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 50 anni superiore a 1.0 m/s;
- *Pericolosità elevata (P3)*: profondità locale in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 50 anni compreso tra 0.5 m e 1.0 m oppure profondità locale in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 1.0 m, oppure intensità di velocità in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 1.0 m/s;
- *Pericolosità media (P2)*: profondità locale in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 100 anni superiore a 0.0 m;
- *Pericolosità moderata (P1)*: profondità locale in occasione dello scenario con tempo di ritorno pari a 200 anni superiore a 0.0 m.

Tale metodologia di definizione della pericolosità rende difficoltosa l'interpretazione diretta della sua rappresentazione grafica. Da una parte, i risultati numerici possono essere tali da rendere "irregolare" la rappresentazione grafica. Dall'altra parte, la mappatura non rende immediatamente interpretabile la caratteristica del deflusso. Il problema di interpretabilità si traduce, poi, in un problema di applicazione pratica della perimetrazione della pericolosità.

Al fine di ovviare a tali problematiche, la classificazione ottenuta dai risultati numerici deve essere regolarizzata. Tale regolarizzazione è stata applicata, nell'ambito di questo studio, sulla base dell'applicazione di algoritmi di regolarizzazione dei contorni associata a giudizio esperto.

In particolare, i criteri di definizione di ogni classe di pericolosità sono stati applicati ai risultati numerici e sono stati applicati i seguenti criteri di regolarizzazione.

- Eliminazione delle aree non pericolose circondate da aree pericolosità: in tal caso, alle aree "isolate" (ovvero non interessate da deflusso di caratteristiche tali da essere classificate nella pericolosità considerata) è stata assegnata un livello di pericolosità immediatamente inferiore.

- Le piccole aree (estensione inferiore a  $100 \text{ m}^2$  ovvero con rapporto tra estensione e perimetro inferiore a 2) sono state eliminate poiché influenzate dalla risoluzione numerica del problema idrodinamico.
- I contorni delle aree sono stati regolarizzati al fine eliminare la dipendenza della perimetrazione dalla risoluzione spaziale delle griglie numeriche.

L'applicazione dei criteri descritti ha portato alla definizione delle aree caratterizzate dai quattro livelli di pericolosità (P4, P3, P2 e P1). Ciò implica che uno stesso punto può appartenere a diversi livelli di pericolosità. In questi casi, si assegna la classe di pericolosità più elevata. Ad esempio, un punto in cui il deflusso è caratterizzato da una profondità massima cinquantennale e centennale superiore a 1.0 m, quindi rispettivamente relative a classi di pericolosità P4 e P3, è classificato nella fascia di pericolosità P4. Tale ulteriore livello di analisi ha portato all'insorgere di aree, di assegnata pericolosità, di piccola dimensione ovvero di piccolo valore del rapporto tra estensione e perimetro. Pertanto, le piccole aree con assegnata pericolosità stimata, prossime ad aree con pericolosità superiore, sono state accorpate a queste ultime.

In questo modo, si sottolinea che la mappatura della pericolosità non è il solo risultato della semplice applicazione della catena modellistica, ma il risultato di un'interpretazione esperta dei risultati che mira a rendere applicabile, nella pratica, la mappatura di pericolosità.

## 4. IMPLEMENTAZIONE NUMERICA

### 4.1. CONSIDERAZIONI GENERALI

Questo capitolo ha l'obiettivo di illustrare l'implementazione numerica delle griglie di calcolo. In particolare, è necessario premettere che sono stati acquisiti nuovi rilievi topografici ed aerei, effettuati ad hoc per l'analisi. In particolare, il reticolo idrografico oggetto di studio (per un'estensione lineare di circa 170 km) è stato rilevato tramite un'applicazione specifica della tecnica LiDAR. Il volo ha riguardato un'area di estensione pari a circa 550 km<sup>2</sup>. Tale tecnica (aerea) ha il pregio di riuscire a fornire informazioni dettagliate riguardo alla configurazione (aggiornata) del terreno. Pertanto, si è acquisito un modello digitale del terreno con risoluzione spaziale pari a 1 m. Il modello digitale del terreno, ottenuto dal rilievo, è stato validato con una serie di misurazioni a terra effettuate con antenna GPS ad alta precisione.

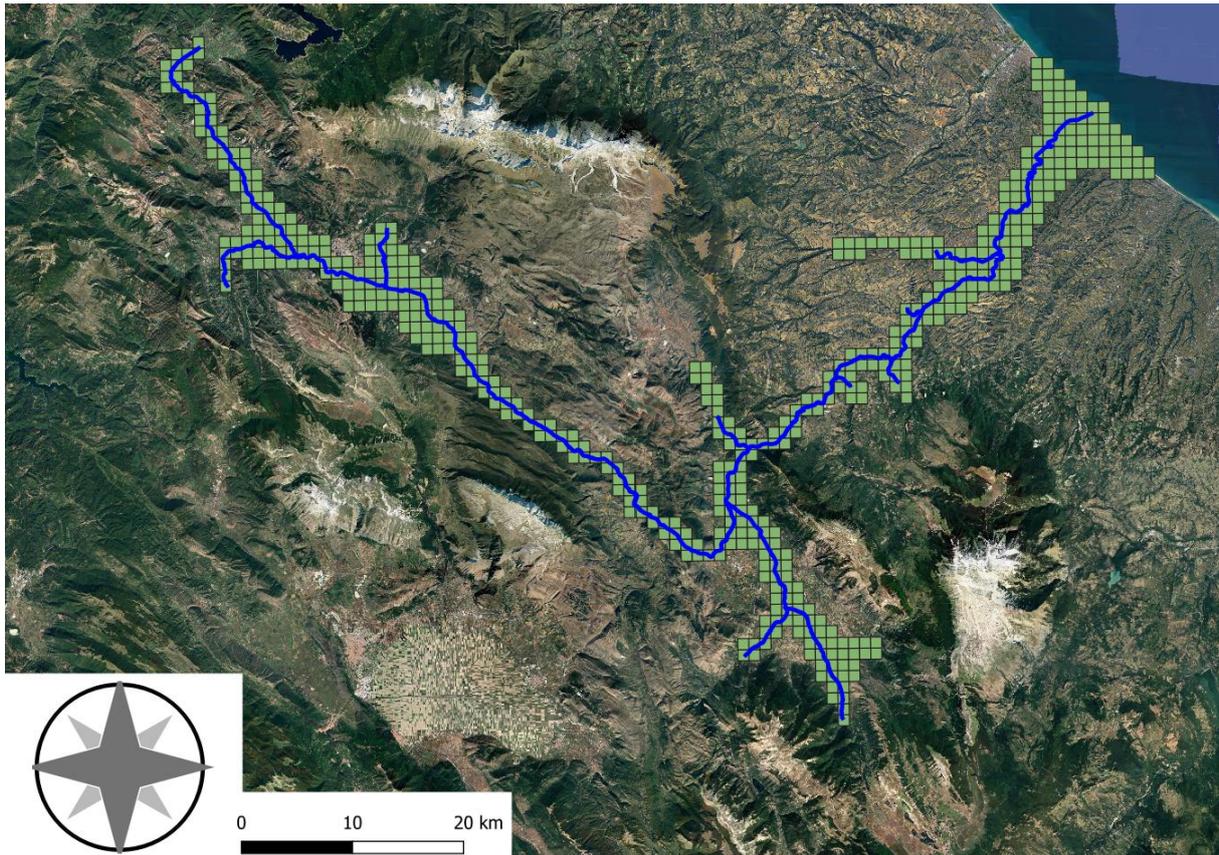
Tuttavia, la tecnica LiDAR non è in grado di misurare (a meno di utilizzare tecniche alternative basate sulla stessa tecnologia) la configurazione batimetrica nelle aree con sommergenza superiore a poche decine di centimetri. Pertanto, con l'obiettivo di conoscere il dettaglio della configurazione batimetrica negli alvei incisi (in particolare quelli caratterizzati da profondità elevate), è stato effettuato un rilievo topo-batimetrico "a terra". Tale rilievo ha riguardato la misura di circa 460 sezioni trasversali, che comprendono anche la misura delle caratteristiche geometriche degli attraversamenti implementati nelle griglie numeriche.

La Figura 4-1 riporta l'estensione del nuovo rilievo LiDAR. La Figura 4-2, d'altra parte, individua le sezioni trasversali rilevate durante il rilievo topo-batimetrico "a terra".

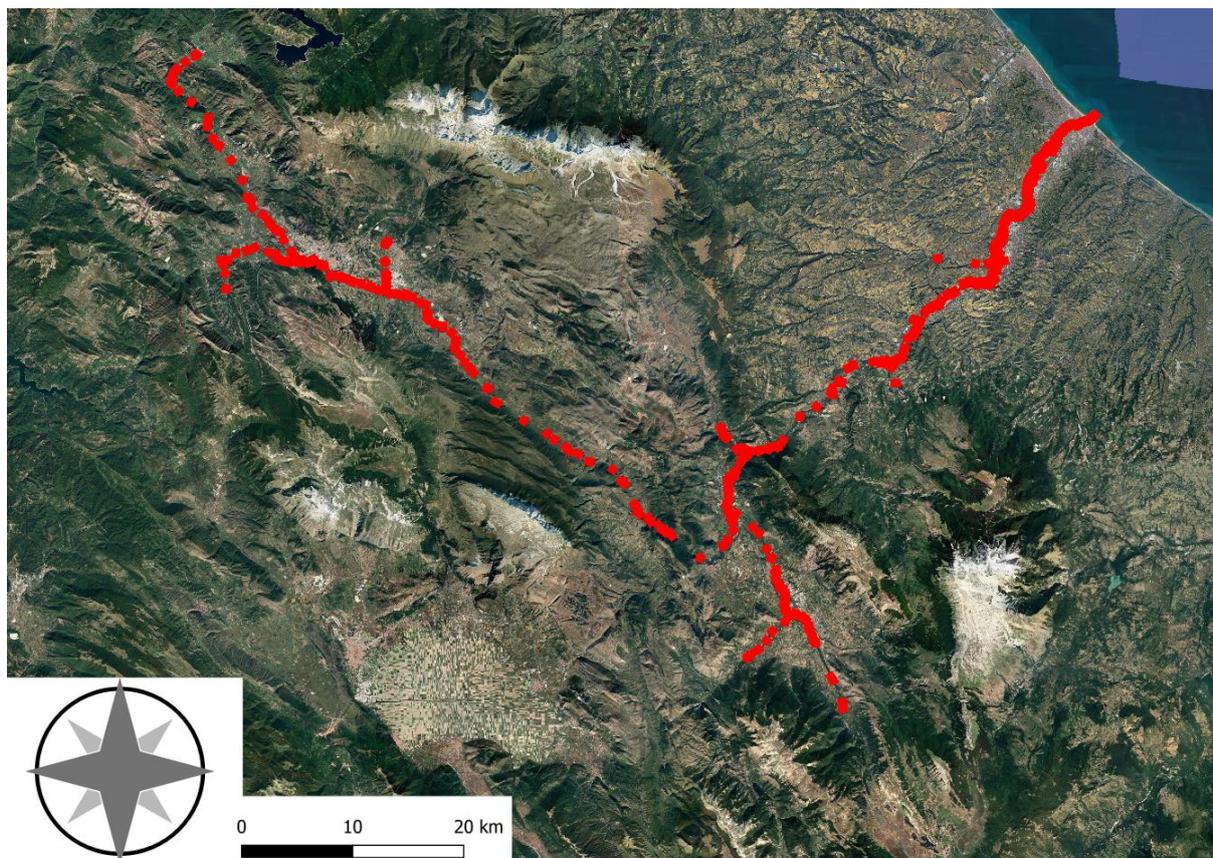
### 4.2. GRIGLIE NUMERICHE

L'intera area in esame è stata suddivisa in nove diverse griglie di calcolo. Come già sottolineato, la necessità di implementare diverse griglie numeriche per lo stesso fiume è motivata dall'informazione idrologica che impone la macro-discretizzazione. Pertanto, le simulazioni numeriche sono effettuate per diverse zone, procedendo da monte verso valle. Le condizioni al contorno di ogni zona sono definite in funzione delle informazioni idrologiche note alla sezione terminale di monte. Al fine di limitare gli effetti dell'imposizione delle condizioni al contorno di valle, ogni zona ha un'area di sovrapposizione con quella posta più a monte (a meno della prima zona di monte). Per l'estrazione dei risultati in

corrispondenza della transizione (in corrispondenza della quale sono disponibili i risultati di due diverse simulazioni), al fine di limitare l'effetto del contorno (di valle per la zona di monte, e di monte per la zona di valle), sono stati utilizzati i risultati della zona di valle a partire dalla porzione in cui i risultati delle due simulazioni sono ragionevolmente simili.



*Figura 4-1: Estensione geografica dei nuovi rilievi LiDAR.*



*Figura 4-2: Localizzazione delle sezioni rilevate a terra.*

In particolare, con riferimento alla Figura 4-3, sono state riprodotte numericamente le seguenti aste fluviali:

- Aterno
- Pescara
- Raio
- Vera-Raiale
- Vella-Gizio-Sagittario
- Tirino
- Lavino
- Orta
- Nora
- Pescara

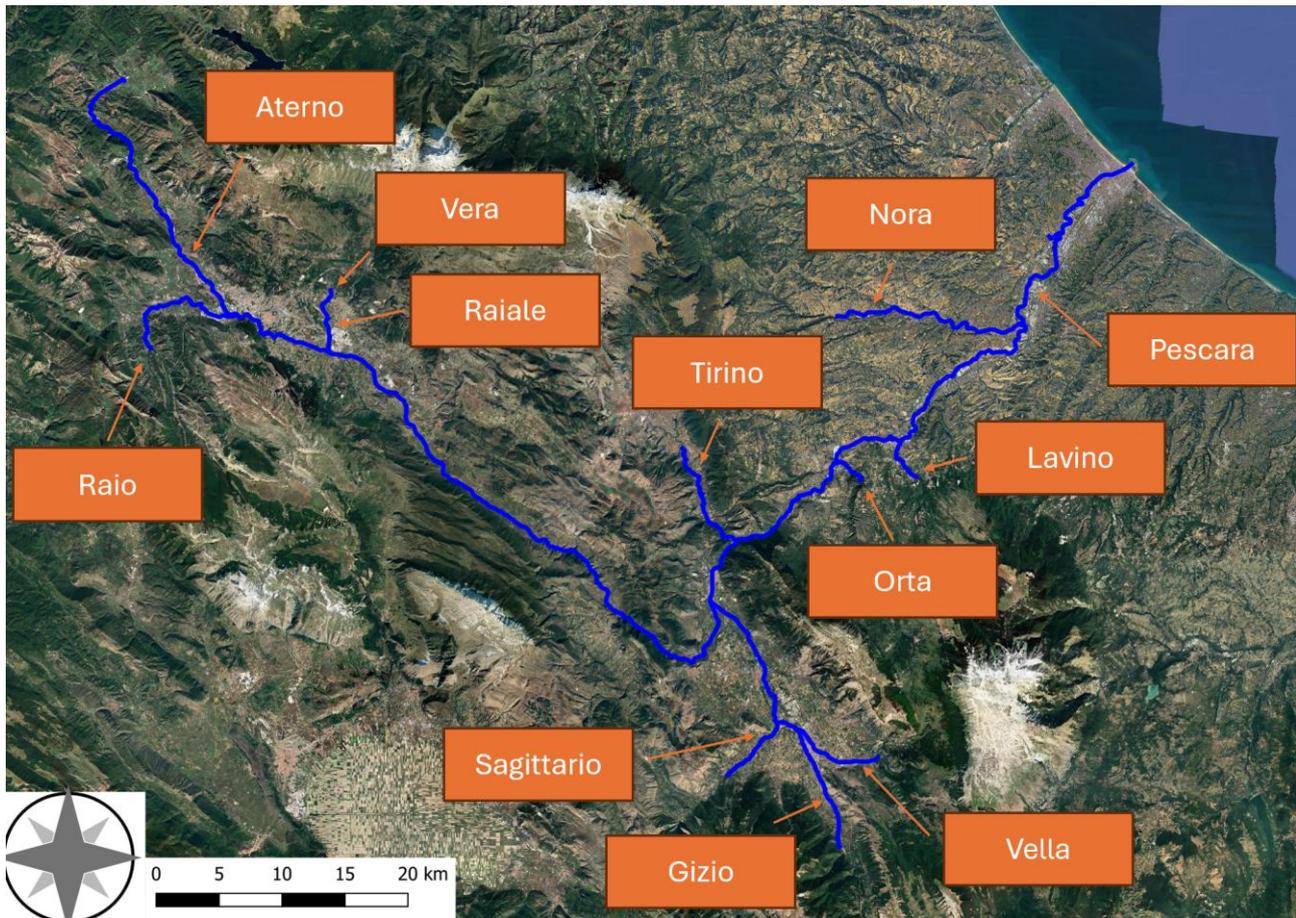


Figura 4-3: Aste fluviali riprodotte numericamente.

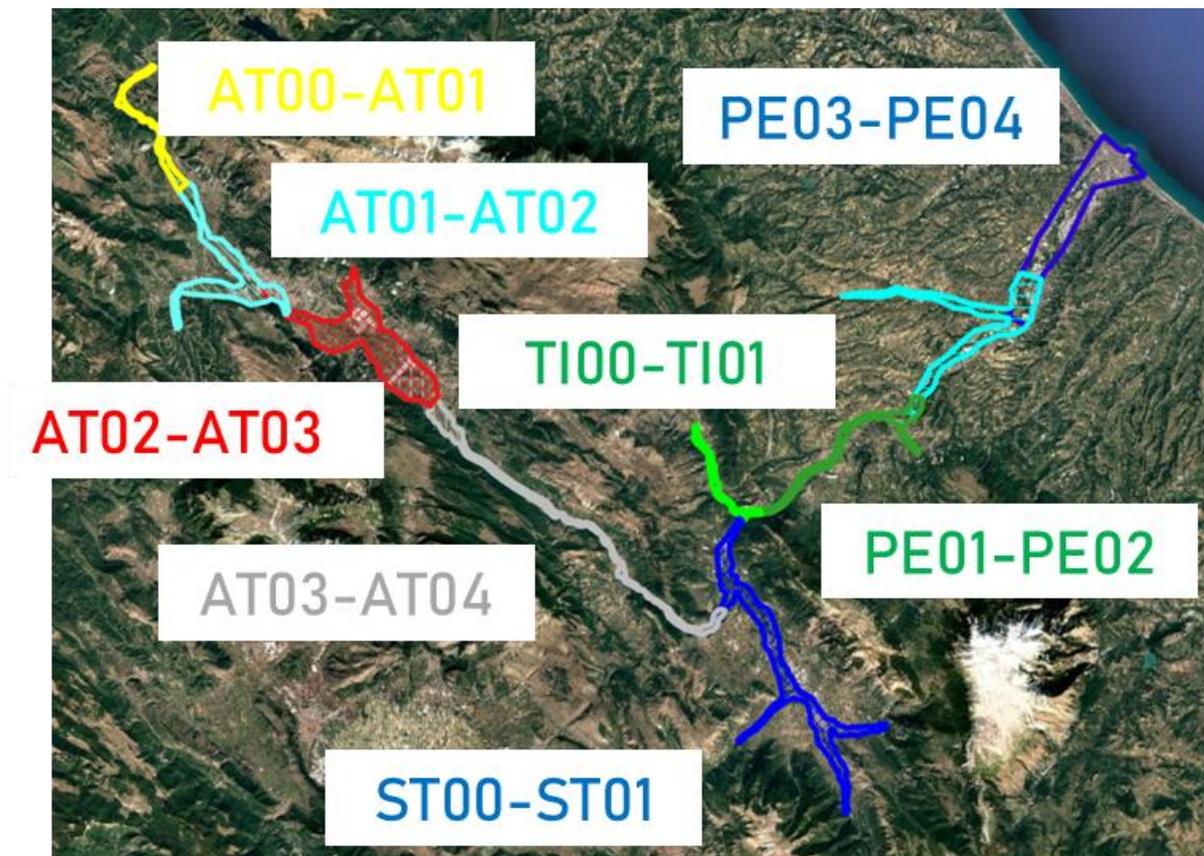


Figura 4-4: Domini di calcolo implementati.

La Figura 4-4 mostra l'estensione di ogni dominio di calcolo.

Ogni dominio di calcolo è stato implementato, nella sua versione finale (nell'ambito dell'approccio multi-scala) con una dimensione lineare delle celle di calcolo pari a 10 m (estensione pari a 100 m<sup>2</sup>). Tuttavia, sono state inserite diverse aree in cui la risoluzione lineare è più dettagliata, fino ad una dimensione pari a 1 m. Ne consegue che le griglie numeriche sono non strutturate con risoluzione spaziale variabile, più dettagliata in corrispondenza dell'alveo inciso ed in corrispondenza di punti singolari (es. cambio di pendenza).

La Tabella 4-1 mostra una sintesi delle caratteristiche salienti delle griglie di calcolo. Si può osservare che l'indagine numerica ha riguardato circa 270 km di estensione longitudinale delle aste fluviali e circa 215 km<sup>2</sup> di aree esondabili con un numero totale di celle computazionali pari a circa 4.3 milioni (a cui corrisponde una dimensione media circa pari a 50 m<sup>2</sup>).

All'interno di ciascuna griglia implementata sono state individuate, inoltre, le aree a differente uso del suolo, assegnando differenti valori del coefficiente di scabrezza idraulica, rappresentato dal

coefficiente di Manning (ovvero dal coefficiente di Strickler). In particolare, la presenza degli edifici è riprodotta imponendo una grande scabrezza idraulica al fine di riprodurre l'effetto senza necessità di riprodurre l'ingombro nella distribuzione altimetrica. I valori della scabrezza idraulica sono stati definiti sulla base di dati di letteratura (es. ven Te Chow, 1959) e selezionati sulla base di un'analisi di sensibilità effettuata nelle fasi preliminari dello studio.

Tabella 4-1: Sintesi delle caratteristiche principali delle griglie computazionali.

| Fiume   | Sigla     | Dim. Lineare | Superf.            | Numero Attravers. | Numero celle comput. | Dim. media celle comp. |
|---|-----------|--------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------------------|
|   |           | (km)         | (km <sup>2</sup> ) | (-)               | (-)                  | (m <sup>2</sup> )      |
| <b>Aterno</b>                                   | AT00-AT01 | 15.1         | 5.20               | 17                | 181 800              | 29                     |
| <b>Aterno, Raio</b>                             | AT01-AT02 | 34.0         | 19.21              | 37                | 396 430              | 48                     |
| <b>Aterno, Vera, Raiale</b>                     | AT02-AT03 | 25.0         | 41.82              | 22                | 577 840              | 72                     |
| <b>Aterno</b>                                   | AT03-AT04 | 39.3         | 26.02              | 33                | 497 546              | 52                     |
| <b>Aterno-Pescara, Sagittario, Gizio, Vella</b> | ST00-ST01 | 50.7         | 41.97              | 47                | 534 311              | 79                     |
| <b>Tirino</b>                                   | TI00-TI01 | 14.4         | 5.18               | 23                | 68 676               | 75                     |
| <b>Pescara, Orta, Lavino</b>                    | PE01-PE02 | 28.5         | 11.43              | 26                | 172 952              | 68                     |
| <b>Pescara, Nora</b>                            | PE02-PE03 | 36.9         | 28.59              | 17                | 705 240              | 41                     |
| <b>Pescara</b>                                  | PE03-PE04 | 23.7         | 36.79              | 14                | 1 180 107            | 32                     |

## 5. RISULTATI

### 5.1. CONSIDERAZIONI GENERALI

I risultati ottenuti, come anticipato, sono restituiti in forma grafica (in allegato) e in forma vettoriale, sottoforma di strati raster (per i risultati numerici) e vettoriali (per le fasce di pericolosità), consultabili attraverso un progetto QGIS, anch'esso allegato.

In linea del tutto generale è possibile affermare che i risultati sono in accordo con il vigente PSDA a meno di alcune differenze, anche sostanziali, osservabili lungo tutto il dominio di calcolo. Tali differenze sono da imputare a quattro motivazioni distinte:

- l'aggiornamento della configurazione del terreno del presente studio rispetto a quanto noto all'epoca del PSDA (grazie al nuovo rilievo LiDAR e ai nuovi rilievi topo-batimetrici);
- l'inserimento di alcuni sottopassaggi apparentemente non esistenti all'epoca del PSDA (grazie ai nuovi rilievi topo-batimetrici e ad alcuni sopralluoghi mirati);
- l'inserimento di dettaglio delle configurazioni degli attraversamenti (grazie ai nuovi rilievi topo-batimetrici);
- la simulazione di alcuni tratti attualmente non perimetrati dal PSDA (grazie, in generale, all'aggiornamento dello studio).

Si osserva che non si ritiene significativo, se non alla scala locale, la modifica del regime idrologico che ha visto incrementarsi i valori al colmo degli idrogrammi di piena.

In particolare, si evidenziano i seguenti aspetti.

- Nel territorio del comune di Popoli, l'attuale PSDA presenta una perimetrazione verosimilmente relativa ad osservazioni passate invece che a simulazioni specifiche. I risultati ottenuti prevedono un'estensione della perimetrazione della pericolosità.
- Nell'area dell'interporto nel comune di Manoppello si osserva una pericolosità non presente nell'attuale PSDA. Tale differenza può riferirsi alla migliore conoscenza del terreno. Inoltre, i risultati di questo studio sono in sostanziale accordo con quanto ottenuto nell'ambito del progetto delle "Opere di laminazione delle piene del fiume Pescara".

- Nell'area interessate dall'attuale realizzazione delle opere di laminazione delle piene del fiume Pescara e nelle aree poste a valle. Tale differenza può riferirsi alla modifica del terreno relativa alla realizzazione delle vasche e alla corretta riproduzione di alcuni sottopassaggi. Si evidenzia che tutte le opere di difesa attualmente esistenti sono state riprodotte nelle simulazioni di questo studio.
- Area dell'aeroporto di Pescara e area posta immediatamente a valle (in sponda destra). In tale area sono stati riprodotti due sottopassaggi in diretta corrispondenza dell'infrastruttura e che, verosimilmente, non erano stati riprodotti all'epoca del PSDA. A tal proposito, si evidenzia che sono state effettuate ulteriori simulazioni prevedendo la chiusura dei sottopassi. In tal caso, l'area dell'aeroporto e quella in corrispondenza della sponda destra (verso valle) non sono interessate da pericolosità idraulica.

## **5.2. APPROFONDIMENTI PUNTUALI**

### **5.2.1. LA ZONA AEROPORTUALE DI PESCARA**

Come anticipato, nell'area dell'aeroporto di Pescara si osservano significative differenze rispetto a quanto attualmente perimetrato dal PSDA. L'analisi della perimetrazione delle aree di pericolosità attualmente vigenti ha permesso di identificare la "sorgente" delle differenze modellistiche. Con riferimento alla Figura 5-1, infatti, si osserva che il PSDA non aveva tenuto in considerazione della presenza di due sottopassaggi. Al fine di verificare l'effettiva presenza di tali passaggi è stato effettuato un sopralluogo ad hoc e interrogato il database disponibile sulla piattaforma Google Earth. La Figura 5-3e la Figura 5-4 mostrano i due sottopassi a cui sono verosimilmente dovute le differenze rilevate. In tal caso, sono state effettuate ulteriori indagini volte alla riproduzione dell'effetto di presidi volti ad annullare il deflusso in corrispondenza dei sottopassi. La Figura 5-6 mostra i risultati ottenuti con porte stagne installate in corrispondenza dei sottopassi. L'installazione di porte stagne in corrispondenza dei due sottopassi elimina la pericolosità non soltanto nell'area aeroportuale, ma in tutta l'area posta in sponda destra del fiume (si veda Figura 5-5 per un'analisi comparativa).

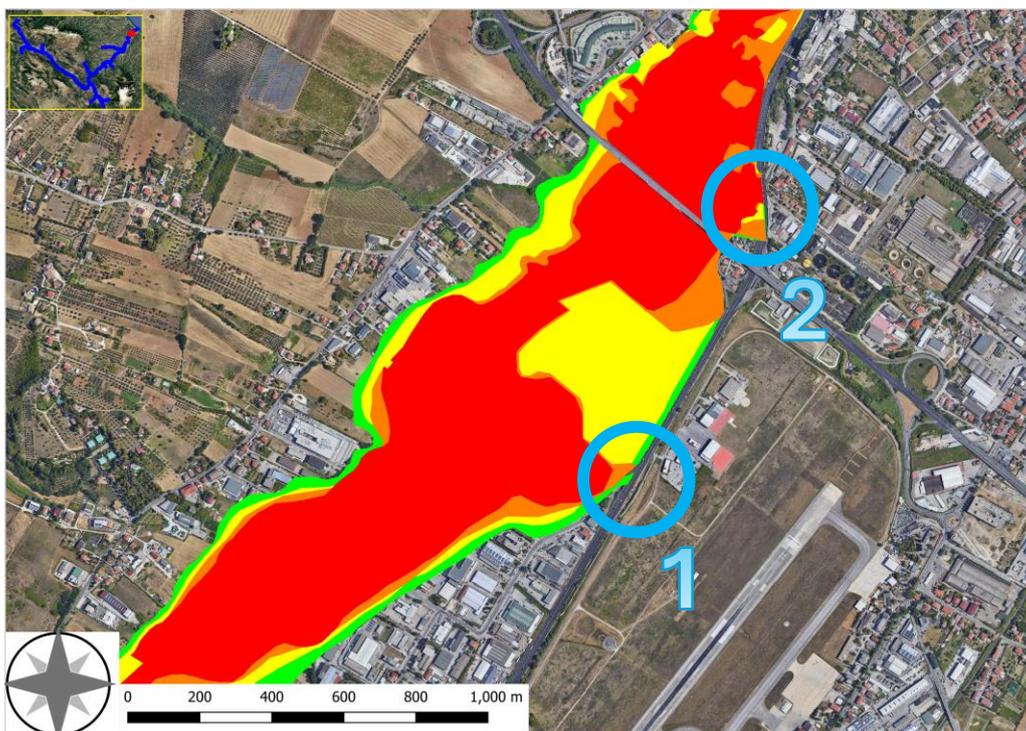


Figura 5-1: Perimetrazione del PSDA (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde). Nella mappa sono indicati i due sottopassaggi a cui sono verosimilmente dovute le differenze rilevate rispetto all'aggiornamento.

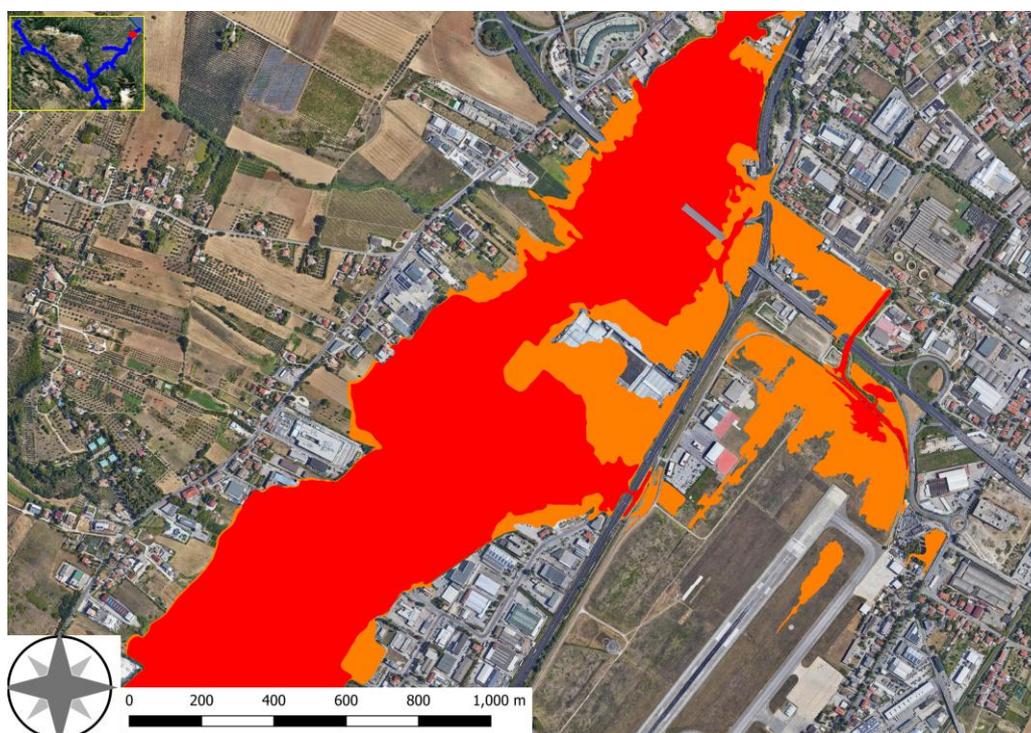


Figura 5-2: Perimetrazione individuata nell'aggiornamento (P4 - rosso, P3 - arancione).



Figura 5-3: Sottopasso di via Raiale per l'accesso sull'asse attrezzato (Raccordo Autostradale Pescara-Chieti).



Figura 5-4: Sottopasso di via Raiale all'asse attrezzato (Raccordo Autostradale Pescara-Chieti).

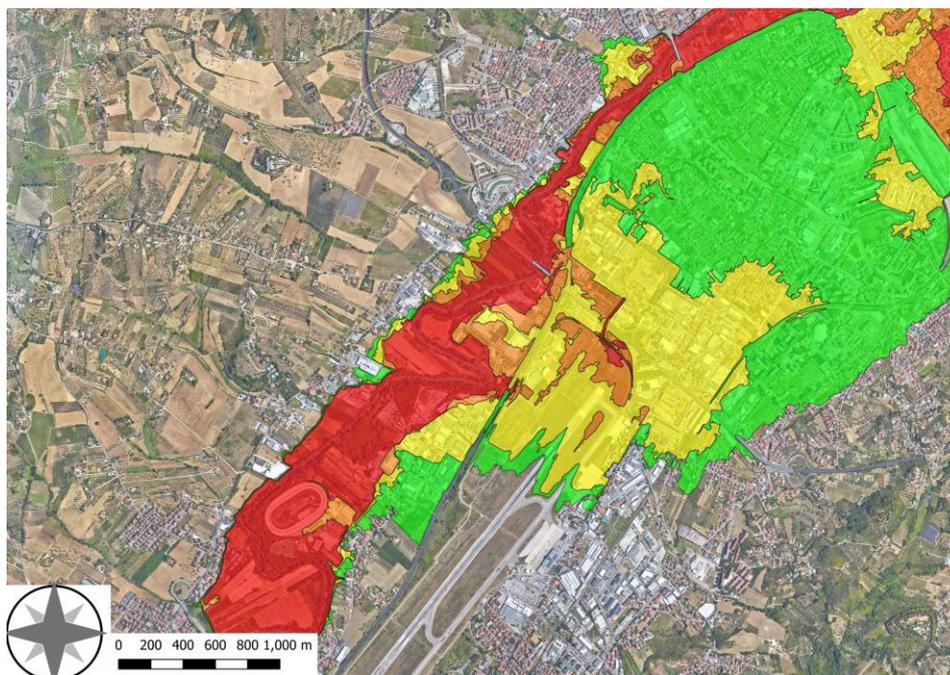


Figura 5-5: Perimetrazione ottenuta nell'ambito del presente studio (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde) nella configurazione attuale dei sottopassi (1 e 2 in Figura 5-1).

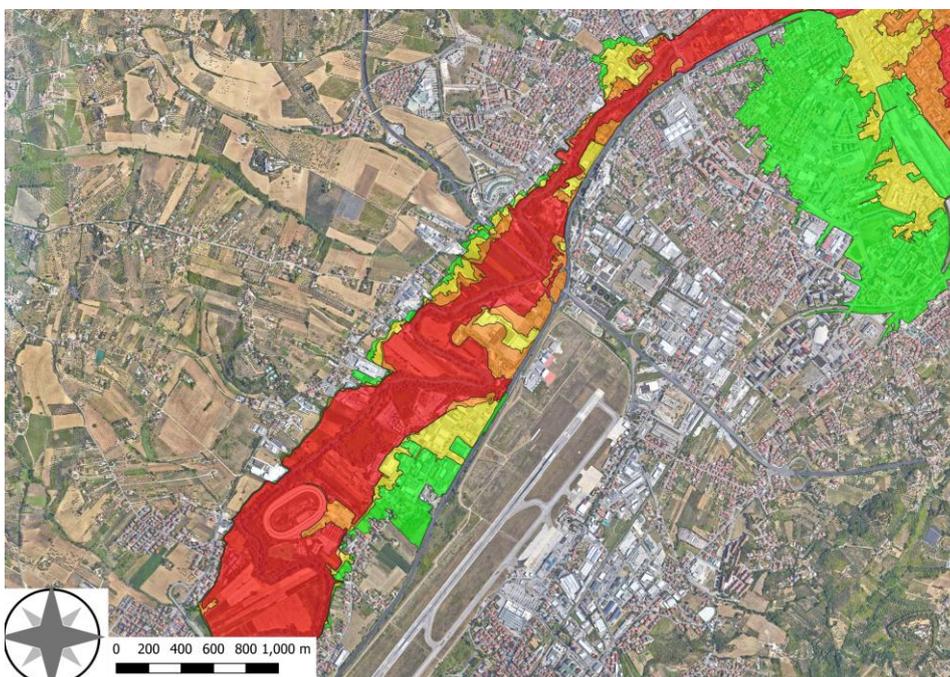


Figura 5-6: Perimetrazione ottenuta nell'ambito del presente studio (P4 - rosso, P3 - arancione, P2 - giallo, P1 - verde) che prevede l'installazione di porte stagne in corrispondenza dei sottopassi (1 e 2 in Figura 5-1).

### 5.2.2. LA ZONA DI FOCE DEL PESCARA

In corrispondenza della foce del Pescara si osserva che sono attualmente in corso gli interventi per l'attuazione del Piano Regolatore Portuale (nel seguito indicato come PRP).

La Figura 5-7 mostra la configurazione prevista dal PRP. Si può osservare che la foce fluviale risulta significativamente modificata con una deviazione “a S” che ricolloca la foce fluviale in una sezione che supera, verso il largo, l'attuale diga foranea. La dislocazione della foce fluviale induce una variazione della condizione al contorno di valle del deflusso fluviale (es. Celli et al., 2024). Le analisi effettuate nell'ambito della definizione del PRP, effettuate con approccio monodimensionale, indicano che *“la configurazione variata, proposta nell'ambito del nuovo Piano Regolatore Portuale, mostra un deciso miglioramento delle condizioni di deflusso idraulico del fiume rispetto alla situazione attuale. Infatti, la zona di esondazione elevata (lama tracimante di altezza superiore al metro) viene limitata ai soli primi 200 m del tratto di monte dell'alveo simulato. Inoltre, in questo caso si ottiene che la variazione delle condizioni del livello di valle, costituita dal sovrizzo indotto dalle maree (meteorologica ed astronomica), influisce molto poco sulle condizioni di deflusso del fiume.”*

L'analisi comparativa delle quote di sponda destra attuale evidenzia una quota pari a circa +1.20 m lmm. Il PRP prevede un innalzamento, nella zona di foce, fino alla quota +2.5 m lmm (innalzamento previsto anche in sponda sinistra). E' verosimile che l'innalzamento della quota spondale possa indurre un sensibile miglioramento della pericolosità idraulica evidenziando che le simulazioni di questo studio hanno evidenziato un processo di esondazione che prende avvio proprio in corrispondenza dell'area in cui è previsto l'innalzamento delle sponde (Figura 5-8). Inoltre, è da ricordare che il PRP prevede il dragaggio del fiume (abbassamento della quota del fondo) ed è verosimile una diminuzione del processo di interrimento della foce.

Sulla base dei risultati degli studi idraulici alla base del PRP e delle osservazioni qualitative tracciate sulla base dei risultati del presente studio, è verosimile un miglioramento delle condizioni di pericolosità idraulica nell'area prossima alla foce del Pescara.

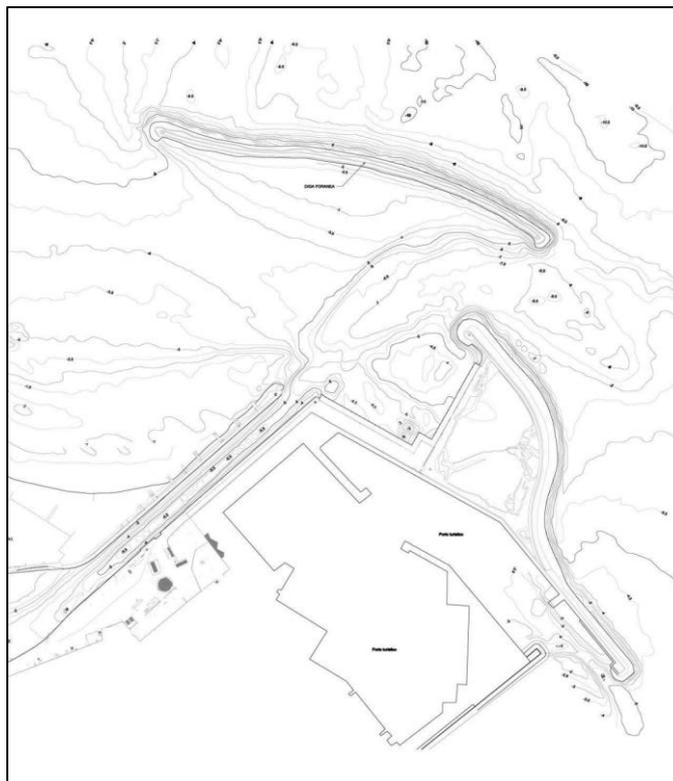
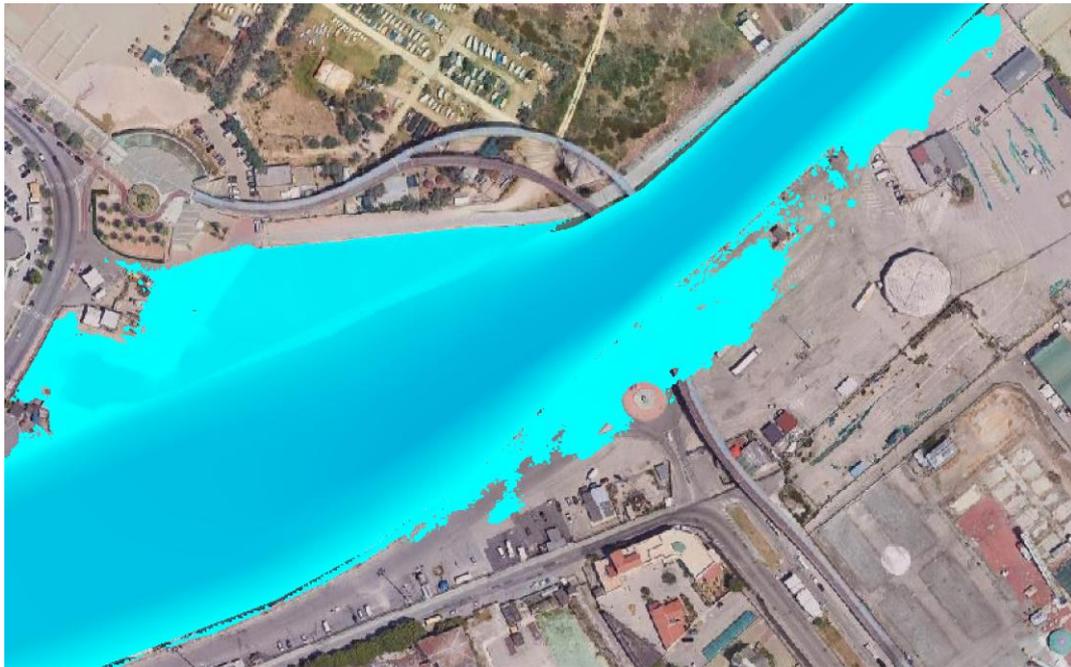


Figura 5-7: Attuale configurazione della foce fluviale del Pescara (mappa in alto) e Piano Regolatore Portuale vigente (mappa in basso). Il Nord coincide con l'asse verticale delle mappe.



*Figura 5-8: Inizio del processo di esondazione per l'idrogramma con tempo di ritorno pari a 50 anni (così come ottenuto nel presente studio) in corrispondenza dell'area in cui il PRP prevede un incremento delle quote della sponda destra.*

Inoltre, come anticipato, lo studio si è basato sull'utilizzo dei rilievi più aggiornati, acquisiti ad hoc, della configurazione attuale del terreno. In corrispondenza di Cepagatti sono attualmente in costruzione le cosiddette "Opere di laminazione delle piene del fiume Pescara". Le opere sono costituite da una serie di vasche di laminazione poste su entrambe i lati del fiume. Attualmente, le vasche sono in costruzione. Ne deriva che le simulazioni tengono in considerazione soltanto parzialmente del loro effetto di diminuzione del colmo dell'idrogramma di piena. Dal progetto definitivo dell'intervento si evince che i volumi di laminazione ammontano a poco più di 5,2 milioni di metri cubi, con un abbattimento atteso del colmo dell'idrogramma pari a  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  (per il tempo di ritorno pari a 50 anni) e  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  (per il tempo di ritorno pari a 100 anni) con un valore intermedio pari a  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  (per il tempo di ritorno pari a 200 anni).

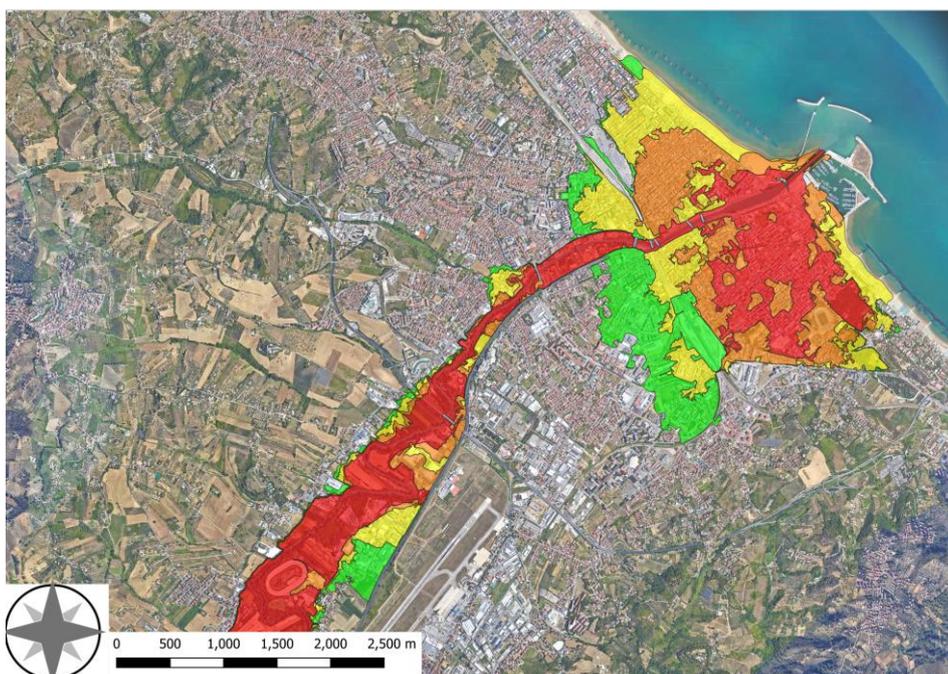
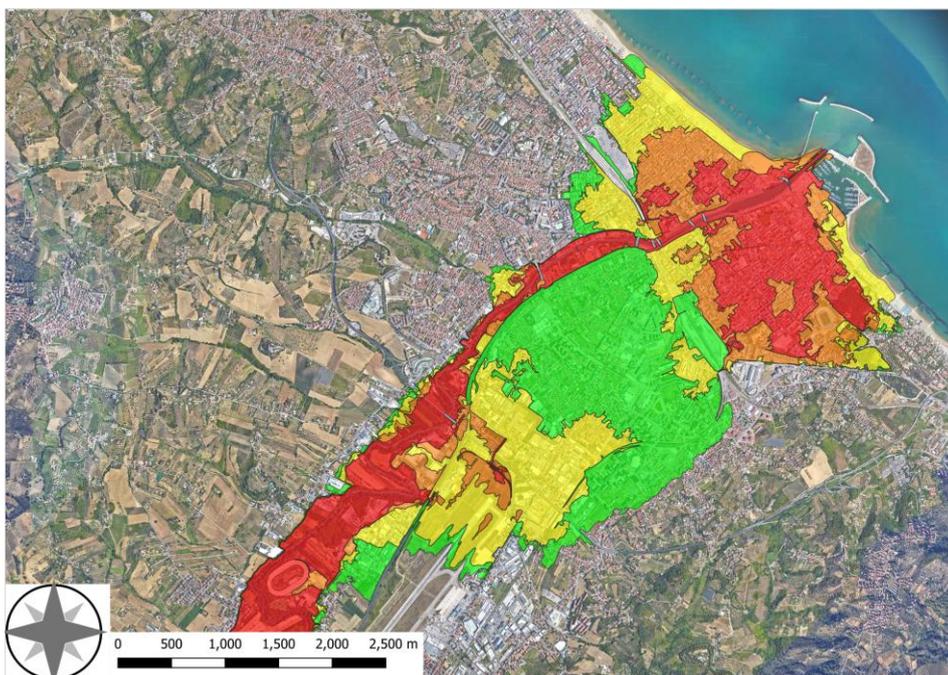
Attualmente, le vasche di valle sono sostanzialmente terminate (volume di laminazione pari a circa 1,7 milioni di metri cubi), mentre le vasche poste più a monte sono in stato di avanzata costruzione. Pertanto, i risultati ottenuti nell'ambito di questo studio sono da ritenersi validi per l'attuale stato di avanzamento di realizzazione delle vasche e, al termine della costruzione, sono da attendersi lievi miglioramenti (in particolare nell'area immediatamente a valle delle vasche).

Con l'obiettivo di valutare quantitativamente gli effetti della configurazione futura dell'area, sono state effettuate ulteriori simulazioni considerando sia l'effetto delle vasche di laminazione (così come previsto dal progetto definitivo ed esecutivo delle opere), sia l'effetto della chiusura dei sottopassi presso l'aeroporto, sia l'effetto della nuova configurazione di foce prevista dal PRP.

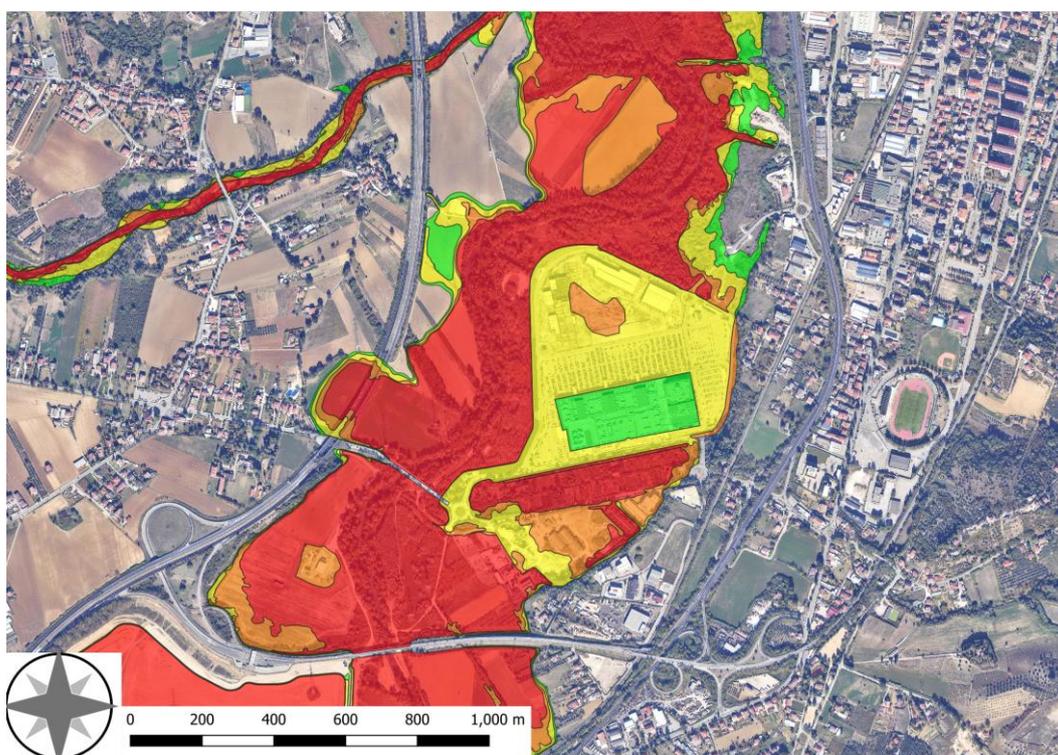
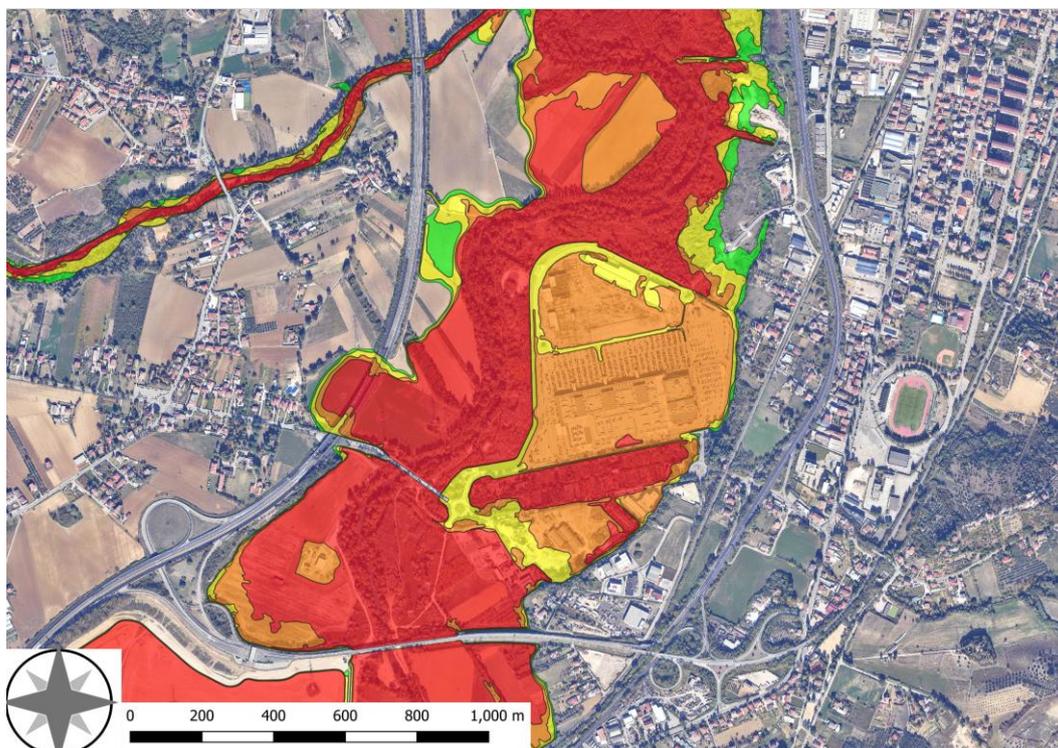
La Figura 5-9 mostra il confronto dei risultati in termini di estensione delle fasce di pericolosità. Per quanto riguarda la fascia di pericolosità P4, l'analisi qualitativa dei risultati evidenzia una diminuzione delle aree perimetrare in pericolosità P4 sia lungo il fiume a partire dall'area aeroportuale, sia in sponda sinistra a valle del ponte di ferro. In sponda destra vi sono differenze più limitate, ma comunque apprezzabili ai margini. A livello quantitativo, le aree in pericolosità P4 collocate in sponda sinistra diminuiscono, tra la configurazione attuale e quella futura, di una misura pari a circa il 42%. In sponda destra, la diminuzione è pari a circa il 6%. Nella zona a monte del ponte di ferro e fino all'area aeroportuale, la diminuzione è pari a circa il 6%. Globalmente, la percentuale di diminuzione delle aree in pericolosità P4 raggiunge circa il 10% (in termini assoluti, l'estensione della diminuzione è circa pari a 36 ha).

### **5.2.3. LA ZONA DI LOCALITÀ SANTA FILOMENA**

In corrispondenza dell'area della località Santa Filomena è presente un importante insediamento commerciale (il cosiddetto "Megalò"). Vista l'importante esposizione alla pericolosità idraulica, sono state effettuate ulteriori simulazioni considerando sia l'effetto delle vasche di laminazione (così come previsto dal progetto definitivo ed esecutivo delle opere), sia l'effetto di ipotetiche opere di difesa a servizio dell'area commerciale. In particolare, sulla base dell'analisi del processo di esondazione, è stata ottimizzata (nel limite della scala della pianificazione) la configurazione di un presidio idraulico in grado di limitare la pericolosità idraulica dell'area commerciale senza aggravare quella delle aree immediatamente a monte e a valle. Con riferimento ai risultati riportati in Figura 5-10, l'ulteriore simulazione effettuata ha evidenziato l'annullarsi della pericolosità P4 nell'area commerciale, accompagnata da una drastica riduzione dell'estensione della superficie a cui è associata la pericolosità P3 e all'estendersi delle aree caratterizzate da pericolosità inferiori (P2 e P1).



*Figura 5-9: Fasce di pericolosità. In alto sono riportati i risultati ottenuti in configurazione attuale, in basso quelli in configurazione futura (considerando gli effetti delle vasche di Cepagatti, della chiusura dei sottopassaggi in corrispondenza dell'area aeroportuale, delle opere previste dal PRP del porto di Pescara).*



*Figura 5-10: Fasce di pericolosità in Località Santa Filomena. In alto sono riportati i risultati ottenuti in configurazione attuale, in basso quelli in presenza di ipotetici presidi idraulica a difesa dell'area commerciale.*

#### **5.2.4. LA ZONA DELLE VASCHE DI LAMINAZIONE DEL FIUME ATERNO-RAIO**

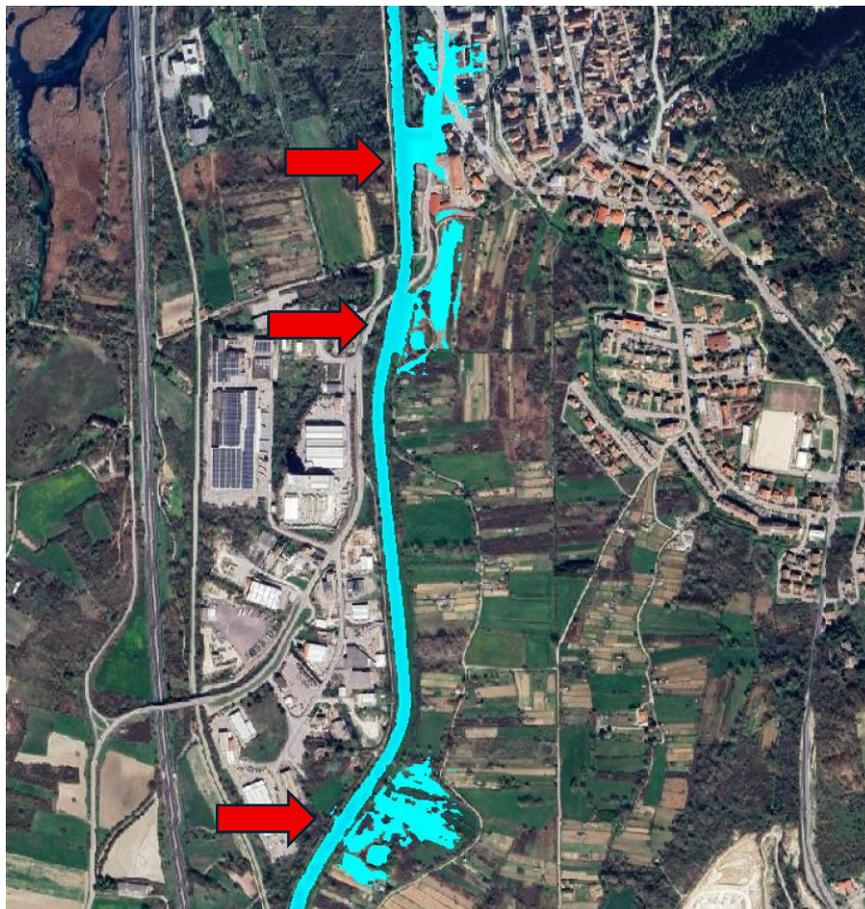
In analogia con le vasche in corso di realizzazione in corrispondenza del territorio di Cepagatti (paragrafo precedente), si evidenzia di seguito che sono in progetto una serie di vasche da realizzarsi sul fiume Aterno (a monte della confluenza con il Raio) e sul fiume Raio. In questo caso, tuttavia, la realizzazione delle vasche non è iniziata. Pertanto, lo studio descritto in questa relazione non ne considera l'effetto. Da un punto di vista qualitativo, è possibile riferirsi ai risultati ottenuti nell'ambito della progettazione delle vasche. Il progetto si basa sull'analisi idrologica effettuata con lo stesso metodo del PSDA (e pertanto diverso da quanto utilizzato in questo studio). Tuttavia, le differenze in termini di portata al colmo degli idrogrammi (per assegnato tempo di ritorno) possono ritenersi trascurabili. Pertanto, è possibile affermare ragionevolmente che i livelli di pericolosità nelle aree di intervento (da L'Aquila fino a Molina Aterno) possa subire un miglioramento.

In particolare, secondo quanto previsto dagli studi a supporto del progetto, le aree interessate dalla diminuzione dell'estensione delle aree perimetrate sono collocate a valle della zona della Finanza (lungo l'Aterno) fino alla confluenza con il Raio e della zona industriale lungo il Raio (fino alla confluenza con l'Aterno).

#### **5.2.5. LA ZONA DI POPOLI**

L'attuale studio, come anticipato, ha avuto l'obiettivo di valutare la pericolosità lungo tutto il reticolo principale del fiume Aterno-Pescara. In corrispondenza dell'abitato di Popoli, il vigente PSDA non presenta una perimetrazione diffusa in corrispondenza del centro abitato. L'attuale studio evidenzia una zona pericolosa confinata nella zona meridionale e occidentale (ovvero più vicina al fiume) del paese. In tal caso la pericolosità è governata principalmente dalle quote del terreno che risultano depresse rispetto alle aree circostanti. In questo caso si riconosce, poco più a monte, un'area in cui è potenzialmente realizzabile un sistema di laminazione per la diminuzione del valore al colmo degli idrogrammi a cui è necessario associare la realizzazione di arginature localizzate lungo il tratto del fiume ed in corrispondenza dei quali il processo di esondazione ha inizio (procedendo da monte: immediatamente a monte della zona industriale, immediatamente a monte dell'attraversamento della via per Vittorito e in corrispondenza della via per Vittorito poco prima dell'innesto con la SS17, Figura 5-11 ). Con l'intento di fornire un ordine di grandezza dei volumi di laminazione necessari alla diminuzione dei valori al colmo dell'idrogramma associato al tempo di ritorno pari a 50 anni, è possibile

valutare i volumi di laminazione. Una stima del tutto preliminare permette di valutare una capacità di laminazione di circa 1,5 milioni di metri cubi come sufficiente a ridurre la portata di circa  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .



*Figura 5-11: Identificazione di punti in cui ha origine il processo di esondazione nei pressi del comune di Popoli.*

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Brunner, G. W. (2020). HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 6.0 Beta, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

Casulli. 2008. A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. Int. J. Numer. Meth. Fluids. 2008

Celli, D., Pasquali, D., Di Nucci, C., & Di Risio, M. (2024). Influence of short-term configurations of a mouth deviation on river hydraulics: the Pescara River case study. Natural Hazards, 120(12), 10513-10538.

Ven Te Chow. Open-Channel Hydraulics (1959) McGraw-Hill, New York, 680 pp., 131.3408: 1215-1215