

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN
IMPIANTO FOTOVOLTAICO DENOMINATO

"MAAS 2"

SITO NEI COMUNI DI
BEPASSO (CT) – CATANIA (CT)

**RELAZIONE DI COMPATIBILITÀ
IDRAULICA**

COMMITTENTE:

SOL PV3 S.R.L.

Viale Santa Panagia, 141/D, Siracusa (SR)

CODICE

MITEPUARELO16A0

REVISIONE:

00

DATA ELABORATO:

14/07/2022

INDICE

1	Premessa e Norme di riferimento per la Progettazione Idraulica	2
2	Inquadramento territoriale e descrizione sintetica del progetto.....	3
3	Inquadramento idrogeologico del settore indagato.....	5
3.1	Bacino del fiume Simeto	6
3.2	PAI vigente del bacino del bacino del Fiume Simeto.....	10
3.3	Ipotesi alla base dello studio PAI e criteri di determinazione delle aree a pericolosità idraulica 11	
3.4	Valutazioni idrauliche di dettaglio delle aree di interesse sulla base del PAI propedeutiche all'impostazione della modellazione idraulica	12
4	Modello di calcolo delle verifiche idrauliche condotte in condizione di moto permanente e moto vario	15
4.1	Equazioni del modello (caso moto permanente).....	16
4.1.1	Equazioni del modello (caso moto vario).....	21
4.1.2	Soluzione numerica adottata dal programma.....	23
4.1.3	Perdite di carico in moto vario.....	25
4.2	Modellazione delle strutture laterali	26
4.3	Modellazione Bidimensionale	27
5	Costruzione ed implementazione dei Modelli idraulici per valutazioni di compatibilità idraulica ai sensi del PAI e NTA.....	30
6	Il macro-modello idraulico	32
6.1	Idrogrammi di input di moto vario della modellazione	32
6.2	Dominio di studio 1d-2d.....	34
6.3	Dati topografici utilizzati.....	35
6.4	Campi di moto 1d-2d e strutture laterali di connessione	36
6.5	Definizione della scabrezza	37
6.6	Risultati del macro-modello	38
7	Conclusioni.....	49

1 Premessa e Norme di riferimento per la Progettazione Idraulica

Il progetto definitivo denominato “Maas 2” ha la finalità di realizzare un impianto agro-fotovoltaico per la produzione di energia elettrica attraverso l’installazione di moduli fotovoltaici in grado di convertire in energia elettrica la radiazione solare incidente sulla loro superficie ed immetterla nella rete elettrica nazionale.

Il corpo dell’elaborato è suddiviso in due macro sezioni: nella prima parte verrà riproposto brevemente un inquadramento territoriale del progetto, una descrizione sintetica dello stesso ed un’analisi bibliografica e cartografica dei piani vigenti di particolare interesse per il presente studio idrologico-idraulico; nella seconda parte, dopo una breve introduzione del modello di calcolo impiegato e i dati e condizioni al contorno assegnati in input, verranno esposti i risultati delle modellazioni svolte con l’ausilio di apposito software di modellazione idraulica, *HEC-RAS 5.0.6* della *US Army Corps of Engineers*.

Tale studio è stato redatto in conformità a quanto prescritto dal PAI Regione Sicilia e relative Norme tecniche di attuazione. Altra norma di riferimento per la progettazione dell’intervento è il D.D.G. 102 del 23/6/2021 che disciplina i temi di invarianza idrologica e idraulica. Entrambi gli aspetti sono stati valutati e verificati in altro elaborato progettuale cui si rimanda per ogni dettaglio.

2 Inquadramento territoriale e descrizione sintetica del progetto

L'impianto agro-fotovoltaico denominato "Maas 2" è localizzato nel Comune di Ramacca (CT) e Catania. Si riportano di seguito delle immagini di inquadramento territoriale del progetto in argomento che si compone di:

- N.9 aree di impianto fotovoltaico (o campi fotovoltaici, o aree pannellabili), opportunamente numerate nell'immagine fornita nel seguito;
- Opere di connessione: n.1 sottostazione MT-AT (in progetto) e n.1 stazione elettrica su Rete Elettrica Nazionale (RTN) Pantano d'Arce da 380 kV (in corso di realizzazione e non in progetto).

Nella seguente immagine si propone un inquadramento su ortofoto delle opere facenti parte dell'impianto in progetto.

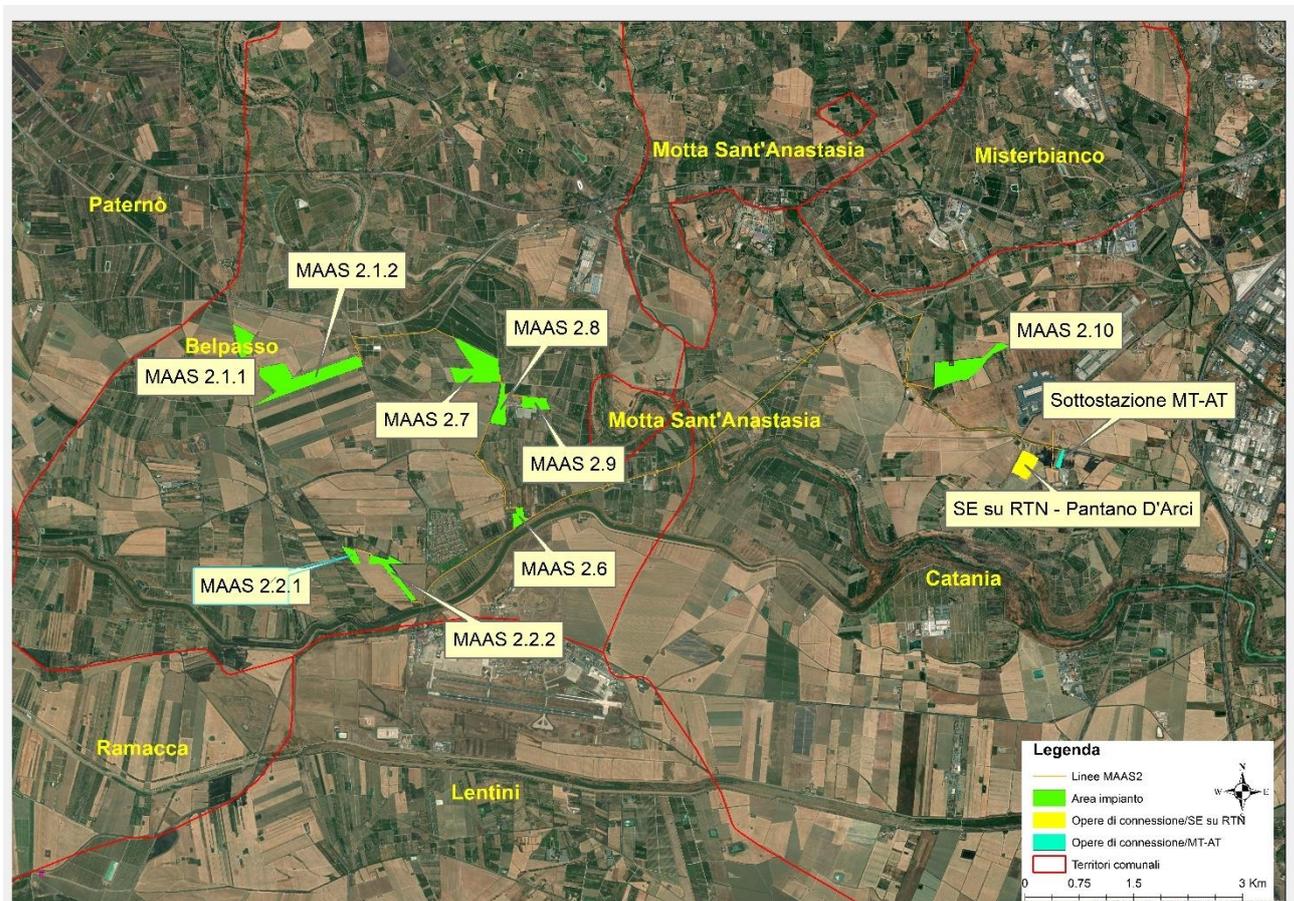


Figura 1 – Maas 2 - Localizzazione intervento su ortofoto

Nel suo complesso, i campi fotovoltaici saranno costituiti dai seguenti componenti principali:

1. Fascia arborea con coltivazioni endemiche per il mascheramento visivo;
2. Recinzione metallica e cancello d'ingresso;
3. Viabilità interna;
4. Sistema di illuminazione;
5. Cabine di conversione/trasformazione;
6. Cabina di raccolta;
7. Trackers monoassiali;
8. Cavidotti interrati.

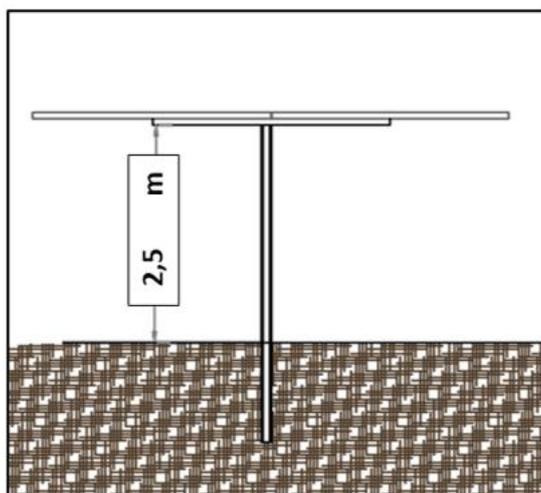


Figura 2 - Vista 3D (in alto) e sezione tipo (in basso) dei tracker monoassiali

Non si prevede di appoggiare sul terreno componenti elettrici di nessun tipo, se non i cavi di distribuzione debitamente isolati. Lo spessore di progetto dei pali (tracker) di sostegno risulta variabile tra 35 cm e 50 cm. L'altezza minima dei tracker si attesta a 2,5 m dal piano campagna, quella massima può arrivare, a seconda delle esigenze, fino a 5 m.

3 Inquadramento idrogeologico del settore indagato.

Da un punto di vista idrogeologico, l'area in studio, ricade interamente nel dominio della Piana di Catania, caratterizzata dalla presenza di suoli alluvionali.

Gli impianti si sviluppano in aree prossime ai tre corsi d'acqua principali Simeto, Dittaino e Gornalunga.

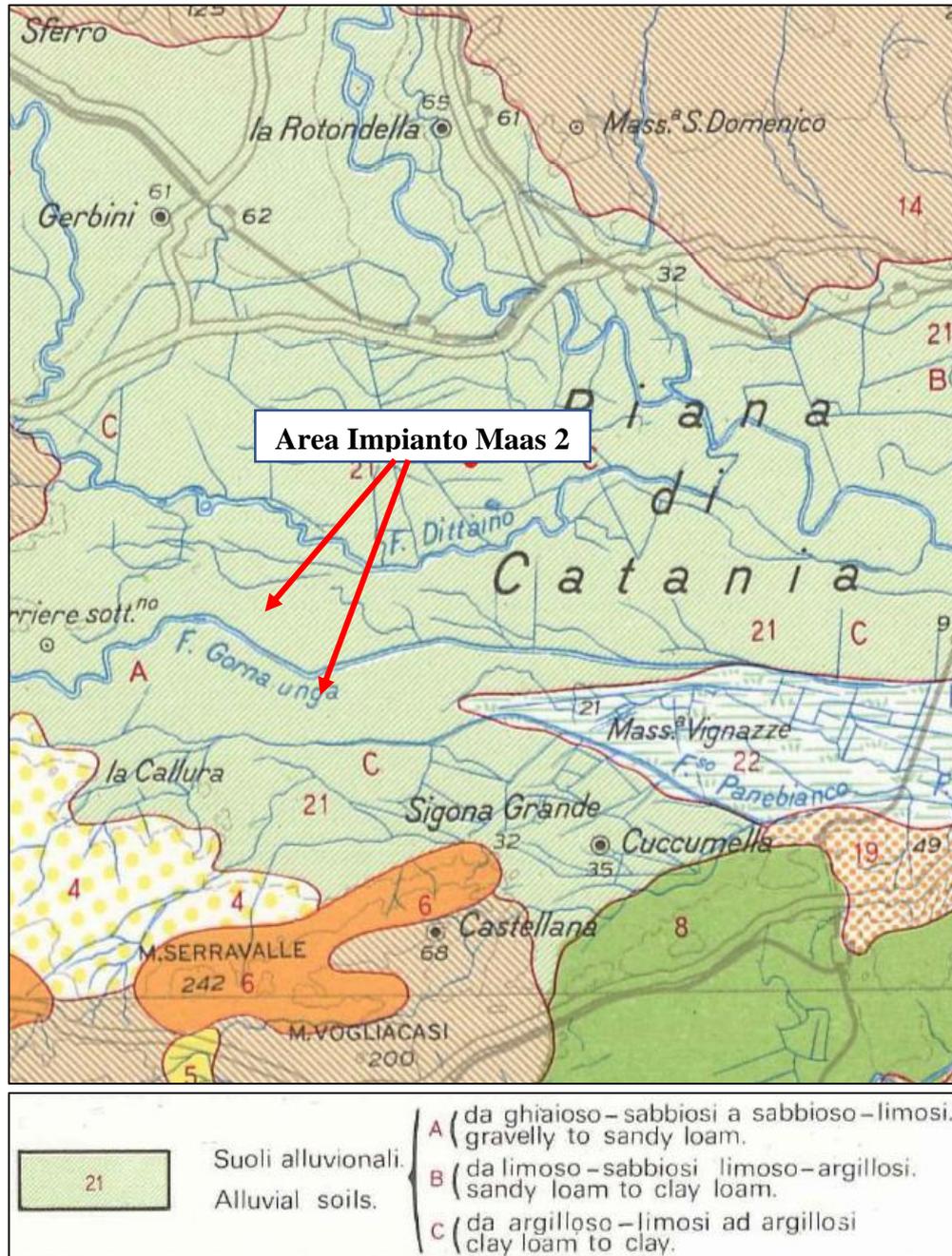


Figura 3 – Maas 2 - Estratto dalla “Carta pedologica”

3.1 Bacino del fiume Simeto

Il bacino idrografico del fiume Simeto ricade nel versante orientale dell'isola di Sicilia ed occupa un'area complessiva di 4.030 Km².

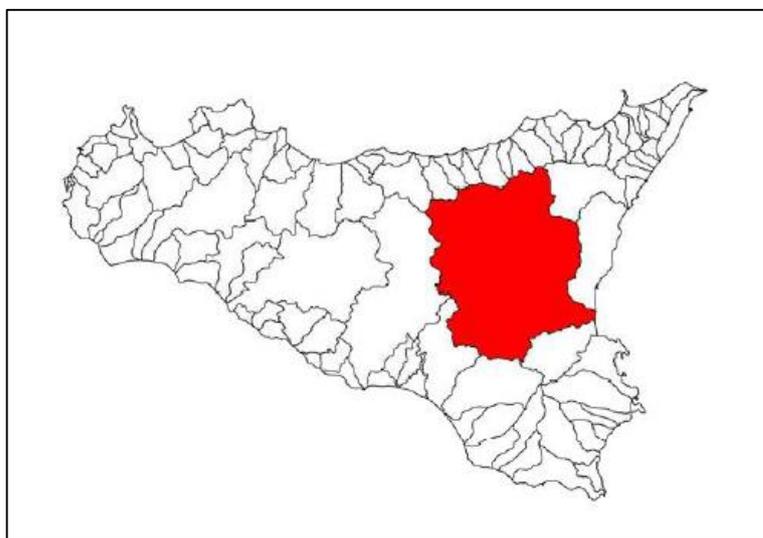


Figura 4 - Bacino idrografico del fiume Simeto

Si riporta di seguito una descrizione sintetica del bacino del Fiume Simeto, estrapolata dal “Piano di gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA) - Attuazione della Direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni - All. A. 30 - Bacino Idrografico del Fiume Simeto (094)”, in grassetto la descrizione della porzione di bacino del Dittaino su cui insiste l'impianto in progetto.

Nell'area oggetto di studio è possibile distinguere settori a diversa configurazione morfologica.

Nel settore settentrionale prevalgono le forme aspre ed accidentate, dovute alla presenza di affioramenti arenaceo-conglomeratici e quarzarenitici che costituiscono, in gran parte, il gruppo montuoso dei Nebrodi.

Ad Ovest ed a Sud-Ovest sono presenti i Monti Erei, di natura arenacea e calcarenitico-sabbiosa, isolati e a morfologia collinare; qui l'erosione, controllata dall'assetto strutturale ha dato luogo a rilievi tabulari (mesas) o monoclinali (cuestas).

Nella porzione centro-meridionale dell'area in esame, invece, i terreni postorogeni plastici ed arenacei, facilmente erodibili, così come quelli della "Serie gessoso- solfifera", danno luogo ad un paesaggio collinare dalle forme molto addolcite, interrotto localmente da piccoli rilievi isolati, guglie e pinnacoli costituiti da litotipi più resistenti all'erosione.

L'altopiano solfifero, infatti, è dominato da forme ondulate, legate alla presenza di gessi e di calcari evaporitici e, in alcuni casi, anche da affioramenti di arenarie e conglomerati miocenici. I gessi rappresentano il litotipo più diffuso della Serie Evaporitica Messiniana e, a causa della loro elevata solubilità, sono interessati da fenomeni carsici.

Il settore orientale è interessato dalla presenza del rilievo vulcanico dell'Etna; la morfologia è caratterizzata da pendii non molto accentuati che, in presenza di colate recenti, assumono un aspetto più aspro.

Infine, il settore sud-orientale, dove si inserisce l'intervento in progetto, presenta una morfologia pianeggiante in corrispondenza della “Piana di Catania”.

L'altitudine media del bacino del fiume Simeto è di 531 m.s.l.m. con un valore minimo di 0 m.s.l.m. e massimo di 3.274 m.s.l.m.

Il Fiume Simeto, propriamente detto, nasce dalla confluenza tra il Torrente Cutò, il Fiume Martello e il Torrente Saracena, nella pianura di Maniace. I suddetti corsi d'acqua si originano dai rilievi dei Monti Nebrodi, nella parte settentrionale del bacino.

Il limite del bacino interessa gran parte dei rilievi montuosi della Sicilia centro-orientale ricadenti nelle province di Catania, Enna, Messina, Palermo e Siracusa.

In particolare, lo spartiacque del bacino corre ad est in corrispondenza dei terreni vulcanici fortemente permeabili dell'Etna; a nord la displuviale si localizza sui Monti Nebrodi; ad ovest essa separa il bacino del Simeto da quello del Fiume Imera Meridionale; infine a sud-est ed a sud lo spartiacque corre lungo i monti che costituiscono il displuvio tra il bacino del Simeto e quello dei fiumi Gela, Ficuzza e San Leonardo.

Gli affluenti principali del Fiume Simeto sono il Torrente Cutò, il Torrente Martello, il Fiume Salso, il Fiume Troina, il Fiume Gornalunga e il Fiume Dittaino.

Procedendo da monte verso valle, il bacino del Fiume Simeto è distinto nei seguenti bacini principali: Alto e Medio Simeto, Salso, Dittaino, Gornalunga e Basso Simeto.

Il Bacino dell'Alto e Medio Simeto, fino alla confluenza con il F. Salso (733 Km²), comprende il versante meridionale dei Nebrodi e le pendici occidentali dell'Etna. Il reticolo idrografico è caratterizzato dalla presenza di numerosi affluenti in sponda destra dell'asta principale del Simeto (che prende tale nome dalla confluenza tra il T.te Saracena e il T.te Cutò) e dalla mancanza di una vera e propria rete idrografica principale sulle formazioni vulcaniche molto permeabili dell'Etna.

Il Bacino del Salso (808 Km²) comprende la parte più occidentale del versante meridionale dei Nebrodi e presenta una rete idrografica molto ramificata a monte (T.te di Sperlinga, T.te di Cerami, T.te Mande), un tronco centrale (a valle del serbatoio Pozzillo) che scorre nella vallata con andamento Ovest-Est e una parte finale che, dopo aver raccolto le acque del F. di Sotto Troina, sbocca nel Simeto. L'asta principale del Salso si sviluppa complessivamente per circa 65 km.

Il Bacino del Dittaino (959 Km²) è compreso tra il bacino del Salso a Nord e quello del Gornalunga a Sud e presenta una rete idrografica ramificata nella parte montana e con un andamento a meandri nella parte centrale e valliva. L'asta principale si sviluppa complessivamente per circa 93 km.

Il Bacino del Gornalunga (1001 Km²) ha origine dai Monti Erei e oltre al corso d'acqua principale, sul quale è stato realizzato il serbatoio Don Sturzo (o Ogliaastro), comprende il bacino del suo principale affluente di destra, il F. Monaci, costituito da numerosi affluenti (F.so Acquabianca, F.so Pietrarossa, F. Caltagirone, ecc). L'asta principale del Gornalunga si sviluppa complessivamente per circa 80 km.

Il Bacino del Basso Simeto, si estende dalla confluenza del Salso alla foce; esso comprende il tronco vallivo del Simeto il quale, attraversando la Piana di Catania, riceve le acque del Dittaino e successivamente quelle del Gornalunga.

Il fiume Simeto si sviluppa per una lunghezza complessiva di circa 87 km, inizialmente con prevalente direzione Nord-Sud per poi deviare progressivamente verso Est. L'asta, dal punto di vista idrografico, può suddividersi in cinque tratti principali:

- dall'origine alla confluenza con il F. Troina (5 km);
- dalla confluenza con il F. Troina alla confluenza con il F. Salso (24 km);
- dalla confluenza con il F. Salso alla confluenza con il F. Dittaino (46 km);
- dalla confluenza con il F. Dittaino alla confluenza con il F. Gornalunga (9 km);
- dalla confluenza con il F. Gornalunga alla foce (3 km).

Le caratteristiche dell'alveo variano sensibilmente anche all'interno dei singoli tratti sia a causa delle diversità geolitologiche e morfologiche dei terreni attraversati, della variazione delle pendenze di fondo e della variazione spaziale dell'ordine di grandezza delle portate, sia in relazione agli interventi di sistemazione effettuati. Tali differenze sono particolarmente rilevanti nei tratti compresi tra le confluenze del Troina e del Salso e tra le confluenze del Salso e del Dittaino.

In modo semplificato si possono distinguere due tratti:

- dall'origine alla traversa Barca (ubicata tra la confluenza del Salso con il Dittaino), tratto in cui l'alveo ha dimensioni modeste e gli interventi di sistemazione sono discontinui e finalizzati alla stabilizzazione delle sponde;
- dalla traversa Barca alla foce ove si riscontrano le caratteristiche tipiche dell'alveo di pianura e le sistemazioni sono costituite da argini continui per la difesa della piana di Catania dalle inondazioni.

In riferimento alla suddivisione in cinque tratti si riportano di seguito le caratteristiche peculiari dell'asta principale:

- Il primo tratto (origine-confluenza F. Troina) presenta caratteristiche di transizione tra quelle dei corsi d'acqua montani e di pianura. Persistono ancora vistosamente i fenomeni di trasporto e deposito di materiale più grossolano. In questo tratto non sono stati realizzati interventi di sistemazione dell'alveo.

- Il secondo tratto (confluenza F. Troina-confluenza Salso) è caratterizzato da una sistemazione continua costituita da muri di sponda e repellenti in calcestruzzo nei soli 3,5 km a monte della confluenza del F. Salso, ove il corso d'acqua scorre in un fondovalle intensamente coltivato. Più a monte, invece, l'alveo si sviluppa tra il pendio dei Nebrodi, in sponda destra, e i terreni dolcemente ondulati ed intensamente coltivati della fascia pedemontana etnea, in sponda sinistra. Ricade in questo tratto la traversa di S. Domenica utilizzata ai fini idroelettrici ed irrigui. Nella parte più alta, per molti chilometri, il fondovalle in sinistra è delimitato da una ripida parete lavica che determina un salto di quota di alcune decine di metri rispetto ai terreni adiacenti.

- Il terzo tratto (confluenza F. Salso-confluenza F. Dittaino) è diviso in due parti distinte dalla traversa Barca. La parte di monte, che si sviluppa per circa 22 km, non completamente regimentata, nonostante interessi aree estensivamente coltivate. All'inizio di questa prima parte è ubicata la traversa Contrasto che determina un piccolo invaso utilizzato sempre ai fini elettrici ed irrigui. L'alveo, che è inizialmente imposto in sinistra ad una ripida scarpata in dissesto che delimita i terreni agricoli superiori, costeggia poi al rilievo di sponda destra provocando problemi erosivi e lasciando prevalentemente in sinistra le superfici coltivate fino a giungere al piccolo invaso determinato dalla

traversa Barca di Paternò, che costituisce fonte di approvvigionamento idrico ai fini irrigui. La parte dell'alveo a valle della traversa Barca è arginata con sezione sistemata con alveo di magra e un solo piano di golena, all'inizio, e con doppi piani di golena, più a valle. I piani golenali superiori, e a volte anche quelli inferiori, sono largamente utilizzati per coltivazioni estensive. I terreni attraversati sono estesamente interessati da coltivazioni agrumicole.

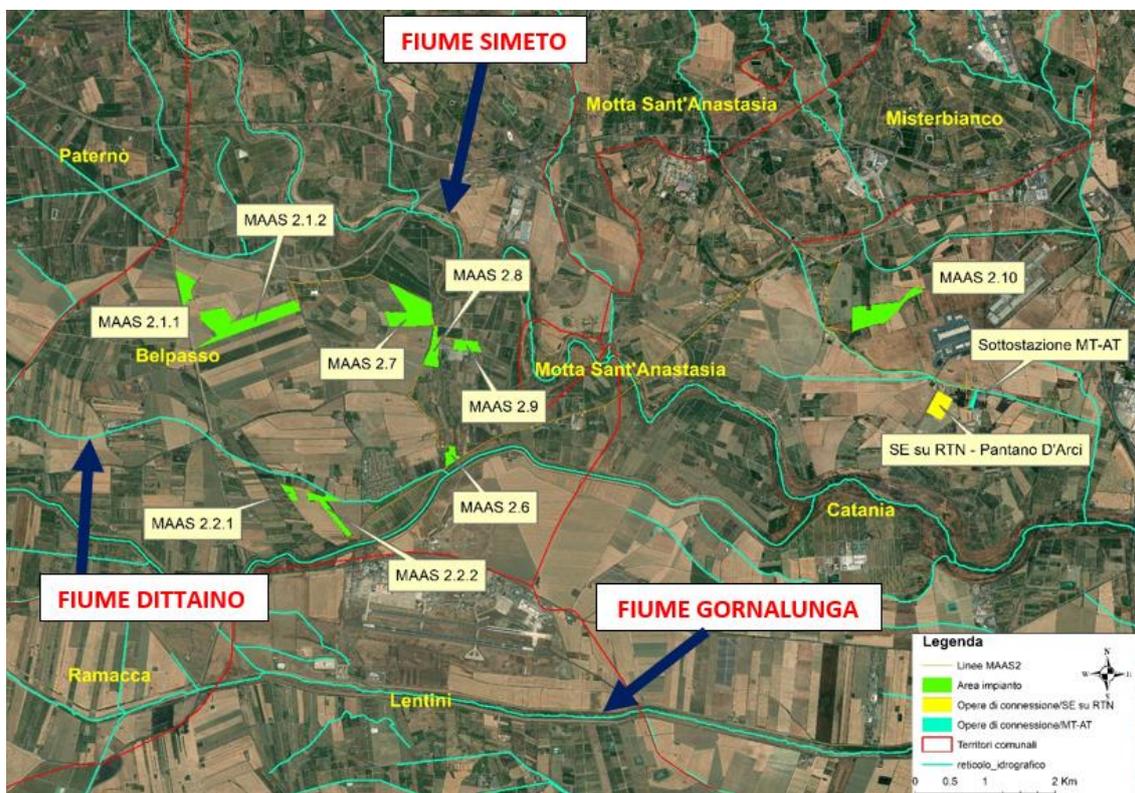


Figura 5 – Maas 2: ubicazione impianto rispetto ai corsi d'acqua Simeto, Dittaino e Gornalunga

- Nel quarto tratto (confluenza F. Dittaino-confluenza F. Gornalunga) si riscontrano le medesime caratteristiche del tratto immediatamente precedente. Varia la pendenza media (dello 0,05%) e le accresciute portate che vengono convogliate in una sezione che raggiunge larghezza complessiva anche superiore a 500 metri.
- Nel quinto tratto (confluenza F. Gornalunga-foce) il fiume giunge, circa 3 km, alla costa ionica convogliato tra argini che si allargano progressivamente sino alla foce lasciando in ultimo una sezione di larghezza superiore al chilometro. La sezione terminale risulta interessata per tutta la larghezza da un banco di sabbia e in gran parte anche da una striscia di fitta boscaglia che lascia comunque un varco attraverso il quale le acque defluiscono al mare avvicinandosi all'argine sinistro. Quest'ultimo tratto lambisce in sinistra l'area dell'Oasi del Simeto ed è costituito da un drizzagno che lascia sempre in sinistra una vecchia ansa e la vecchia foce a mare. Questa porzione del corso d'acqua ormai abbandonata dal Simeto riceve solo le acque del Buttaceto (che in passato afferiva invece al F. Simeto più a monte dell'immissione del F. Gornalunga) e del fosso Iungetto, che costituisce l'attuale recapito di gran parte delle fognature di Catania. Il fiume Dittaino trae origine, sotto il nome di torrente Bozzetta, a quota 925 m s.m. dalle pendici orientali dei monti Erei nella zona centrale della Sicilia. Sul Bozzetta è stato realizzato il serbatoio Nicoletti che raccoglie i deflussi di circa 50 kmq di bacino diretto. Nel bacino sotteso dal Nicoletti sono state realizzate solo opere di sistemazione trasversali, costituite in prevalenza da briglie semplici in calcestruzzo. Tali interventi interessano il Bozzetta, il

torrente Manna ed il vallone dell’Ammaro. A valle della diga i maggiori affluenti del Dittaino sono il torrente Calderari ed il vallone Sciaguana.

3.2 PAI vigente del bacino del bacino del Fiume Simeto

Il PAI vigente rappresenta l’assetto idraulico e il relativo livello di pericolosità come da immagine seguente.

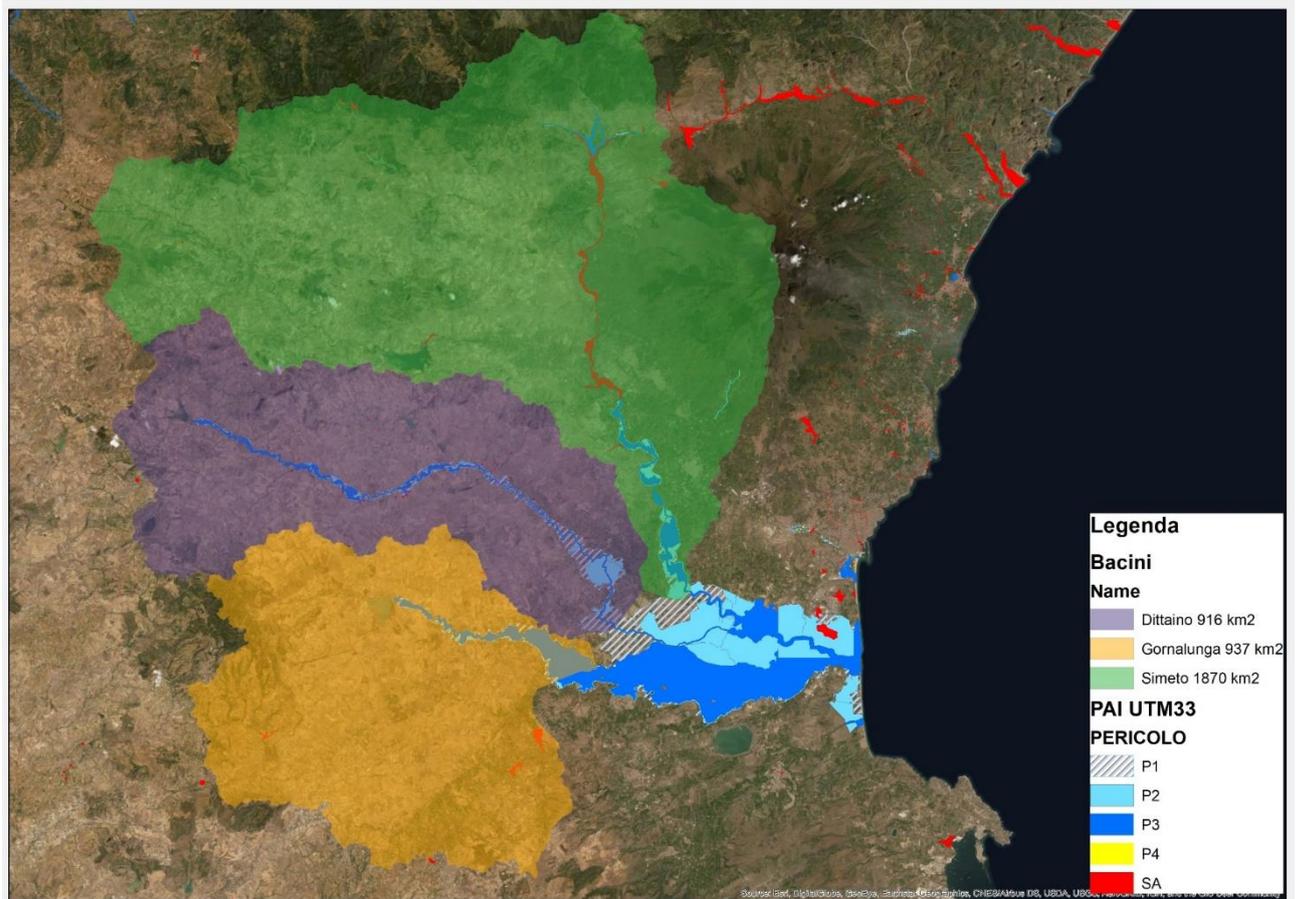


Figura 6 – PAI vigente – Corografia con localizzazione delle aree oggetto d’intervento rispetto alla pericolosità idraulica

Tale perimetrazione ha origine da un unico macro-studio allegato al PAI riferito al bacino del SIMETO (Cod. 094) che considera in moto permanente la simultanea propagazione delle piene, anch’esse simultanee, dei tre corsi d’acqua di seguito elencati:

- asta principale del Simeto
- affluente Dittaino
- affluente Gornalunga.

Nel documento vengono definiti valori delle portate al colmo per i periodi di ritorno di riferimento oltre ai tempi caratteristici di corrivazione per ciascuno dei tre bacini analizzati. Di seguito nelle tabelle, si riportano tempi caratteristici e valori al colmo di portata massimi definiti dal PAI.

Tabella 1 – PAI vigente: tempi caratteristici dei corsi d'acqua Simeto, Dittaino e Gornalunga

TEMPI CARATTERISTICI	a) Fase ascendente idrogramma Tempi di corrivazione [h]	b) Fase discendente idrogramma = $2,5 \cdot t_c$ [h]	c) Durata idrogramma di piena (a+b) [h]
SIMETO	15	37.5	52.5
DITTAINO	21	52.5	73.5
GORNALUNGA	17	42.5	59.5

Tabella 2 - PAI vigente: portate al colmo di piena dei corsi d'acqua Simeto, Dittaino e Gornalunga

VALORI DI PORTATA AL COLMO [m ³ /s]	P3 (TR 50 ANNI)	P2 (TR 100 ANNI)	P1 (TR 300 ANNI)
SIMETO	3993	4884	6710
DITTAINO	1642	2234	3503
GORNALUNGA	1656	2253	3533

3.3 Ipotesi alla base dello studio PAI e criteri di determinazione delle aree a pericolosità idraulica

Di seguito si forniscono le principali ipotesi alla base dello studio PAI delle aree a pericolosità idraulica nel bacino del Simeto:

- Adozione del codice di calcolo monodimensionale HEC-RAS, con ipotesi di moto permanente;
- Analisi condotte utilizzando rilievi e cartografia estratti dalla Carta Tecnica Regionale, CTR (scala 1:10.000) integrati con analisi cartografica e territoriale e dai sopralluoghi di campagna (verifica dello stato di fatto del fondo alveo, raccolta di documentazione fotografica, ecc.).

Volendo richiamare i criteri genericamente descritti nella Relazione del PAI anno 2004, nei casi in cui la scala della cartografia disponibile e le connesse sezioni trasversali della valle fluviale non consentissero di ottenere un'affidabile distribuzione spaziale delle altezze idriche all'interno dell'area inondata (ottenuta, peraltro, utilizzando modelli monodimensionali, oppure bidimensionali semplificati), si è fatto riferimento, per la produzione delle carte di pericolosità idraulica oggi cogenti, ad una metodologia cosiddetta "semplificata", ovvero che valuta la pericolosità soltanto in funzione del periodo di ritorno, senza quindi combinarlo con la distribuzione spaziale dei tiranti idrici.

T (anni)	P
50	P3 (alta)
100	P2 (moderata)
300	P1 (bassa)

Figura 7 – PAI 2004: individuazione della pericolosità idraulica secondo la metodologia semplificata

Inoltre, qualora le geometrie delle sezioni identificative del dominio monodimensionale analizzato nel modello idraulico del PAI, per ciascun corso d'acqua, non fossero risultate sufficienti a contenere il pelo libero conseguente al calcolo effettuato, al fine di determinare le aree a pericolosità idraulica si sono operate ulteriori semplificazioni, descritte nei punti seguenti, per valutare la pericolosità anche all'esterno del dominio monodimensionale di studio:

1. *Per l'individuazione delle aree inondate si è fatto riferimento alle quote del pelo libero, ottenute dai calcoli del modello HEC-RAS, cercando ove possibile di intersecare tali piani ideali con le curve di livello riportate nella cartografia di riferimento.*
2. *Per il tratto del fiume Simeto compreso tra la confluenza del fiume Dittaino alla foce, pur utilizzando il modello bidimensionale fornito dal Dipartimento di Ingegneria Idraulica ed Applicazioni Ambientali di Palermo, la delimitazione delle aree a diversa pericolosità è stata eseguita utilizzando la metodologia semplificata, poiché la cartografia di riferimento (CTR 10000) non permette di tracciare con sufficiente precisione la distribuzione dei tiranti d'acqua... ”*

Conseguentemente a tali ipotesi operative, necessarie e compatibili con il livello informativo dell'epoca di redazione dello studio, è possibile asserire che il criterio di redazione delle aree a pericolosità idraulica rappresentate dal PAI Sicilia per il bacino del Simeto, risulta estremamente a vantaggio di sicurezza.

3.4 Valutazioni idrauliche di dettaglio delle aree di interesse sulla base del PAI propedeutiche all'impostazione della modellazione idraulica

Come detto in precedenza, il progetto in argomento si compone degli interventi rappresentati di seguito, dove gli stessi sono stati sovrapposti alla classificazione delle aree, fornita dal PAI vigente, rispetto alla pericolosità idraulica.

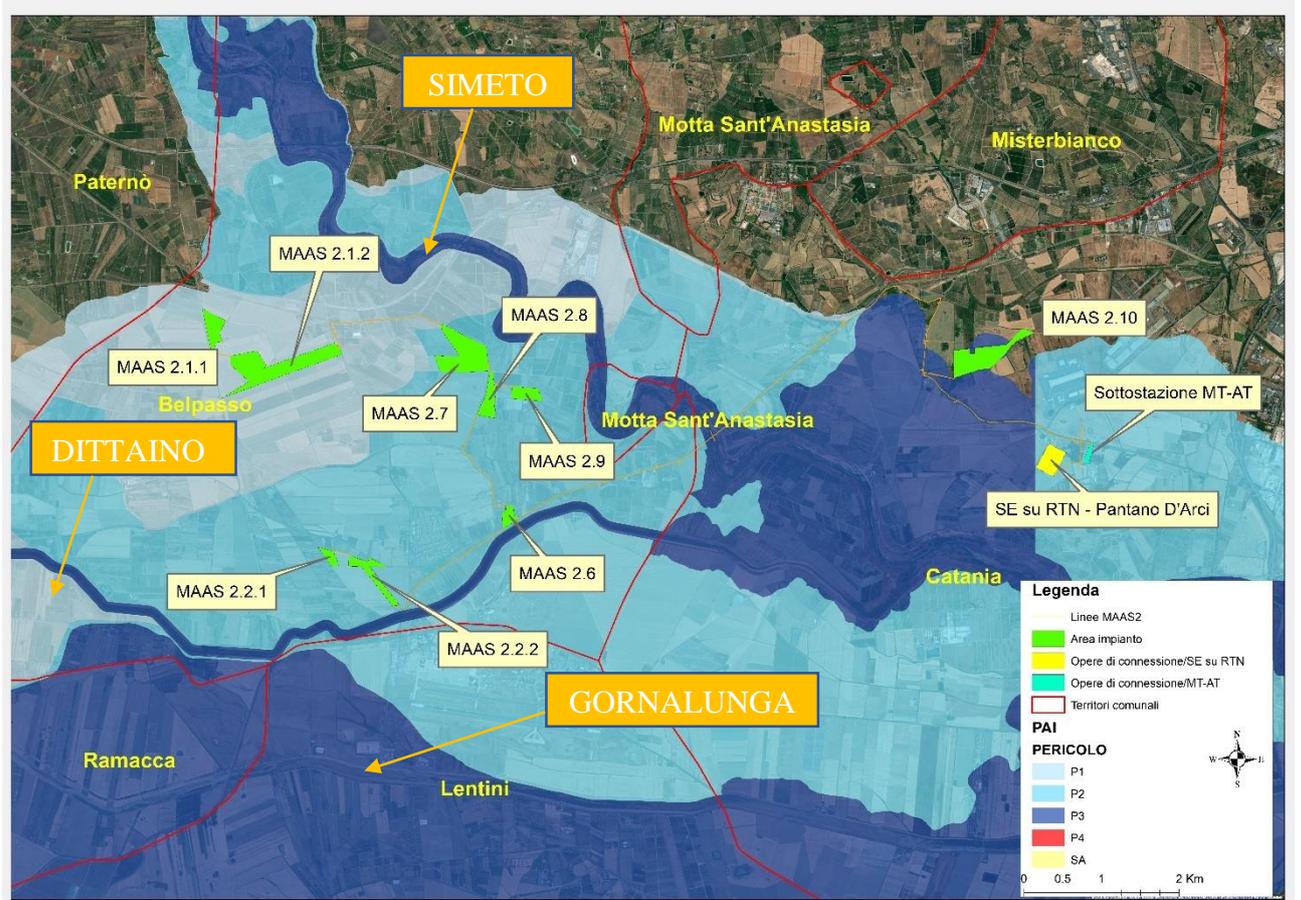


Figura 8 - Localizzazione opere dell'impianto Maas 2 e sovrapposizione con aree a diversa pericolosità idraulica del PAI vigente

Tabella 3 - Aree di progetto Maas 2 e sottostazione MT-AT, SE Terna (non in progetto) e relativi livelli di pericolosità

Campo	Comune	Pericolosità PAI	Periodo di ritorno di riferimento [anni]	Corso d'acqua interferente in accordo al PAI
MAAS 2.1.1	Belpasso	P1	300	Dittaino- Simeto
MAAS 2.1.2	Belpasso	P1	300	Dittaino- Simeto
MAAS 2.2.1	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.2.2	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.6	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.7	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.8	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.9	Belpasso	P2	100	Dittaino- Simeto
MAAS 2.10	Catania	P3	50	Simeto
Sottostazione MT-AT	Catania	P2	100	Simeto
SE Pantano d'Archi	Catania	P2	100	Simeto

Si evidenzia, quindi, che da una lettura del PAI vigente le aree interessate dagli interventi sono idraulicamente connesse principalmente ai fiumi Dittaino e Simeto. Si è scelto di inserire nelle modellazioni anche il contributo del corso d'acqua Gornalunga, in quanto ricompreso nel dominio di modellazione e dello studio originario della perimetrazione PAI esaminata, per la quale non è possibile escludere a priori un'interrelazione con l'assetto idraulico dell'area di interesse.

La SE Terna su RTN, non essendo parte di questo progetto, è stata ricompresa nella tabella sopra riportata solo per fini conoscitivi.

Al fine di valutare localmente l'interazione idraulica tra interventi in progetto ed esondazioni dei corsi d'acqua, il modello alla base del PAI, per come impostato e descritto nei paragrafi precedenti, non permette di identificare con ragionevole certezza entità e direzioni di deflusso delle esondazioni.

L'analisi degli aspetti sopra descritti configura la necessità di impostare un modello in moto vario con componente bidimensionale per valutare l'effettiva entità e direzione dei deflussi. Da qui, sarà poi possibile analizzarne l'incidenza sulle opere in progetto per valutarne la compatibilità idraulica.

Come da tabella sopra riportata, la classificazione del livello di pericolosità del PAI vigente delle aree di interesse per l'intervento indica contestualmente il periodo di ritorno cui riferire tali analisi.

Nei prossimi paragrafi viene quindi descritto il modello di calcolo adottato per le verifiche e tutte le valutazioni effettuate ai fini di per la definizione del modello idraulico utilizzato.

4 Modello di calcolo delle verifiche idrauliche condotte in condizione di moto permanente e moto vario

La modellazione idraulica alla base delle verifiche di compatibilità idrologico e idraulica riportate nel presente elaborato, e condotte in accordo alle NTA del PAI 2004, è stata effettuata attraverso il software HEC-RAS della *US Army Corps of Engineers*, codice di calcolo che permette di eseguire modellazioni idrauliche di corsi d'acqua naturali o canali artificiali al fine di ricostruire il profilo di corrente e le caratteristiche idrauliche in tutte le sezioni degli stessi.

Le modellazioni idrauliche possono essere eseguite, secondo le necessità, in regime di moto permanente o vario e con schema di moto monodimensionale, bidimensionale o combinato. La versione 5.0.6 presenta un'interfaccia grafica del tutto paragonabile a quella dei precedenti software sviluppati da HEC; le differenze principali si riscontrano nell'editor Geometric Data, dove sono state aggiunte opzioni per la creazione delle aree 2D e nel potenziamento degli strumenti GIS attraverso il modulo RAS Mapper.

Nelle precedenti versioni, il software HEC-RAS offriva già la possibilità di effettuare diversi tipi di simulazioni:

- Simulazioni in condizioni stazionarie, note come condizioni di moto permanente, (*steady flow*) in corrente lenta, veloce o mista, calcolando i corrispettivi profili di corrente;
- Simulazioni in condizioni non stazionarie, note come condizioni di moto vario, (*unsteady flow*);
- Simulazioni per la classificazione e quantificazione di processi di idrodinamica del trasporto solido relativi a fenomeni di erosione o deposizione generalizzata e/o localizzata.

La versione 5.0.6, offrendo la possibilità di costruire modelli di tipo integrato, come quello costruito in questo lavoro, permette di adottare, in un unico codice di simulazione, entrambi gli schemi di calcolo monodimensionale e bidimensionale, accoppiando in maniera dinamica la risoluzione delle equazioni del moto (equazioni DSV e modello diffusivo) attraverso una comune interfaccia grafica.

Le aree di flusso bidimensionali possono essere utilizzate in diversi modi e per diversi scopi; a titolo dimostrativo di seguito sono elencati degli esempi di come le aree 2D implementate nella versione 5.0.6 possono essere utilizzate come supporto alla modellazione di HEC-RAS:

- Dettagliata modellazione 2D del canale;
- Dettagliata modellazione 2D del canale e delle aree golenali;
- Combinazione tra canale 1D e aree golenali 2D;
- Combinazione tra canale 1D e aree inondabili esterne agli argini;
- Connessione diretta del corpo idrico 1D all'interno delle aree inondabili 2D;
- Connessione diretta tramite l'ausilio di strutture idrauliche tra aree inondabili 2D e aree di accumulo 1D;
- Aree inondabili 2D multiple all'interno di una singola geometria;
- Connessione diretta multipla di aree 2D con strutture idrauliche;
- Analisi semplificate e molto dettagliate in presenza di dighe;
- Analisi semplificate e molto dettagliate degli argini;

- Modellazione mono e bidimensionale in grado di gestire moto supercritico e subcritico e passaggio attraverso risalti idraulici.

4.1 Equazioni del modello (caso moto permanente)

La procedura di calcolo di HEC-RAS si basa sulla soluzione di sistemi di equazioni caratterizzanti l'idraulica dei canali a pelo libero, secondo gli schemi monodimensionale, bidimensionale o combinato e con diversi regimi di moto in funzione delle esigenze.

Il calcolo del profilo di corrente, in condizioni di moto permanente, è effettuato attraverso la risoluzione delle Equazioni dell'Energia fra due sezioni successive mediante un processo iterativo denominato *standard step method*. Indicate con 1 e 2 rispettivamente le sezioni di monte e di valle, l'equazione dell'energia è scritta nella seguente forma:

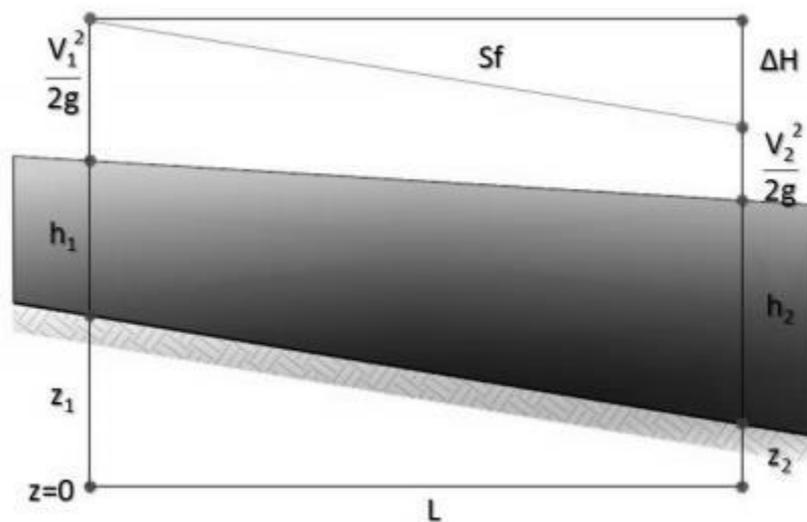


Figura 9 - Conservazione dell'energia: schema di calcolo

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Dove:

- Y_i sono i tiranti idrici;
- Z_i sono le quote geodetiche;
- V_i sono le velocità medie;
- α_i sono i coefficienti di ragguaglio delle altezze cinetiche;
- g è l'accelerazione di gravità;
- h_e è la perdita di carico totale nel tratto considerato.

Il valore di h_e è definito dalla somma delle perdite dovute all'attrito (*perdite distribuite*) e delle perdite di carico dovute alla contrazione o all'espansione della vena liquida (*perdite localizzate*), pertanto sono espresse dalla seguente relazione:

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

dove:

- L è la lunghezza del tratto fluviale mediata sulle portate
- S_f è la cadente della linea dei carichi totali;
- C è il coefficiente di espansione/contrazione compreso tra 0 e 1, che tiene conto delle perdite di carico dovute all'espansione e alla contrazione della vena fluida.

Il codice HEC-RAS suddivide l'area interessata al moto in tre zone principali, perpetuando la convenzione introdotta con HEC-2, zona inondabile in sinistra (*left overbank, lob*), alveo ordinario (*channel, ch*), zona inondabile in destra (*right overbank, rob*). Per tener conto dell'andamento curvilineo dell'asse, la distanza di calcolo tra due sezioni viene ponderata rispetto alla frazione di portata che fluisce rispettivamente nella zona inondabile in sinistra (*lob*), nel canale ordinario (*ch*) e nella zona inondabile in destra (*rob*). La lunghezza mediata del tratto L è calcolata quindi nel seguente modo:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{rob}\bar{Q}_{rob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{rob} + \bar{Q}_{ch}}$$

con:

- L_i lunghezze del tratto relative rispettivamente alla zona inondabile in sinistra ($i = lob$), al canale principale ($i = ch$) e alla zona inondabile in destra ($i = rob$);
- \bar{Q}_i portate medie attraverso la sezione rispettivamente nella zona inondabile in sinistra, nel canale principale e nella zona inondabile in destra.

La determinazione della *Conveyance K* (capacità di portata) della sezione e delle altezze cinetiche ragguagliate richiede di norma una maggiore suddivisione del flusso in porzioni di sezione all'interno delle quali la velocità possa ritenersi uniformemente distribuita. Nelle zone inondabili, l'approccio usato da HEC-RAS (o meglio l'approccio di default, ma il programma ne contempla anche altri di carattere opzionale) consiste nell'assumere come base della suddivisione linee verticali, in corrispondenza dei punti di discontinuità nel valore della scabrezza n . La valutazione della conveyance per ogni elemento viene quindi effettuata combinando la formula di Chezy (per il calcolo delle portate) con la formula di Manning (relativa alla scabrezza) scritta per unità di misura del sistema internazionale (SI):

$$V = \chi \sqrt{RSf} \quad Q = A\chi \sqrt{RSf}$$

Se si pone:

$$K = A\chi\sqrt{R} \quad \text{e} \quad \chi = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}}$$

$$Q = K\sqrt{S_f} \quad \text{e} \quad K = \frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}$$

$$Q = \frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}\sqrt{S_f}$$

con:

- K Conveyance espressa in $[m^3/s]$;
- n indice di scabrezza di Manning espressa in $[s/m^{1/3}]$;
- A area relativa al deflusso espressa in $[m^2]$;
- R raggio idraulico espresso in $[m]$
- χ coefficiente di scabrezza $[m^{1/2}/s]$

Tutte le grandezze sono riferite alla singola porzione di flusso. Le *conveyance* parziali di ogni zona inondabile vengono quindi sommate per ottenere infine i due valori di *conveyance* relativi rispettivamente alla zona inondabile in destra e in sinistra.

Di norma, il canale principale viene invece trattato come un unico elemento dotato di un solo valore di *conveyance*

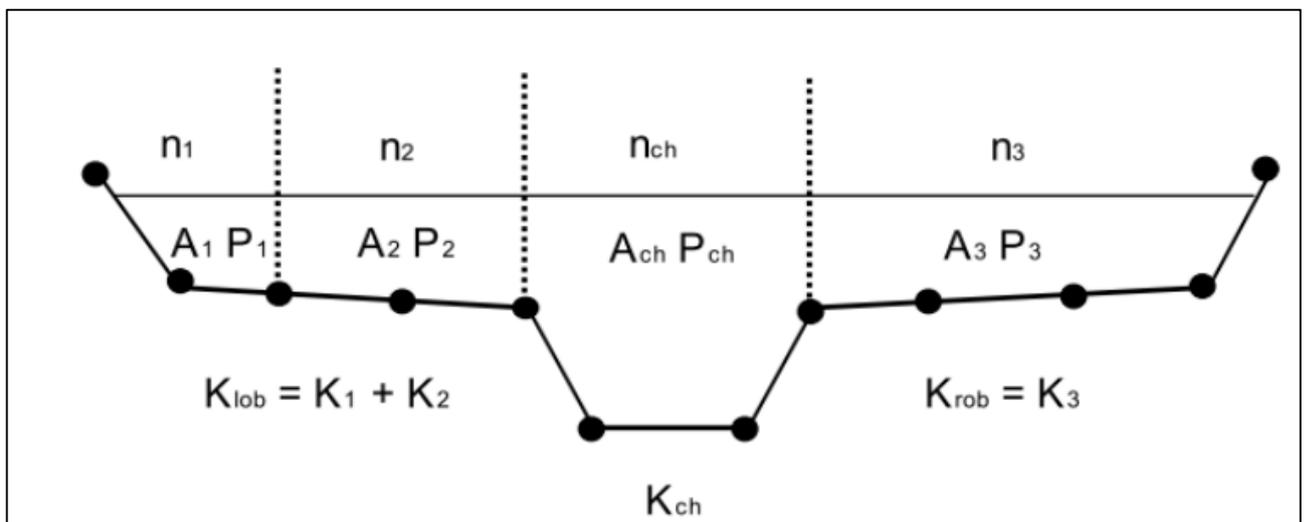


Figura 10 - Software HEC-RAS: schema attribuzione conveyance alla sezione di calcolo idraulico

Il valore finale unico di K per l'intera sezione è ottenuto come somma dei tre contributi parziali (*lob*, *ch*, *rob*).

Per ciò che concerne, invece, il coefficiente di ragguglio α , HEC-RAS opera nel seguente modo: per un dato valore del tirante idrico nella sezione, l'altezza cinetica viene calcolata come un valor medio pesato sulla portata fra quelli associati alle tre sottosezioni, zona inondabile sinistra, canale, zona inondabile destra.

In pratica, l'altezza cinetica viene calcolata mediante la seguente relazione generale:

$$\frac{\alpha \bar{V}^2}{2g} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{V_i^2 Q_i}{2g}}{Q_{tot}}$$

da cui

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^2 Q_i}{Q_{tot} \bar{V}^2}$$

Riguardo alle perdite di carico concentrate, il programma considera una contrazione ogni volta che l'altezza cinetica della sezione di monte risulta maggiore di quella della sezione più a valle, viceversa per l'espansione.

La modalità attraverso cui il programma calcola per ogni sezione il valore incognito dell'altezza della superficie libera, a partire da dati geometrici e di portata assegnati in input, e costituita da una soluzione iterativa delle equazioni dell'energia e delle perdite di carico.

La procedura di calcolo consiste, più in dettaglio, nei seguenti passi:

1. Scelta di un valore di primo tentativo per la quota della superficie libera (*WS1, water surface*) in corrispondenza della sezione di monte per correnti lente, o di valle, per correnti veloci;
2. Calcolo, a partire dal valore assunto al passo 1, dei corrispondenti valori di *conveyance* totale e di altezza cinetica;
3. Stima di *Sf* e soluzione dell'equazione delle perdite di carico per il calcolo delle perdite di carico totali *he*;
4. Soluzione, a partire dai valori ottenuti al passo 2 e 3, dell'equazione dell'energia per il calcolo della superficie libera *WS2*;
5. Confronto fra il valore di *WS2* calcolato ed il valore assunto al passo 1 e reiterazione dei passi 1-5 fino al raggiungimento della convergenza, definita per default da una differenza fra i due valori inferiore a *0,003 m* (o qualsiasi altra tolleranza definibile dall'utente).

La scelta del valore dell'altezza della superficie libera di partenza viene effettuata con metodi che variano fra la prima e le successive iterazioni. Per il primo tentativo si adotta un valore ottenuto dalla proiezione dell'altezza calcolata alla sezione precedente; alla seconda iterazione il valore di primo tentativo viene incrementato del 70% dell'errore (*WScalcolata - WSassunta*) relativo al primo step; infine il terzo tentativo e seguenti sono basati sul metodo "secante", che proietta il valore della differenza fra quota calcolata e quota assunta ai due tentativi precedenti, secondo la relazione:

$$WS_i = WS_{i-2} - Err_{i-2} \cdot \frac{Err_{ass}}{Err_{diff}}$$

dove:

- *WS_i* è il valore di *WS* assunto al passo *i*-esimo
- *WS_{i-1}* è il valore di *WS* assunto nella (*i-1*) - esima iterazione
- *WS_{i-2}* è il valore di *WS* assunto nella (*i-2*) - esima iterazione

e gli errori sono:

- $Erri-2$ è l'errore relativo alle due iterazioni precedenti ($WScalcolato, i-2 - WSi-2$);
- $Errass = WSi-2 - WSi-1$
- $Errdiff = WSi-1 - WScalcolatoi-1 + Erri-2$

La variazione di WS fra un tentativo e il successivo è vincolata a un massimo di $\pm 50\%$ del valore assunto allo step precedente.

Il numero massimo delle iterazioni risulta comunque limitato (per default pari a 20) e nel corso di esse il programma tiene traccia del valore di WS che produce il minimo errore fra valore assunto e valore calcolato, indicato come "superficie libera di minimo errore". Qualora il massimo delle iterazioni venga eguagliato prima del raggiunto bilanciamento, il programma calcola l'altezza critica e verifica se l'errore associato alla superficie libera di minimo errore è inferiore ad una prefissata tolleranza. Se questo accade e se tale superficie è ben posta rispetto all'altezza critica calcolata (ovvero è maggiore dell'altezza critica per corrente lenta e minore per corrente veloce), allora il programma assume proprio tale valore come risposta finale del processo iterativo, altrimenti adotta l'altezza critica, producendo in entrambi i casi una nota informativa.

L'incapacità di bilanciare l'equazione dell'energia entro il dato numero di iterazioni è generalmente da imputarsi ad un numero di sezioni non adeguato.

L'altezza critica viene assunta anche ogniqualvolta la superficie libera calcolata risulta "mal posta" rispetto ad essa, ovvero quando risulta al di sotto dell'altezza critica per correnti lente e al di sopra per correnti veloci.

Il programma calcola l'altezza critica mediante un processo iterativo in cui viene assunto un valore di WS cui corrisponde il valore minimo del carico totale H . I metodi impiegati per sviluppare tale processo sono due: il metodo "parabolico" ed il metodo "secante". Il primo risulta più veloce a livello computazionale, ma in grado di localizzare un solo punto di minimo. Dal momento che per la maggior parte delle sezioni esiste un solo minimo del carico totale, il metodo parabolico rappresenta il metodo di default del programma, il quale si riserva comunque la facoltà di passare al metodo secante qualora il primo non converga.

Il passaggio attraverso l'altezza critica rende tuttavia inapplicabile l'equazione dell'energia, la quale si basa sull'ipotesi di condizioni di flusso gradualmente variato.

Tutti i fenomeni che producono una transizione corrente lenta – corrente veloce e viceversa, quali variazioni di pendenza, costrizioni associate alla presenza di un ponte, confluenze, ecc., sono quindi affrontati da HEC-RAS col ricorso all'equazione dei momenti. La forma generale dell'equazione dei momenti applicata alla porzione di flusso compresa fra due sezioni 1 e 2 è la seguente:

$$P_2 - P_1 + W_x - F_f = Q\rho\Delta V_x$$

Dove:

- $P_{1,2}$ è la spinta idrostatica in corrispondenza delle sezioni 1 e 2
- W_x è la componente della forza peso nella direzione del moto
- F_f è la forza resistente dovuta all'attrito
- Q è la portata

- ρ è la densità dell'acqua
- V_x è la variazione di velocità fra le sezioni 1 e 2 nella direzione del moto

Esplicitando i vari termini si ottiene la forma funzionale dell'equazione dei momenti utilizzata dal programma:

$$\frac{\beta_2 Q_2^2}{g A_2} + A_2 \bar{V}_2 + \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_0 - \left(\frac{A_1 + A_2}{2}\right) L S_f = \frac{\beta_1 Q_1^2}{g A_1} + A_1 \bar{V}_1$$

con

- $A_{1,2}$ area bagnata relativa alle sezioni 1 e 2;
- L distanza fra le sezioni 1 e 2 misurata lungo la direzione x ;
- $I_{1,2}$ coefficiente di ragguglio che tiene conto delle variazioni nella distribuzione della velocità in canali irregolari (permette di modellare il problema in termini dei valori medi di V);
- S_0 = pendenza del canale;
- S_f = cadente della linea dei carichi totali;

L'equazione precedente si specifica poi ulteriormente per l'analisi di particolari condizioni idrauliche quali confluenze, ponti, ecc.

4.1.1 Equazioni del modello (caso moto vario)

Tale modello è stato costruito a partire dalle *Equazioni differenziali di Continuità e del Moto*. Per la derivazione delle equazioni del moto vario si adottano le seguenti ipotesi:

- La distribuzione delle pressioni è di tipo idrostatico (ipotesi valida se le linee di flusso non presentano curvatura accentuata);
- La pendenza di fondo alveo è piccola, cosicché la sezione trasversale normale alla corrente si confonde con la sezione verticale;
- L'alveo è prismatico, le variazioni nella sezione trasversale e nella pendenza di fondo possono essere prese in considerazione approssimando il corso d'acqua con una serie di tratti prismatici;
- Le perdite di carico possono essere espresse tramite una delle classiche formule adottate per il moto uniforme (si utilizza l'equazione di Manning); con questa ipotesi si assume che in regime di moto vario ad una data velocità V della corrente si abbiano le stesse perdite di carico che si avrebbero in moto uniforme con la stessa velocità;
- La velocità e le accelerazioni lungo la verticale sono trascurabili rispetto alle analoghe grandezze in direzione del moto;
- Le variazioni della densità del fluido sono trascurabili.

Adottando le ipotesi sopra elencate e considerando uno schema, ancora di tipo monodimensionale, si ottengono le classiche equazioni di De Saint-Venant; la prima di esse è l'*Equazione di Continuità*:

$$\frac{\partial A(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} - q_{lar}(s, t) = 0$$

La seconda, l'*Equazione del Moto*, si ottiene dall'applicazione dell'equazione globale dell'equilibrio dinamico applicata ad un opportuno volume di controllo:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \left(\frac{\partial z}{\partial x} - i + S_f \right) = 0$$

I cui termini rappresentano rispettivamente: l'accelerazione locale, l'accelerazione convettiva, l'effetto di pressione, l'effetto della gravità e l'effetto delle resistenze.

Lo schema monodimensionale è applicabile nel caso di corsi d'acqua con un alveo a sezione semplice, privo cioè di zone inondabili laterali. Tuttavia, tale schema viene applicato anche al caso di alvei a sezione composta, considerando le zone inondabili al di fuori del canale come un'unica area di accumulo o di espansione. Essa scambia acqua con il canale ed il flusso in tali aree è considerato come se si muovesse in un canale separato. Per i due flussi separati vengono scritte le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto e, per semplificare il problema, si ipotizza che la superficie dell'acqua sia definita da un'unica superficie orizzontale in ogni sezione normale alla direzione del flusso, in maniera tale che lo scambio di quantità di moto tra il canale e le aree laterali sia trascurabile e la portata sia distribuita secondo l'intera sezione.

La suddivisione della portata defluente tra l'alveo centrale (*channel*) e l'area costituita dalle zone inondabili (*floodplain*) viene effettuata attribuendo al primo una frazione della portata complessiva del canale Q_c determinata come segue:

$$Q_c = K_c K_c + K_f Q$$

con:

$$K_c = \frac{1}{n} A_c R_c^{\frac{2}{3}} \quad \text{e} \quad K_f = \frac{1}{n} A_f R_f^{\frac{2}{3}}$$

I pedici c ed f indicano rispettivamente l'alveo centrale e l'area golenale, K è la conduttività idraulica (*conveyance*). L'accoppiamento delle equazioni per il canale e per la zona inondabile è effettuato attraverso un coefficiente di velocità β che mette in relazione i coefficienti convettivi, espresso come

$$\beta = \frac{v_c Q_c + v_f Q_f}{Q A}$$

Sotto queste ipotesi le equazioni del moto scritte alle differenze finite diventano:

$$\Delta Q + \frac{\Delta A_c}{\Delta t} x_e + \frac{\Delta A_f}{\Delta x_f} x_f + \frac{\Delta S}{\Delta t} x_f - \bar{Q}_i = 0$$

$$\frac{\Delta(Q_c \Delta x_c + Q_f \Delta x_f)}{\Delta t \Delta x_e} + \frac{\Delta(QV\beta)}{\Delta x_e} + g \bar{A} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x_e} + \bar{S}_f \right) = 0$$

nelle quali:

- x_e è l'equivalent flow path, ovvero un contorno bagnato equivalente in cui si considerano i contributi di resistenza esercitati dalle zone inondabili laterali sul flusso;
- S_f la pendenza piezometrica per l'intera sezione;
- \bar{A} la somma delle aree del canale e delle zone inondabili;
- S è l'accumulo nella parte non contribuyente della sezione;

- In ultimo $\Delta(QV\beta)=(\Delta VcQc+\Delta VfQf)$.

4.1.2 Soluzione numerica adottata dal programma

Per la risoluzione del sistema non lineare delle equazioni differenziali, il software adotta la linearizzazione proposta da Preissmann-Cunge-Chen applicata ad uno schema di calcolo implicito alle differenze finite basato su 4 punti (box scheme), illustrato nella figura seguente:

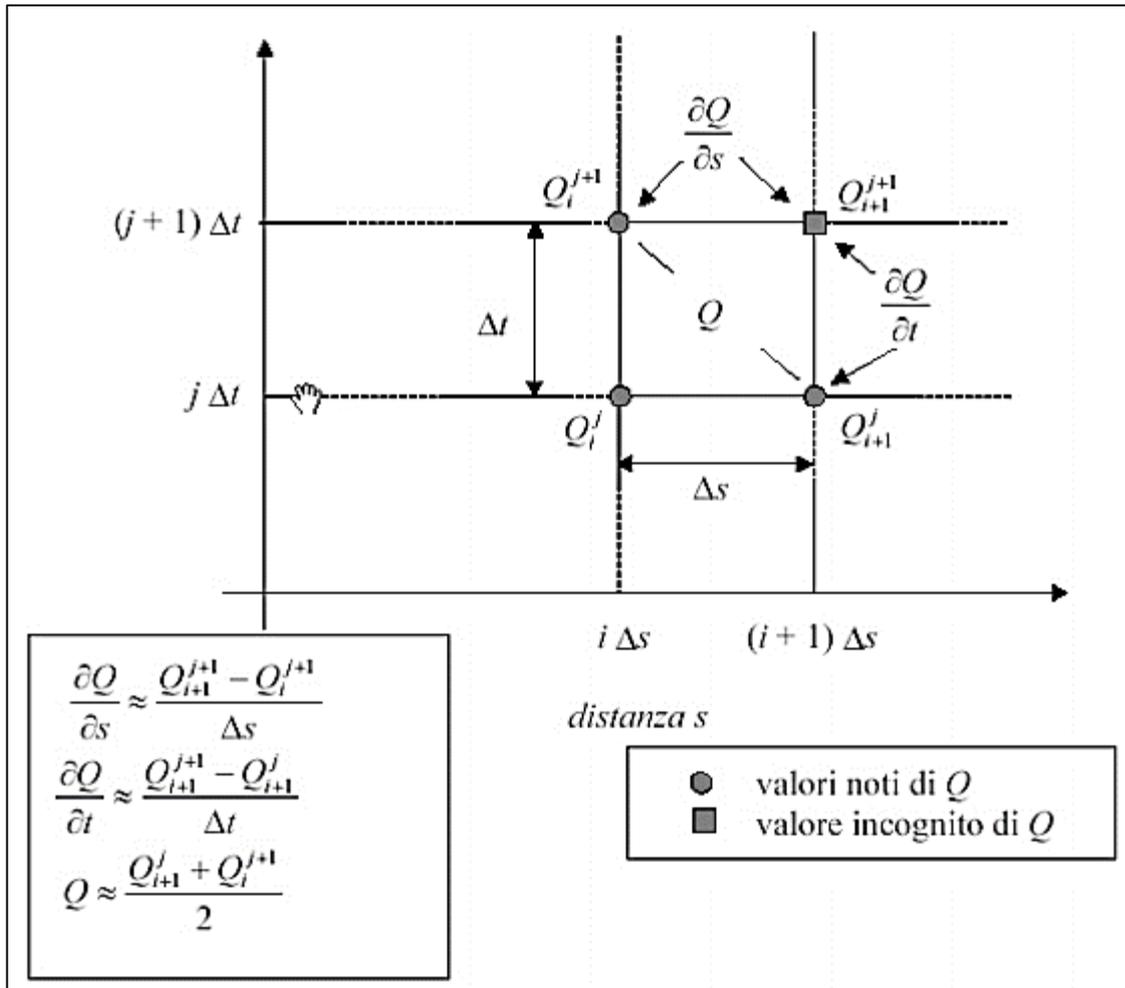


Figura 11 - Modello Hec-Ras: schema per soluzione numerica moto vario

Le equazioni del moto in forma differenziale, scritte sopra, in questo schema di calcolo diventano:

$$CQ_1^j \Delta Q_j + CZ_1^j \Delta z_j + CQ_2^j \Delta Q_{j+1} + CZ_2^j \Delta z_{j+1} = CB_j$$

$$MQ_1^j \Delta Q_j + MZ_1^j \Delta z_j + MQ_2^j \Delta Q_{j+1} + MZ_2^j \Delta z_{j+1} = MB_j$$

Avendo per ogni tronco fluviale, diviso in N-1 tratti, 2N incognite (Q e z negli N nodi) e 2N-2 equazioni (le equazioni negli N-1 tratti) le condizioni al contorno da imporre saranno sempre due.

L'analisi di stabilità della soluzione con Von Neumann mostra che lo schema implicito è teoricamente incondizionatamente stabile per $0,5 < \theta \leq 1$, condizionatamente stabile per $\theta = 0,5$ e instabile per $\theta < 0,5$, dove θ è un parametro presente in tutte le relazioni che esprimono i singoli termini delle equazioni

Tutti i termini presenti in queste equazioni, infatti, vengono fuori da diverse semplificazioni imposte e riassunte in breve nelle tabelle seguenti.

Tabella 4. Coefficienti per l'equazione di bilancio della quantità di moto e Coefficienti per l'equazione di bilancio della massa

Coefficient	Value
CQ1 _j	$\frac{-\theta}{\Delta x_{ej}}$
CZ1 _j	$\frac{0.5}{\Delta t \Delta x_{ej}} \left[\left(\frac{dA_e}{dz} \right)_j \Delta x_{ej} + \left(\frac{dA_r}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_j \Delta x_{ej} \right]$
CQ2 _j	$\frac{\theta}{\Delta x_{ej}}$
CZ2 _j	$\frac{0.5}{\Delta t \Delta x_{ej}} \left[\left(\frac{dA_e}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{ej} + \left(\frac{dA_r}{dz} + \frac{dS}{dz} \right)_{j+1} \Delta x_{ej} \right]$
CB _j	$-\frac{Q_{j+1} - Q_j}{\Delta x_{ej}} + \frac{Q_j}{\Delta x_{ej}}$

Term	Value
MQ1 _j	$0.5 \frac{\Delta x_{ej} \phi_j + \Delta x_{ej} (1 - \phi_j)}{\Delta x_{ej} \Delta t} - \frac{\beta_j V_j \theta}{\Delta x_{ej}} + \theta g \bar{A} \frac{(S_{ij} + S_{hj})}{Q_j}$
MZ1 _j	$\frac{-g \bar{A} \theta}{\Delta x_{ej}} + 0.5 g (z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) - g \theta \bar{A} \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{ij}}{K_j} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_j \left(\frac{S_{hj}}{A_j} \right) \right] + 0.50 g \left(\frac{dA}{dz} \right)_j (\bar{S}_r + \bar{S}_h)$
MQ2 _j	$0.5 \left[\Delta x_{ej} \phi_{j+1} + \Delta x_{ej} (1 - \phi_{j+1}) \right] \left(\frac{1}{\Delta x_{ej} \Delta t} \right) + \beta_{j+1} V_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) + \frac{\theta g \bar{A}}{Q_{j+1}} (S_{ij+1} + S_{hj+1})$
MZ2 _j	$\frac{g \bar{A} \theta}{\Delta x_{ej}} + 0.5 g (z_{j+1} - z_j) \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{\theta}{\Delta x_{ej}} \right) - g \theta \bar{A} \left[\left(\frac{dK}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{ij+1}}{K_{j+1}} \right) + \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} \left(\frac{S_{hj+1}}{A_{j+1}} \right) \right] + 0.50 g \left(\frac{dA}{dz} \right)_{j+1} (\bar{S}_r + \bar{S}_h)$
MB _j	$-\left[(\beta_{j+1} V_{j+1} Q_{j+1} - \beta_j V_j Q_j) \left(\frac{1}{\Delta x_{ej}} \right) + \left(\frac{g \bar{A}}{\Delta x_{ej}} \right) (z_{j+1} - z_j) + g \bar{A} (\bar{S}_r + \bar{S}_h) \right]$

4.1.3 Perdite di carico in moto vario

Per la determinazione delle perdite di carico distribuite, come visto per il moto permanente, si risolve l'equazione di Chezy tenendo conto delle diverse scabrezze tra l'alveo centrale, *channel*, e le due aree golenali, *right e left overbank*, come descritto nelle equazioni precedenti.

Riguardo alle perdite di carico concentrate, il programma considera una contrazione ogni volta che l'altezza cinetica della sezione di monte risulta maggiore di quella della sezione più a valle, viceversa un'espansione. Le perdite concentrate sono espresse dalla seguente equazione:

$$h_c = C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right|$$

dove C è il coefficiente di contrazione/espansione ed i pedici 1 e 2 sono relativi alla sezione di monte ed alla sezione di valle. Le perdite di carico concentrate si hanno soprattutto in corrispondenza di ostacoli al deflusso, ovvero nel caso di ponti, dighe e altre particolarità idrauliche, per il calcolo delle quali sono stati incorporati gli stessi codici di calcolo sviluppati nel modulo relativo al moto permanente.

Il programma calcola le perdite di carico come somma di tre contributi: le perdite dovute alla contrazione e all'espansione del flusso rispettivamente a monte e a valle della struttura, calcolate tramite la (4.2), e una perdita in corrispondenza della struttura. Quest'ultima viene calcolata, nel caso particolare dei ponti, tramite i metodi seguenti:

- *L'Energy Method*, per i casi in cui il livello idrico rimane al di sotto della quota minima di intradosso (low cord); il programma risolve l'equazione di bilancio energetico tra le sezioni a monte ed a valle del ponte, il calcolo avviene sottraendo all'area contribuente al deflusso le zone occupate dalle strutture del ponte ed aggiungendo le superfici del ponte a contatto con l'acqua nella perimetrazione del contorno bagnato;

- *Il Pressure and Weir flow method*, che prevede di considerare il ponte in pressione non appena il livello idrico raggiunge una percentuale prefissata dell'altezza delle aperture; quando il livello idrico è superiore al low cord nella sezione di monte, il programma sceglie una modellazione del comportamento idrico come deflusso attraverso una luce a battente (libero o rigurgitato a seconda che il livello idrico sia più basso o più alto del low cord nella sezione di valle):

$$Q = C_d A_{bu} \sqrt{2g \left(Y_3 - \frac{Z}{2} + \alpha_3 \frac{V_3^2}{2g} \right)}$$

dove Q è il flusso totale attraverso il ponte, C_d è il coefficiente di flusso, A_{bu} è l'area della sezione di monte del ponte al netto delle zone occupate dal ponte, Y_3 è il tirante idrico nella sezione subito a monte del ponte, Z è la massima distanza tra la quota del low cord e la profondità media della sezione di monte del ponte. Quando la quota del pelo idrico supera, invece, anche il livello di high cord (quota di impalcato del ponte), si usa l'equazione per gli stramazzi liberi o rigurgitati:

$$Q = C_d L H^{3/2} \sqrt{2g}$$

4.2 Modellazione delle strutture laterali

All'interno del codice di calcolo HEC-RAS è possibile modellare la presenza di sbarramenti laterali e luci a battente. Le *lateral structures*, come verrà più ampiamente descritto in seguito possono essere utilizzate come strutture di collegamento tra l'area monodimensionale in alveo e le aree inondabili esterne con struttura bidimensionale.

La rappresentazione geometrica delle *lateral structures* prevede la presenza di almeno una sezione a monte e una sezione a valle di quest'ultima.

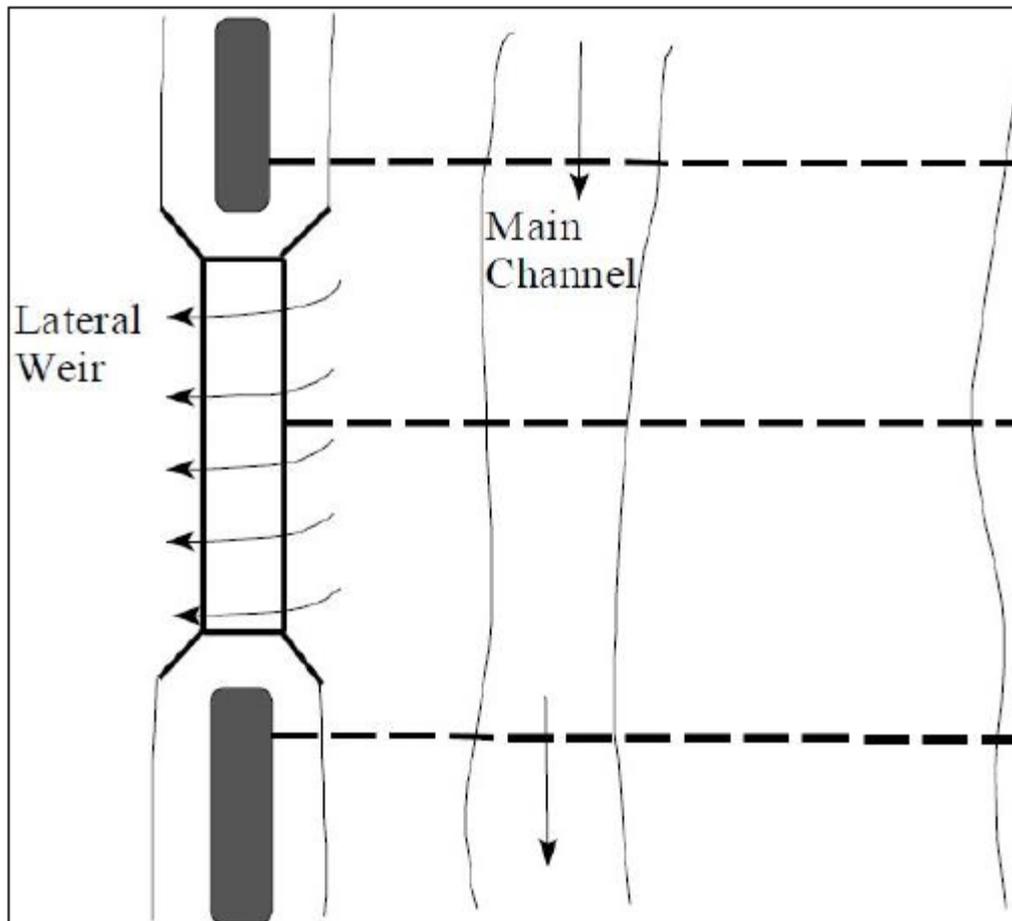


Figura 12. Hec-Ras: schema per la modellazione delle strutture laterali

Sia la superficie dell'acqua che il terreno presentano una determinata pendenza. Lo scopo è di andare a derivare l'equazione dello stramazzo laterale.

Nella figura sottostante vengono indicate l'equazione della superficie idrica e del terreno laddove le costanti aws e aw rappresentando il coefficiente angolare delle due equazioni, mentre le variabili Cws e CW sono le costanti che rappresentano i livelli iniziali.

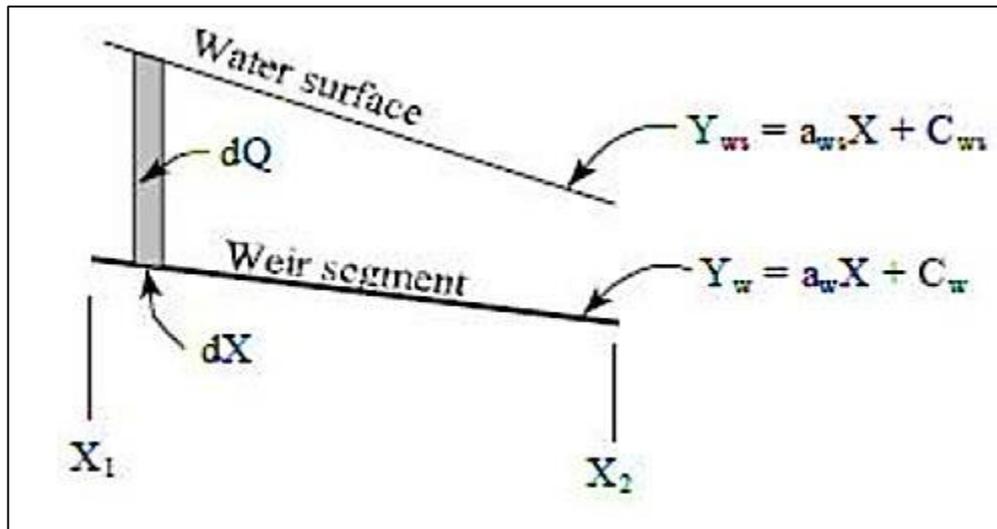


Figura 13. Hec-Ras: modellazione superficie idrica e terreno

L'equazione dello stramazzo laterale standard ipotizza che la struttura sia parallela alla superficie idrica (cioè la profondità dell'acqua è costante da una estremità all'altra dello stramazzo). La seguente equazione generale deriva dall'integrazione dell'equazione dello stramazzo laterale andando a considerare sia la pendenza della struttura laterale che del terreno:

$$dQ = ((a_{ws} - a_w)x + C_{ws} - C_w)^{\frac{3}{2}} dx$$

posto:

$$a_1 = (a_{ws} - a_w) \text{ e } C_1 = (C_{ws} - C_w)$$

$$\int_{x_1}^{x_2} dQ = Q_{x_1-x_2} = \frac{2C}{5a_1} \left((a_1 x_2 + C_1)^{\frac{5}{2}} - (a_1 x_1 + C_1)^{\frac{5}{2}} \right)$$

Tale equazione è valida finché il termine a_1 è diverso da zero. Quando a_1 è nullo, la superficie dell'acqua e la *lateral structures* sono parallele.

4.3 Modellazione Bidimensionale

La versione di HEC-RAS utilizzata consente di eseguire uno schema di modellazione bidimensionale all'interno della simulazione condotta in regime di moto vario. Un'area 2D viene aggiunta e agganciata al modello monodimensionale attraverso l'uso di uno sfioratore laterale (lateral structure), questo per consentire una modellazione su dominio combinato 1D-2D. L'algoritmo di modellazione del moto, su dominio bidimensionale, ha le seguenti caratteristiche:

Modellazione combinata 1D e 2D: prevede la possibilità di eseguire una simulazione combinata 1D e 2D all'interno dello stesso modello in regime di moto vario che permettendo di lavorare su schemi fluviali più complessi, utilizzando come sopra descritto la modellazione 1D per l'alveo, e la modellazione 2D aree inondabili esterne.

Equazioni complete di Saint Venant o di diffusione dell'onda in 2D: il programma risolve sia le equazioni 2D di diffusione dell'onda o quelle complete di Saint Venant. Questa opzione è selezionabile dall'utente, offrendo quindi una maggiore flessibilità. In generale, le equazioni di diffusione dell'onda in 2D consentono al software di funzionare più velocemente garantendo inoltre una maggiore stabilità. Le equazioni 2D in forma completa di Saint Venant sono applicabili a una gamma più ampia di problemi, ma la grande maggioranza delle situazioni può essere modellata con sufficiente precisione con le equazioni di diffusione dell'onda.

Algoritmo di soluzione ai volumi finiti: il risolutore delle equazioni di moto bidimensionale utilizza un algoritmo implicito ai volumi finiti. L'algoritmo di soluzione consente di utilizzare step temporali di calcolo maggiori rispetto ai metodi espliciti. L'approccio ai volumi finiti fornisce una misura dei miglioramenti in termini di stabilità e robustezza rispetto alle tradizionali tecniche differenziali di soluzione basate su metodi agli elementi finiti.

Algoritmo per la soluzione accoppiata dei modelli 1D e 2D: gli algoritmi di soluzione 1D e 2D sono strettamente accoppiati nello stesso passo temporale di calcolo permettendo una perfetta coerenza a ogni step tra i modelli 1D e 2D. Ad esempio, se un fiume è modellato in 1D, ma l'area dietro un argine è modellata in 2D, il deflusso al di sopra dell'argine o eventualmente attraverso una breccia nell'argine è valutato utilizzando come carico di monte il livello nel fiume 1D e come carico di valle il livello nell'area 2D. L'equazione dello stramazzo è utilizzata per calcolare il deflusso al di sopra dell'argine o attraverso la breccia.

Maglie computazionali strutturate e non strutturate: il software è stato progettato per utilizzare mesh computazionali strutturate o non strutturate. Ciò significa che le cellule computazionali possono essere triangoli, quadrati, rettangoli o anche elementi a cinque e sei facce. La maglia può essere una miscela di forme e dimensioni delle celle. Il contorno esterno della maglia computazionale è definito con un poligono.

Tabella dettagliata delle proprietà idrauliche per le celle di calcolo: all'interno di HEC-RAS le celle e le facce delle celle si basano sui dati del terreno sottostante (DTM). Ogni cella della maglia computazionale è pre-elaborata per sviluppare dei grafici dettagliati sulle proprietà idrauliche basate sul terreno sottostante che vengono utilizzati nella modellazione di HEC.

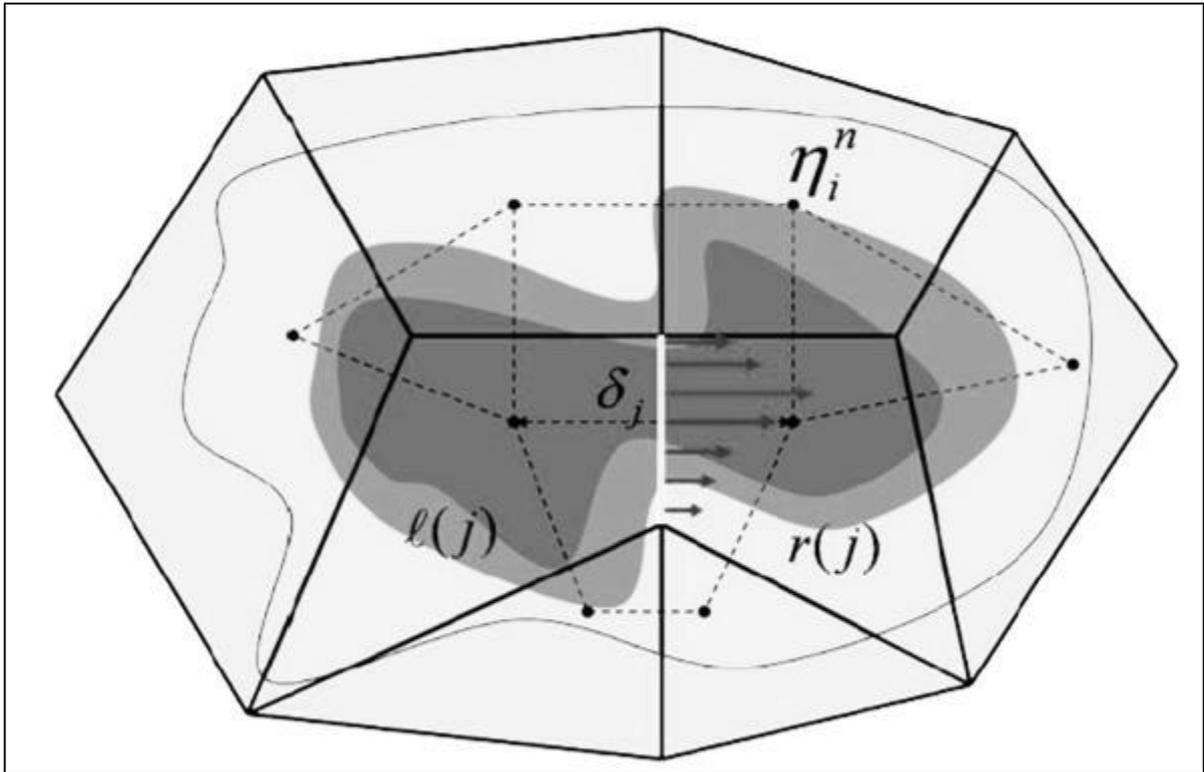


Figura 14. Modello Hec-Ras: mesh non strutturata con i dati dettagliati del DTM

Inoltre, ogni faccia delle celle viene valutata come una sezione trasversale dove vengono elaborate in tabelle che descrivono le proprietà idrauliche. Il flusso si muove in tutta la faccia (tra le celle) basandosi su questi dati. Questo permette agli utenti di utilizzare delle celle molto grandi senza però perdere troppo il dettaglio del terreno sottostante che governa il movimento del flusso. Il vantaggio è un minor numero di calcoli e quindi tempi di esecuzione molto più veloci.

Dettagliata mappatura dello scenario degli allagamenti con animazioni: la perimetrazione delle aree allagabili così come le animazioni dello scenario degli allagamenti in funzione del tempo può essere fatta all'interno di HEC-RAS utilizzando le funzionalità di RAS-Mapper. La mappatura delle aree allagate si basa sul DTM, ciò significa che la reale superficie bagnata sarà basata sui dettagli della morfologia del terreno sottostante e non sulla dimensione della cella di calcolo. Le celle, quindi, possono anche essere parzialmente bagnate/asciutte.

Algoritmo di calcolo basato su sistemi Multi-Processore: Il modello di calcolo 2D è stato programmato per sfruttare i sistemi multi-processore presenti sui computer moderni (architettura parallela). In questo l'algoritmo di soluzione presenta una maggiore velocità e quindi i computer dotati di più processori saranno in grado di eseguire la modellazione 2D più velocemente rispetto ai computer a singolo processore.

5 Costruzione ed implementazione dei Modelli idraulici per valutazioni di compatibilità idraulica ai sensi del PAI e NTA

Tutto quanto sopra premesso è stato considerato al fine di individuare le caratteristiche utili a verificare la compatibilità idraulica dell'intervento in esame ai sensi del PAI e relative NTA.

In particolare, quale riferimento degli standard tecnici richiesti sono state prese come riferimento le prescrizioni di cui alle NTA del PAI versione 2021, in particolare della relativa "APPENDICE C - Contenuti tecnici degli studi di compatibilità idraulica", nel definire i contenuti tecnici necessari degli studi di compatibilità idraulici al fine di garantire l' idoneità tecnica delle valutazioni effettuate.

Il presente studio risulta classificabile secondo i criteri della richiamata appendice secondo la tipologia di cui al punto C.1) -2, riguardante "verifica della compatibilità di opere e interventi, esistenti o proposti, con le condizioni di pericolosità e di rischio" in quanto valuta in maniera puntuale di dettaglio la pericolosità idraulica cartografata dal PAI su scala di Bacino in rapporto alle esondazioni dei tre corsi d'acqua Simeto, Dittaino e Gornalunga.

Nel dettaglio di seguito si specificano in tabella in forma sintetica le scelte adottate per le valutazioni necessarie, successivamente approfondite al caso in esame nei paragrafi seguenti:

Tabella 5 – NTA PAI 2021 – Appendice C – Caratteristiche richieste per studi di compatibilità idraulica e ipotesi applicative al caso in esame

<i>Aspetti richiesti dall'Appendice C delle NTA 2021</i>	<i>Applicazione al modello in esame</i>
Definizione idrogrammi di piena nelle sezioni di interesse	<ul style="list-style-type: none"> - Gli idrogrammi di piena sono stati assunti in conformità al documento PAI Relazione Simeto-094 e relativa appendice idraulica. I periodi di ritorno indagato corrispondono a 50-100-anni, - Da un'analisi delle aree cartografate dal PAI, data la localizzazione degli interventi in progetto, si sono considerate, a vantaggio di sicurezza le propagazioni delle piene simultanee di Simeto, Dittaino e Gornalunga <p>Tale aspetto è stato indagato mediante:</p>
Definire il moto delle acque nell'alveo e nelle eventuali aree inondate	<ul style="list-style-type: none"> - <u>MACRO-MODELLO Idraulico</u> <ul style="list-style-type: none"> modello 1d-monodimensionale in moto vario nelle aste fluviali cartografate dal PAI e correlate all'assetto idraulico dell'area di interesse. Il dominio si compone di sezioni estratte dal DTM del MITE con risoluzione 1x1 m. Modello 2d-bidimensionale in moto vario al superamento della quota arginale/sponda del dominio 1d. Il DTM di base della griglia di calcolo, con elementi di dimensione 20x20 m del dominio 2d, si compone del DTM del MITE con risoluzione 1x1 m e DTM Regione Sicilia 2x2m.

<i>Aspetti richiesti dall'Appendice C delle NTA 2021</i>	<i>Applicazione al modello in esame</i>
	<p>In entrambi i casi il moto simulato è in regime di moto Vario con le caratteristiche idrodinamiche della corrente variabili nel tempo considerando l'effettivo volume di piena come da idrogrammi PAI del punto precedente.</p> <p>Considerando le caratteristiche dei bacini oggetto d'intervento, è stata adottata l'ipotesi di fondo fisso per tutti i modelli idraulici implementati per la redazione del presente studio di compatibilità idraulica</p>
<p>Dati topografici e specifiche del rilievo del terreno</p>	<ul style="list-style-type: none"> - I dati cartografici di base si compongono di DTM del MITE con risoluzione 1x1 m integrato con i dati DTM Regione Sicilia 2x2m.
<p>Definizione della scabrezza idraulica</p>	<ul style="list-style-type: none"> - I valori di scabrezza del coefficiente di Manning sono stati definiti, alla luce della tabella di riferimento del PAI riportata nei paragrafi successivi in 0,045 [m^{1/3}/s] per caratterizzare la resistenza al moto dei tratti di alveo del dominio 1d corrispondenti, mentre è stato adottato il valore di 0,08 [m^{1/3}/s] per i tratti del dominio 2d di esondazione
<p>Condizioni al contorno e definizione del dominio di studio</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Il dominio di studio ha ricompreso i tratti di corsi d'acqua ipotizzati come possibilmente interferenti con l'assetto idraulico dell'area indagata in esame a partire dalle aree di pericolosità idraulica del PAI vigente - Il dominio è stato esteso ben oltre le aree in esame per minimizzare gli effetti delle condizioni a contorno ipotizzate sulle aree esaminate - Le condizioni a contorno di valle, in uscita dal dominio di studio, sono state impostate secondo le condizioni di moto uniforme determinate dalla naturale pendenza del terreno - La condizione al contorno coincidente con la linea di costa è stata impostata ipotizzando il livello del mare costante di 1 m s.l.m.m. durante tutta la simulazione
<p>Rappresentazione e restituzione del risultato</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Il risultato delle simulazioni è rappresentato in formato griglia Raster georeferenziato rispetto alle caratteristiche massime idrodinamiche della corrente nell'area di interesse - Tale rappresentazione permette l'applicazione della "metodologia completa" di determinazione delle aree a pericolosità idraulica sulla base di periodo di ritorno delle piene, ma anche sull'entità dei tiranti massimi di deflusso

6 Il macro-modello idraulico

6.1 Idrogrammi di input di moto vario della modellazione

Nel presente paragrafo si forniscono gli idrogrammi e i tempi caratteristici considerati per i tre periodi di ritorno di progetto (Tr 50-100-300 anni), come da Relazione Simeto – 094 e relativa appendice idraulica, per i tre corsi d'acqua principali le cui piene interessano le aree oggetto d'intervento. In ordinata si forniscono le portate in m^3/s , in ascissa le durate degli idrogrammi in ore (h).

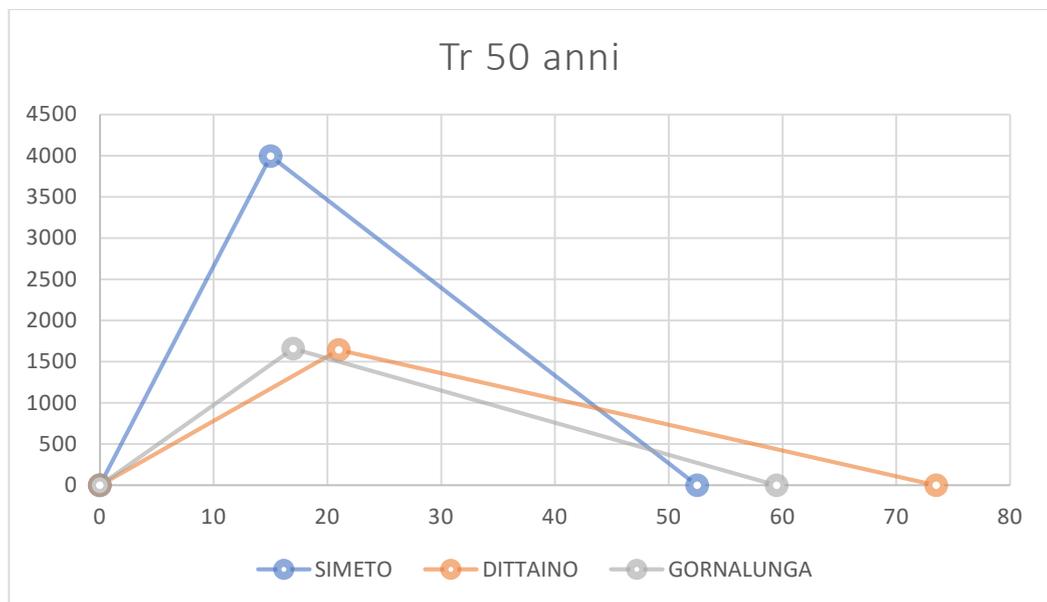


Figura 15 – PAI vigente: idrogrammi di piena dei fiumi Simeto, Dittaino e Gornalunga per Tr = 50 anni

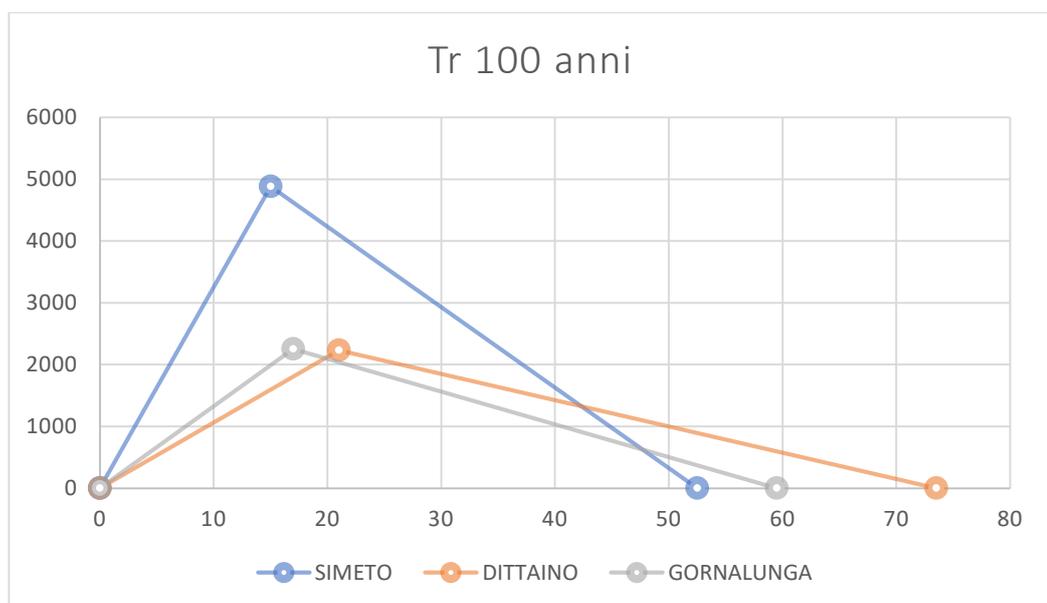


Figura 16- PAI vigente: idrogrammi di piena dei fiumi Simeto, Dittaino e Gornalunga per Tr = 100 anni

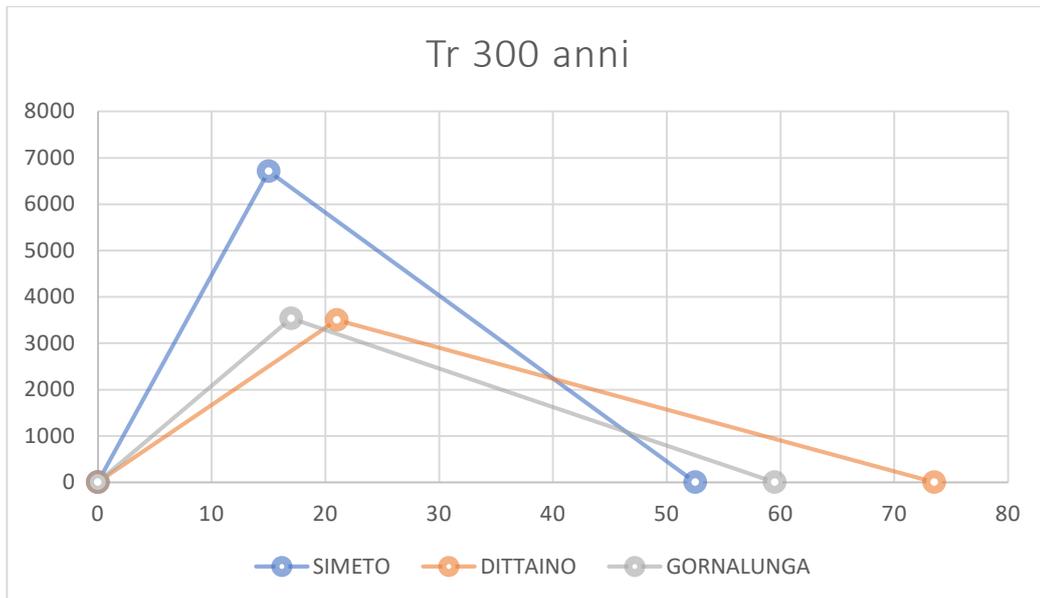


Figura 17 - PAI vigente: idrogrammi di piena dei fiumi Simeto, Dittaino e Gornalunga per $Tr = 3$ anni

6.2 Dominio di studio 1d-2d

Di seguito una rappresentazione grafica dei domini di calcolo adottati (1d nelle aste fluviali - 2d con celle di calcolo 20x20m nelle aree di esondazione) e relative condizioni di Input-Output. In rosso è evidenziata la localizzazione degli interventi per i quali si intende valutare la compatibilità idraulica.

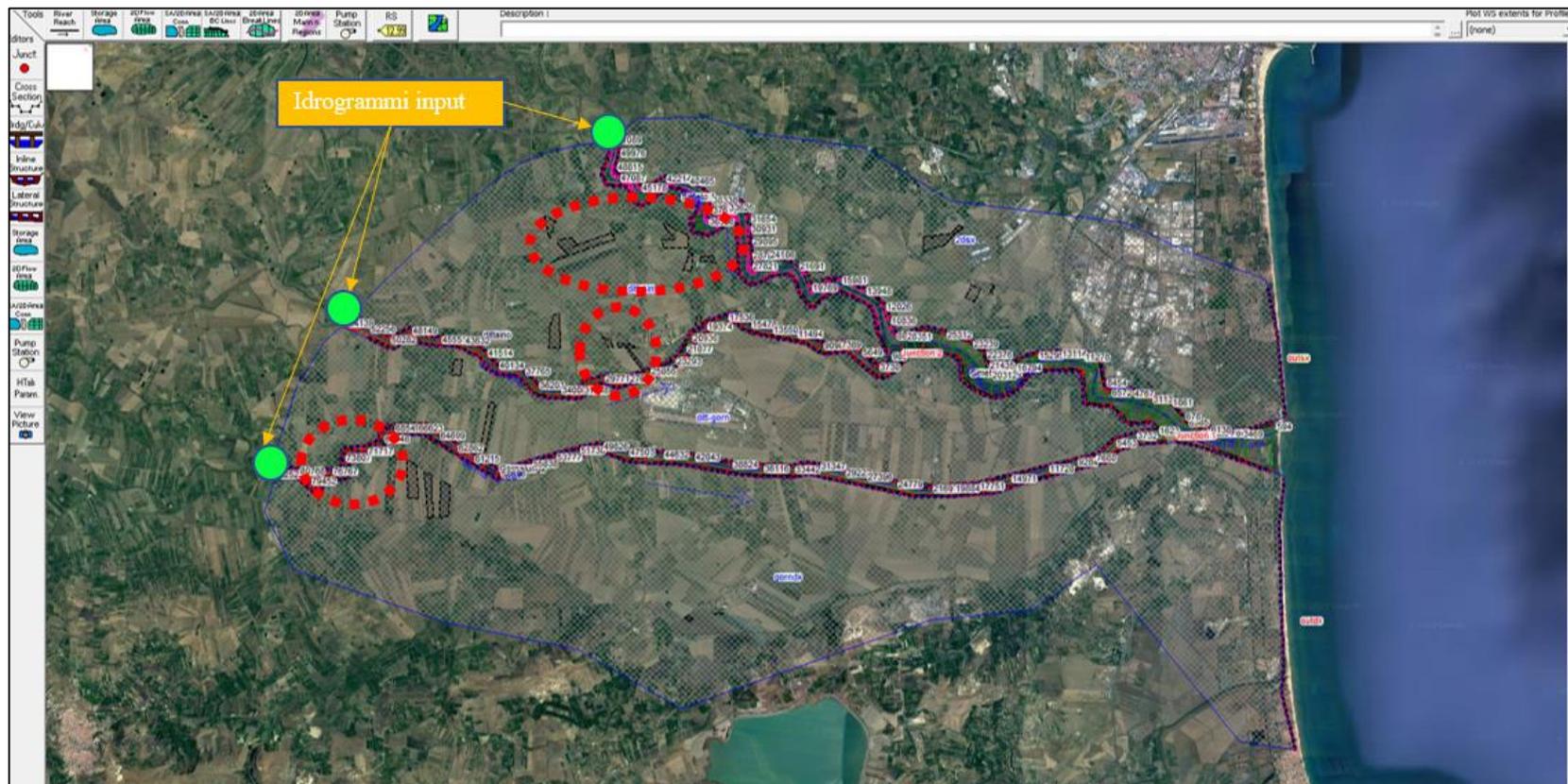


Figura 18 - Geometria del macro-modello idraulico: cerchiare in rosso le localizzazioni degli interventi di cui si intende valutare la compatibilità idraulica

6.3 Dati topografici utilizzati

Come premesso, sono stati adottati i database cartografici di maggior dettaglio disponibile:

- Rilievo LIDAR, risoluzione 1x1 m, del MITE (Ministero della Transizione Ecologica) per le aste del Simeto, Dittaino e Gornalunga;
- DTM Regione Sicilia 2x2m per le aree esterne non coperte dal LIDAR.

Di seguito, si riporta un confronto esemplificativo tra il livello di definizione geometrica delle sezioni semplificate adottate nel modello del PAI vigente e quelle adottate nel presente studio.

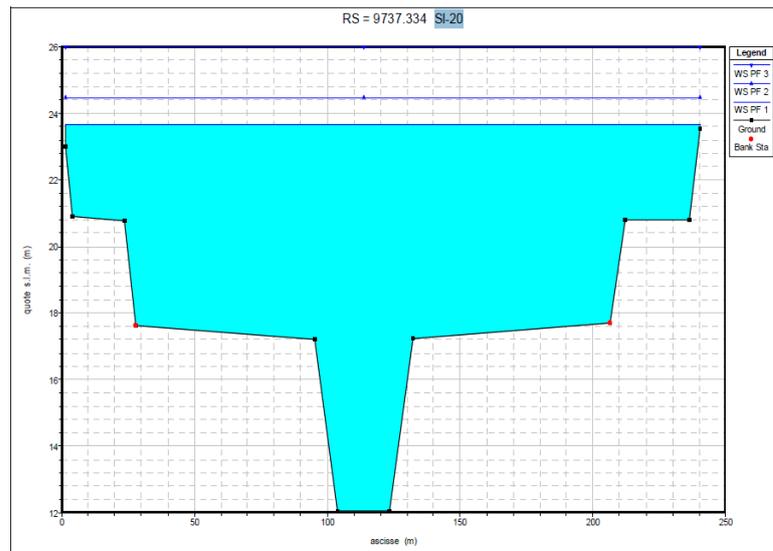


Figura 19 - Sezione semplificata modello PAI

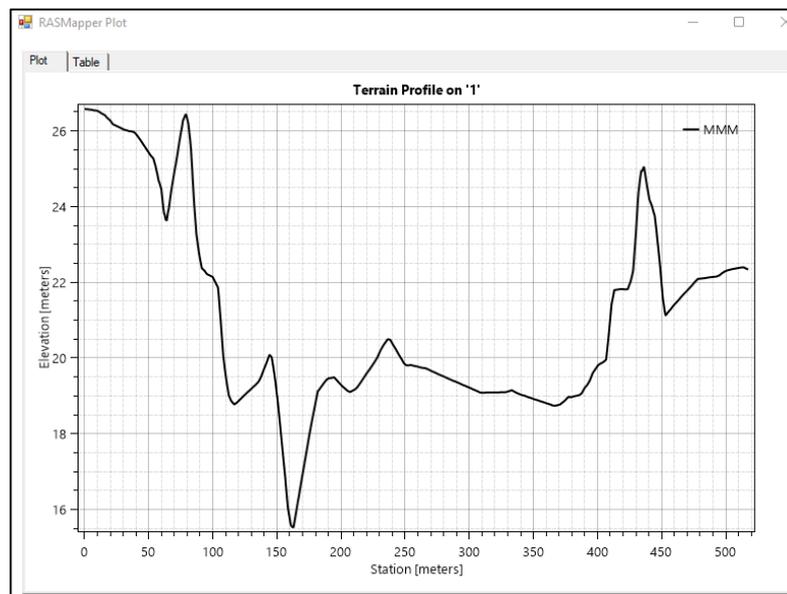


Figura 20 – Macro-modello impianto Maas 2: sezione da LIDAR 1x1 m adottata nel dominio 1d

6.4 Campi di moto 1d-2d e strutture laterali di connessione

Lo schema modellistico adottato, come già sopra rappresentato, è di tipo misto 1d-2d. Le esondazioni dal dominio 1d si attivano quando, durante la simulazione in moto vario, le quote del pelo libero superano le sponde o argini che delimitano l'alveo, come di seguito rappresentato in maniera semplificata.

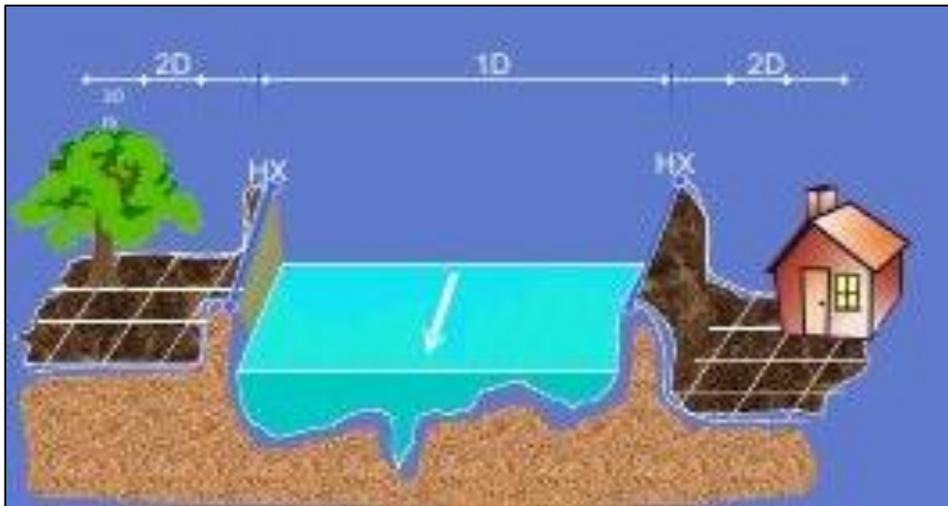


Figura 21 – Macro-modello idraulico: schematizzazione del meccanismo di attivazione della componente di esondazione 2d al superamento delle quote arginali

Il software Hec-Ras permette di introdurre le strutture laterali come interfaccia tra i due campi di moto. Nel modello sono state inserite coerentemente alle quote estrapolate dal modello LIDAR del MITE.

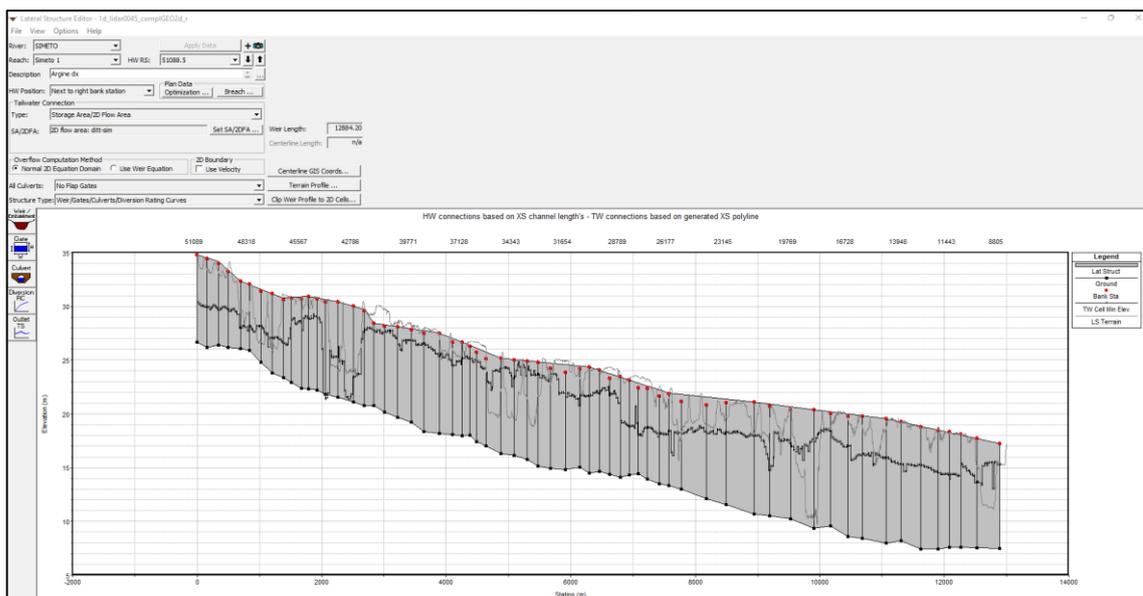


Figura 22 – Modello Hec-Ras: strutture laterali, interfaccia tra i campi di moto 1d (interno alveo) e 2d (esondazione)

6.5 Definizione della scabrezza

Come definito in precedenza, il coefficiente di scabrezza può assumere diversi valori al fine di poter rappresentare la resistenza al moto delle aree interessate dal deflusso.

Nella determinazione dei valori del parametro scabrezza si cerca di correlare quella che è la situazione appurata in “situ” del corso d'acqua con i risultati delle esperienze condotte dai ricercatori.

Di seguito si riporta la classificazione proposta dalla Regione Sicilia e le scelte adottate per il modello idraulico in esame.

Tabella 6 – PAI Regione Siciliana – Appendice C – Valori del coefficiente di Manning (da Chow, 1959)

 Piano per l'Assetto Idrogeologico Bacino idrografico del Fiume Simeto		Appendice C VALORI DEL COEFFICIENTE DI MANNING		
Valori del coefficiente di scabrezza di Manning [$m^{-1/3}$] (Chow, 1959)				
		minimo	normale	massimo
A. CORSI D'ACQUA NATURALI				
<i>Corsi d'acqua minori (tirante inferiore a 3,5m)</i>				
1. Corsi d'acqua di pianura				
a.	Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati	0.025	0.030	0.033
b.	Puliti, rettilinei, in piena senza scavi localizzati, con sassi e sterpaglia	0.030	0.035	0.040
c.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi	0.033	0.040	0.045
d.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e pietre	0.035	0.045	0.050
e.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, in magra	0.040	0.048	0.055
f.	Puliti, ondulati, con alcune buche e banchi, con cespugli e più pietrame	0.045	0.050	0.060
g.	Tratti lenti, sterpaglia e buche profonde	0.050	0.070	0.080
h.	Tratti molto erbosi, buche profonde e grossi arbusti e cespugli	0.070	0.100	0.150
2. Aree golenali				
a.	A pascolo senza vegetazione arbustiva	0.025	0.030	0.050
b.	Aree coltivate	0.020	0.035	0.050
c.	Con vegetazione arbustiva spontanea	0.035	0.070	0.160
d.	Con vegetazione arborea coltivata	0.030	0.060	0.120
3. Corsi d'acqua montani, senza vegetazione in alveo, sponde ripide alberi e cespugli lungo le sponde sommergibili durante le piene				
a.	Fondo: ghiaia, ciottoli e massi sparsi	0.030	0.040	0.050
b.	Fondo: ciottoli e massi grossi	0.040	0.050	0.070
B. CANALI ARTIFICIALI				
1. Canali in terra lisciata ed uniforme				
a.	Puliti, scavata di recente	0.016	0.018	0.020
b.	Puliti, dopo prolungata esposizione	0.018	0.022	0.025
c.	Ghiaia, sezione uniforme, pulita	0.022	0.025	0.030
d.	Erba corta, pochi cespugli	0.022	0.027	0.033
2. Canali in terra con ondulazioni o irregolari				
a.	Senza vegetazione	0.023	0.025	0.030
b.	Con erba e pochi cespugli	0.025	0.030	0.033
c.	Cespugli o piante acquatiche in canali profondi	0.030	0.035	0.040
d.	Fondo in terra e sponde in pietrisco	0.028	0.030	0.035
e.	Fondo in pietrame e sponde in cespugli	0.025	0.035	0.040
f.	Fondo in ciottoli e sponde pulite	0.030	0.040	0.050
3. Canali scavati o dragati				
a.	Senza vegetazione	0.025	0.028	0.033
b.	Cespugli sparsi sulle sponde	0.035	0.050	0.060
4. Canali in roccia				
a.	Lisci ed uniformi	0.025	0.035	0.040
b.	Frastagliati ed irregolari	0.035	0.040	0.050
5. Canali senza manutenzione, sterpaglia e cespugli				
a.	Sterpaglia densa, alta quanto il tirante idrico	0.040	0.050	0.080
b.	Fondo pulito cespugli sulle sponde	0.045	0.070	0.110
c.	Fondo pulito, cespugli sulle sponde, in piena	0.050	0.080	0.120
d.	Cespugli densi ed acque profonde	0.080	0.100	0.140

Nel presente studio, alla luce delle caratteristiche dei luoghi, si è ritenuto di adottare i seguenti valori del coefficiente di Manning:

Tabella 7. Macro-modello: coefficienti di scabrezza adottati

	Aree 1d in alveo	Aree di esondazione 2d
Valore di Manning [$m^{1/3/s}$]	0.045	0.08

I valori adottati nel dominio 1d risultano rappresentativi di alvei naturali in tratti vallivi con presenza di vegetazione ripariale, mentre nelle aree 2d si è adottato un valore maggiore tipico di aree non solitamente soggette a deflussi, assimilandoli ad aree prive di manutenzione ordinaria con presenza di sterpaglia e cespugli (dunque con maggiore resistenza al deflusso delle acque).

6.6 Risultati del macro-modello

Nella tabella seguente sono rappresentati i risultati estrapolati da modello del valore MEAN (Medio Areale) tra i valori massimi di tirante osservati nell'area di ciascuno dei campi fotovoltaici in progetto, considerando l'intera durata del fenomeno di piena modellato e con riferimento, per ognuno dei campi fotovoltaici (e annessa sottostazione MT-AT), al periodo di ritorno che individua, in accordo al metodo semplificato descritto dal PAI vigente, la pericolosità idraulica di ogni singola area.

Tabella 8 – Macro-modello: valori del tirante idrico "Mean" (medio areale) tra i massimi osservati per ciascuna area in esame

PAI VIGENTE	NOME	Tiranti MAX [m]		
		Tr 50 anni	Tr 100 anni	Tr 300 anni
		Valore MEAN (medio)	Valore MEAN (medio)	Valore MEAN (medio)
P2	Sottostazione MT-AT	-	1.84	-
P1	MAAS 2.1.1	-	-	0.05
P1	MAAS 2.1.2	-	-	0.67
P2	MAAS 2.2.1	-	1.33	-
P2	MAAS 2.2.2	-	1.23	-
P2	MAAS 2.6	-	1.48	-
P2	MAAS 2.7	-	1.35	-
P2	MAAS 2.8	-	1.08	-
P2	MAAS 2.9	-	1.02	-
P3	MAAS2.10	0.00	-	-

Dalla tabella, in particolare, è possibile apprezzare che nelle aree degli impianti il valore medio tra i massimi osservati del tirante idrico, per i periodi di ritorno di 50-100-300 anni, non raggiunge in alcun campo fotovoltaico dell'impianto Maas 2 il valore di 2,5 m di altezza dal piano

campagna, che, si sottolinea, rappresenta la quota di riferimento minima per l'installazione dei tracker e pannelli in progetto (come da immagine precedentemente fornita).

In particolare, per i periodi di ritorno di riferimento per le analisi, considerando un'altezza minima di installazione dei pannelli di 2,5 m, i risultati sono riassunti nella seguente Tabella, da cui è possibile evincere la presenza di un adeguato franco idraulico fra la quota idrica massima raggiunta dal fenomeno di esondazione nelle varie aree oggetto d'intervento e la quota d'intradosso dei pannelli fotovoltaici (nella loro configurazione orizzontale):

Tabella 9 – Campi fotovoltaici in progetto - Tirante idrico - Valori massimi assoluti nelle aree in esame e franco idraulico minimo

CAMPI FOTOVOLTAICI				
PAI VIGENTE	TR [anni]	Campo fotovoltaico	Valore max tirante idrico [m]	Franco idraulico minimo [m] dei pannelli
P1	300	MAAS 2.1.1	1.5	1.0
P1	300	MAAS 2.1.2	1.5	1.0
P2	100	MAAS 2.2.1	1.8	0.7
P2	100	MAAS 2.2.2	1.8	0.7
P2	100	MAAS 2.6	1.8	0.7
P2	100	MAAS 2.7	1.8	0.7
P2	100	MAAS 2.8	1.8	0.7
P2	100	MAAS 2.9	1.8	0.7
P3	50	MAAS2.10	0.5	2.0

I risultati sintetizzati nella precedente Tabella sono altresì forniti in forma grafica nella serie di immagini fornite nel seguito, in cui si rappresentano le mappe delle aree di allagamento per i singoli campi fotovoltaici con i valori dei tiranti opportunamente classificati.

Per quanto concerne, invece, la sottostazione elettrica in progetto, che rispetto all'area totale nella disponibilità del proponente occupa una superficie di circa 2.000 m² (cfr., Figura 23), non essendo dotata di moduli fotovoltaici, l'analisi sopra esposta, valida per le aree pannellabili, perde evidentemente di significatività. Per tal motivo, per la sottostazione sono state elaborate le seguenti considerazioni. In

Tabella 10 si presentano i dati relativi al valore del tirante MEAN (tirante medio areale tra i massimi osservati nell'area della sottostazione) e il valore del tirante massimo assoluto (MAX), osservati nell'area in cui si prevede la realizzazione della sottostazione in argomento (area in rosso di Figura 23). Come evidente, le simulazioni eseguite restituiscono un valore dei suddetti tiranti rispettivamente pari a 1,88 m e 2,17 m.



Figura 23 – Impianto Maas 2 – Sottostazione elettrica MT-AT – Confronto fra ingombro area nella disponibilità del Proponente (in verde) e superficie effettivamente occupata dalla sottostazione (in rosso)

Tabella 10 – Impianto Maas 2 – Sottostazione MT-AT – Analisi di dettaglio sui tiranti osservati (medi e massimi)

Sottostazione MT- AT				
PAI VIGENTE	TR [anni]	NOME	Valore Mean areale di Tirante [m]	Valore MAX di Tirante [m]
P2	100	Sottostazione MT-AT	1.88	2.17

Alla luce di tali considerazioni, con riferimento alla sottostazione elettrica MT-AT, per garantire la compatibilità idraulica delle opere in progetto si dovrà prevedere:

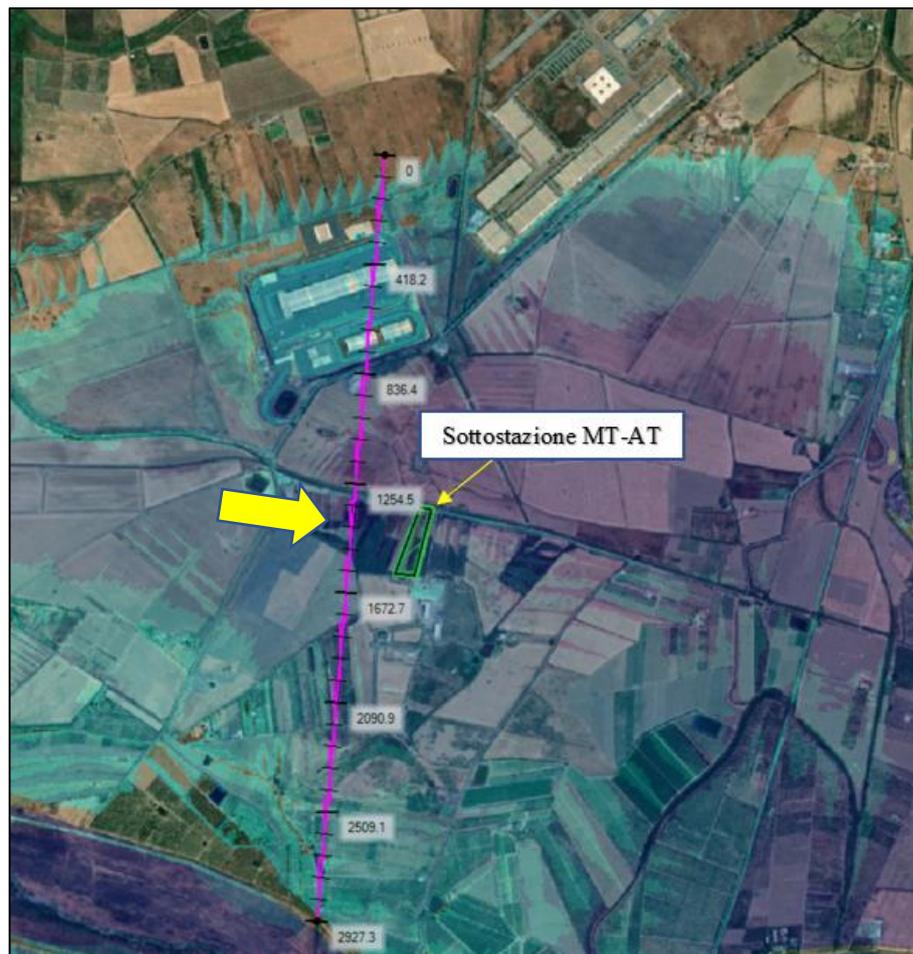
- (i) in fase di progettazione esecutiva, uno studio idraulico approfondito che consenta di confrontare le condizioni ante e post operam dell’area di sedime della sottostazione MT-AT, al fine, da un lato, di confermare il valore del tirante massimo fornito in Tabella 10 e, dall’altro, di valutare l’effetto che le opere in progetto determinano sulle caratteristiche dell’esondazioni, in termini di variazioni del tirante idrico medio e dell’estensione del fenomeno di piena;

- (ii) in fase realizzativa, un sistema di protezione dell’area in cui è prevista la realizzazione della sottostazione, di altezza idonea ad impedire l’espansione della piena nell’area di interesse. Solo a titolo di esempio, considerando che si potranno valutare ed eventualmente adottare altre soluzioni in fase esecutiva, nella presente fase progettuale può ritenersi idonea la realizzazione di muri perimetrali di altezza di circa 2,5 m, in modo da garantire anche un adeguato franco di sicurezza rispetto alla massima quota idrica dell’esondazione (nell’attesa di ottenere più affidabili valori del

tirante idrico massimo nell'area in esame a seguito dell'implementazione dei modelli di dettaglio di cui al punto precedente)¹.

In sintesi, la soluzione prospettata consentirà di sottrarre alla piena di progetto (calcolata per $Tr=100$ anni) un'area di soli 2.000 m^2 che, combinati con un'altezza delle opere di confinamento di circa $2,5 \text{ m}$, corrisponde ad un volume sottratto al fenomeno di esondazione di soli 5.000 m^3 .

Nelle immagini di seguito riportate, si evidenzia che la componente di esondazione dell'idrogramma estrapolato dal modello bidimensionale che interessa l'area in esame (per $Tr=100$ anni) presenta un valore al colmo di $631 \text{ m}^3/\text{s}$, corrispondente ad un volume di piena di circa 33 milioni di metri cubi.



¹ L'individuazione delle caratteristiche e dei dettagli progettuali del sistema di protezione dell'area della sottostazione, in questa sede soltanto descritto a scopo indicativo, è rimandata alla successiva fase progettuale.

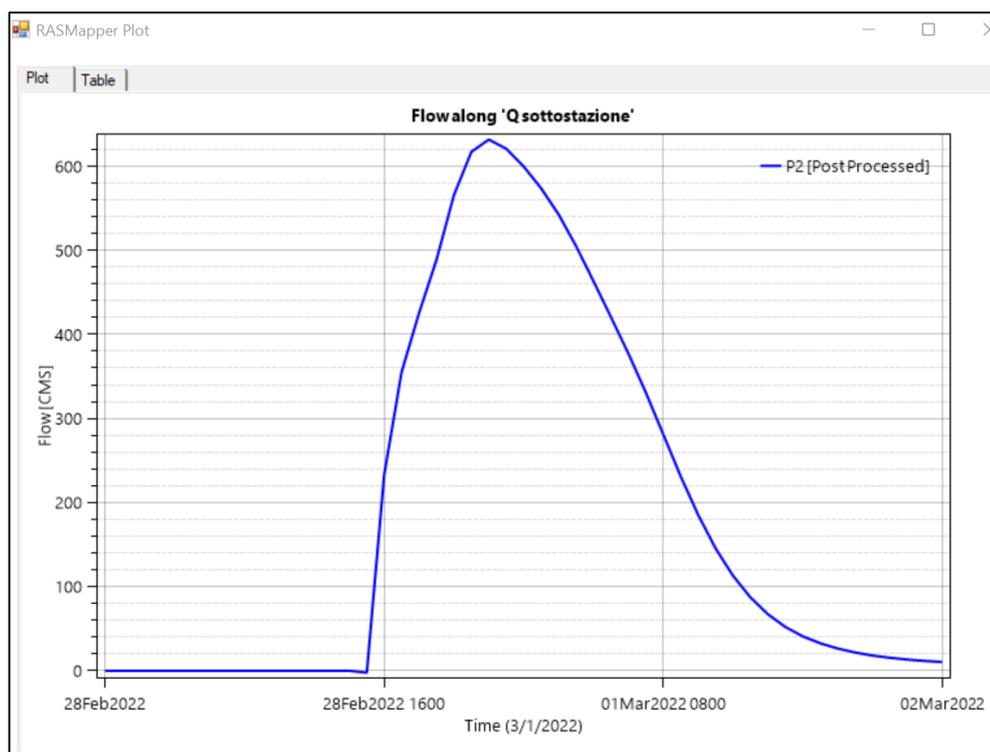


Figura 24 – Impianto Maas 2 – Sottostazione MT-AT - Sezione di controllo e idrogramma estrapolato da modello per $Tr = 100$ anni

Comparando il volume appena stimato (volume della componente della piena che interessa l'area della sottostazione) con quello sottratto alla piena (ricavato in precedenza, 5.000 m^3), si rileva che il rapporto tra i due ammonta a circa il 0,2 per mille, confermando l'assoluta trascurabilità degli effetti arrecati sull'intero fenomeno di esondazione dalla realizzazione delle opere a protezione dei componenti elettrici che saranno realizzati nell'area della sottostazione AT-MT.

Si ribadisce ulteriormente, al riguardo, che considerazioni di maggior dettaglio circa le caratteristiche delle opere a protezione dell'area della sottostazione nonché relativamente ai risultati dei modelli idraulici qui presentati sono rimandate alla successiva fase progettuale.

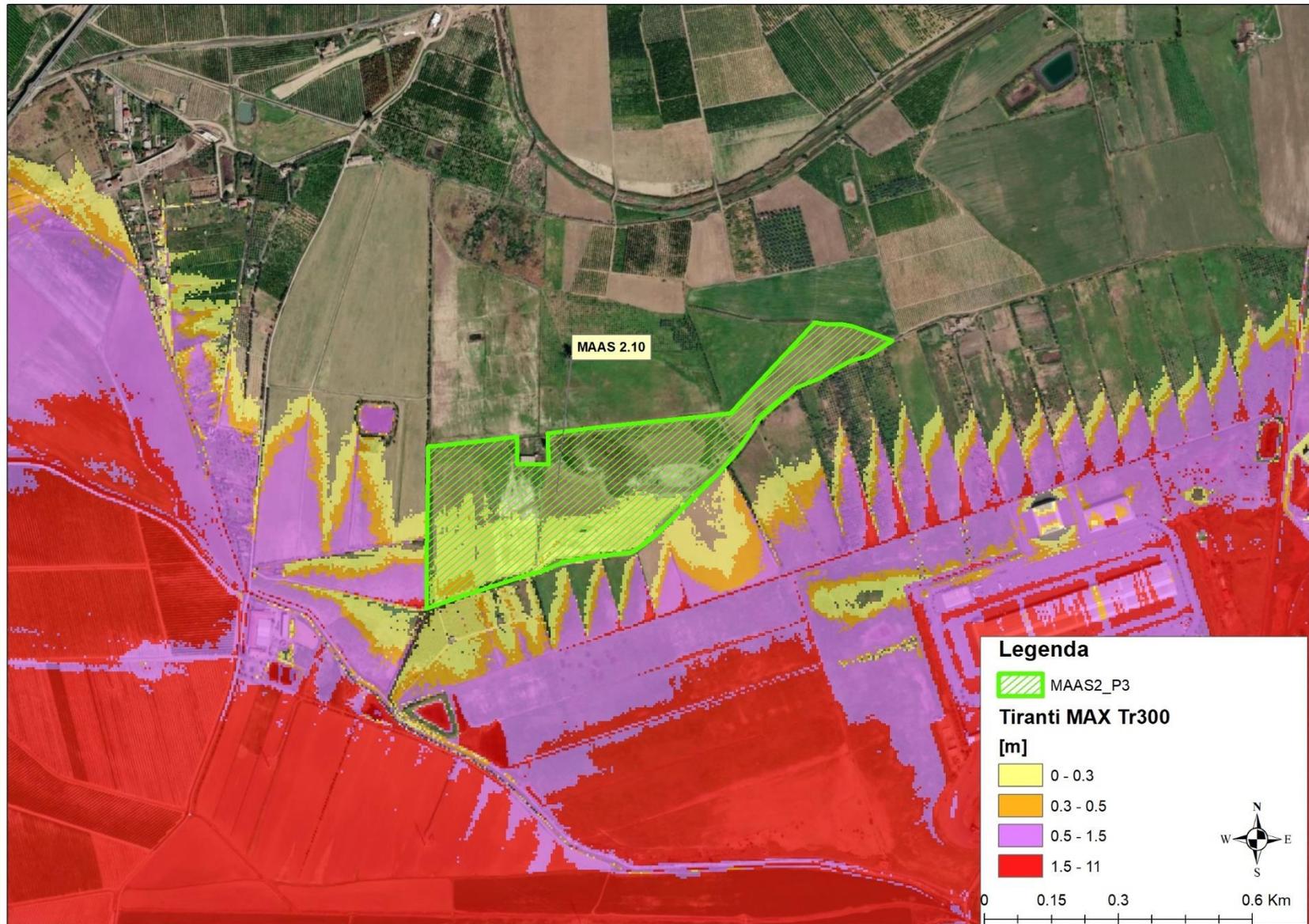


Figura 25 - Macro-modello Maas 2.10: risultati per TR 300 anni (massimi tiranti)

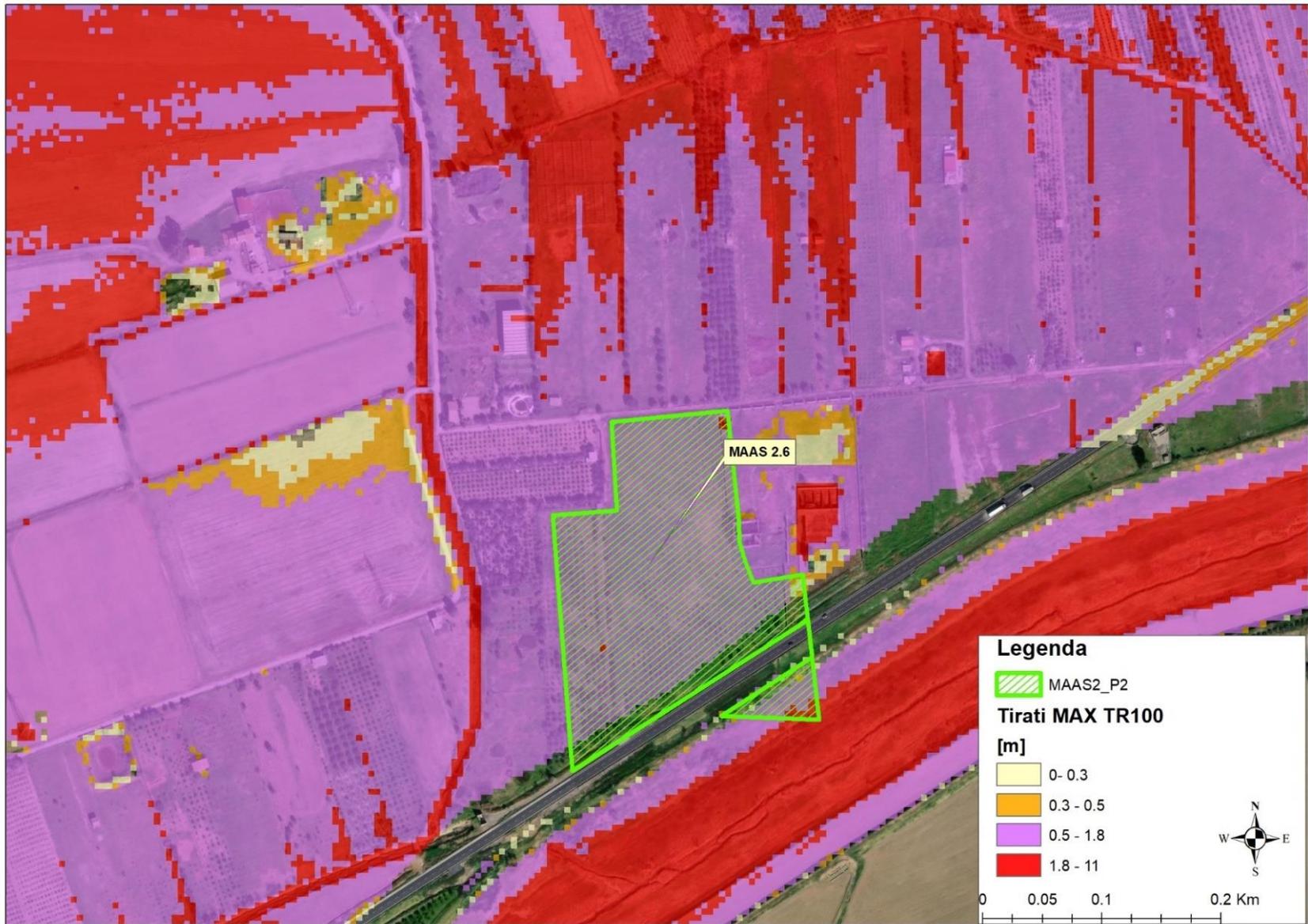


Figura 26. Macro-modello Maas 2.6; risultati per TR 100 anni (massimi tiranti)

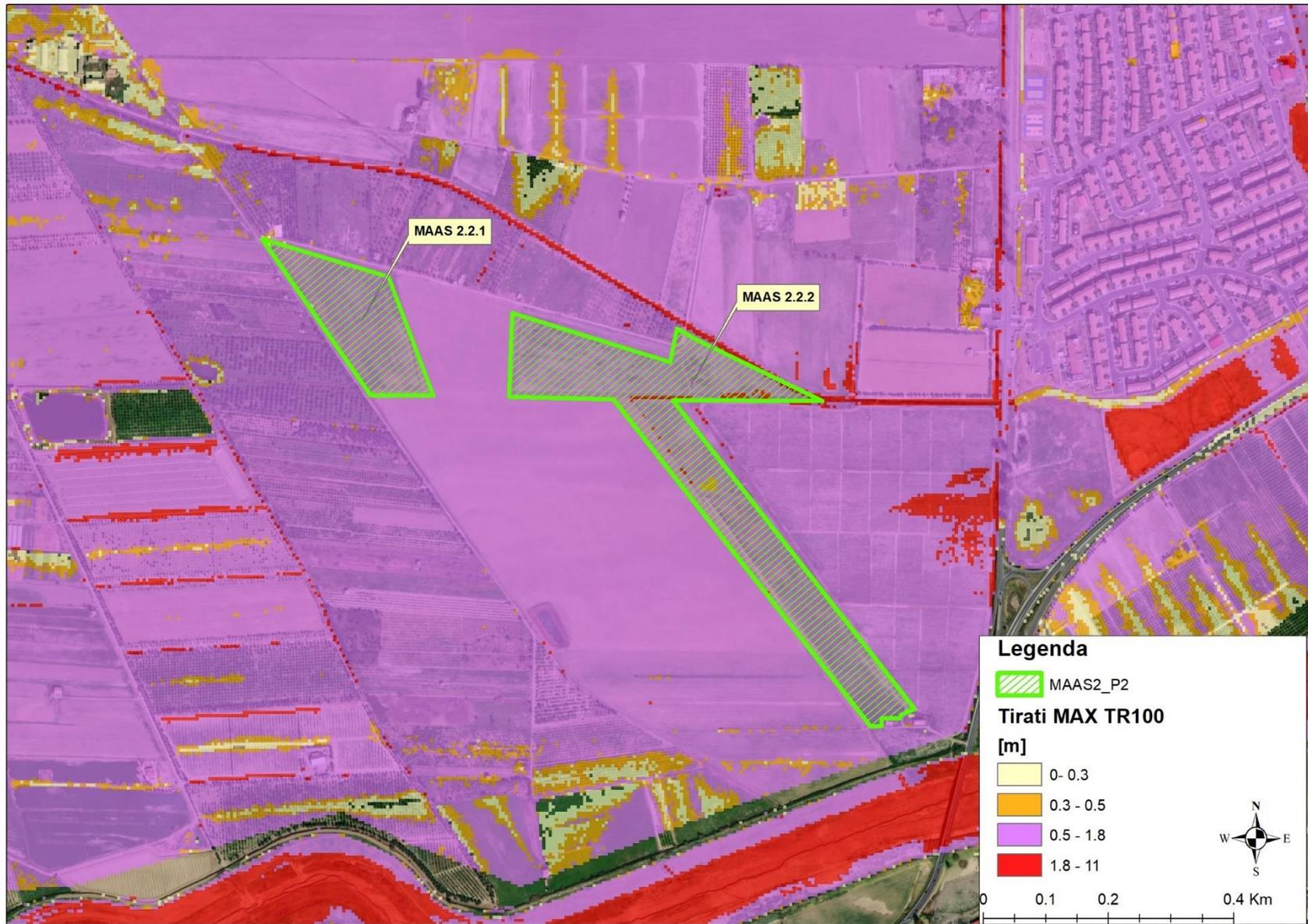


Figura 27 - Macro-modello Maas 2.1-2.2: risultati per TR 100 anni (massimi tiranti)

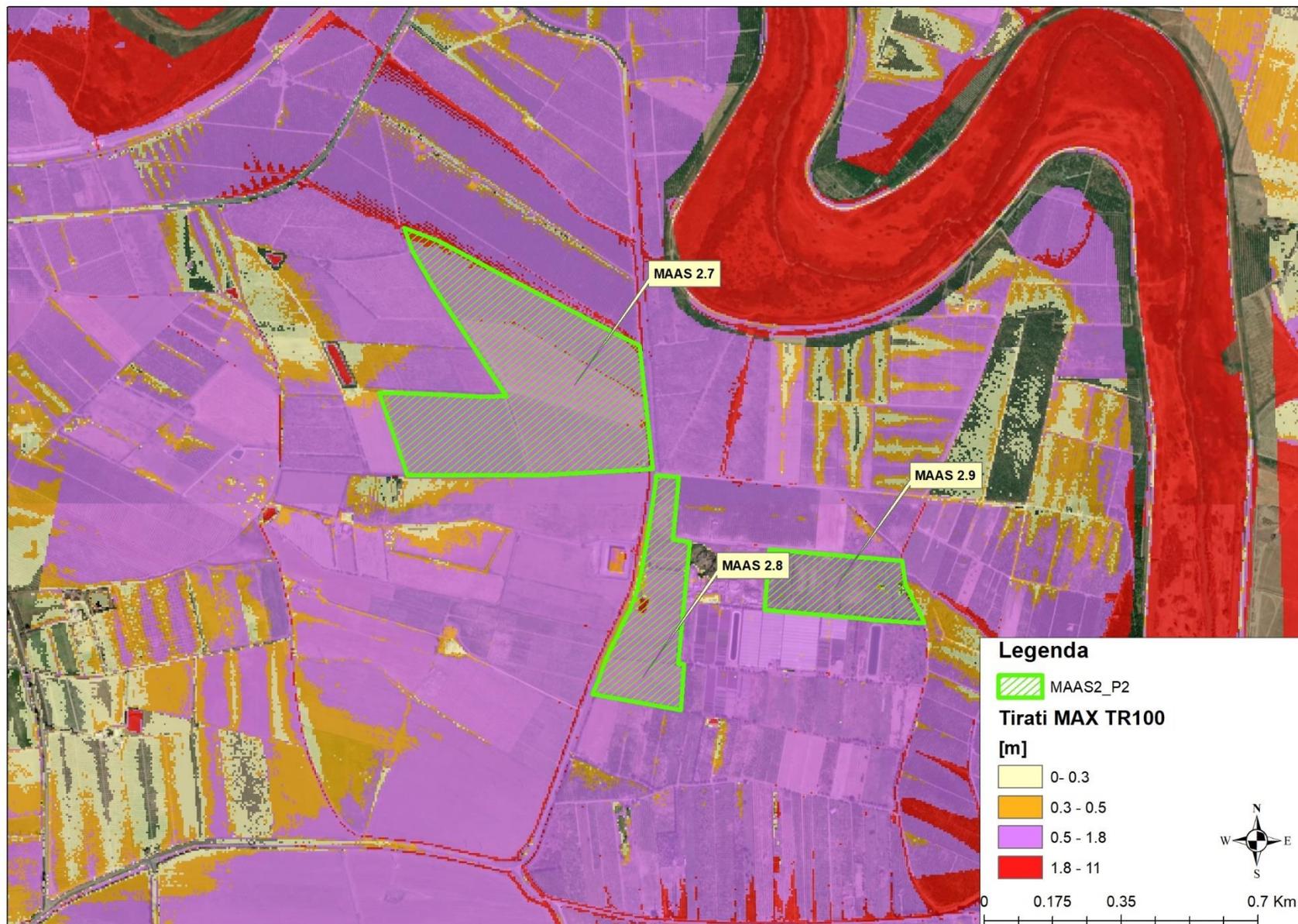


Figura 28 - Macro-modello Maas 2.7-2.8-2.9: risultati per TR 100 anni (massimi tiranti)

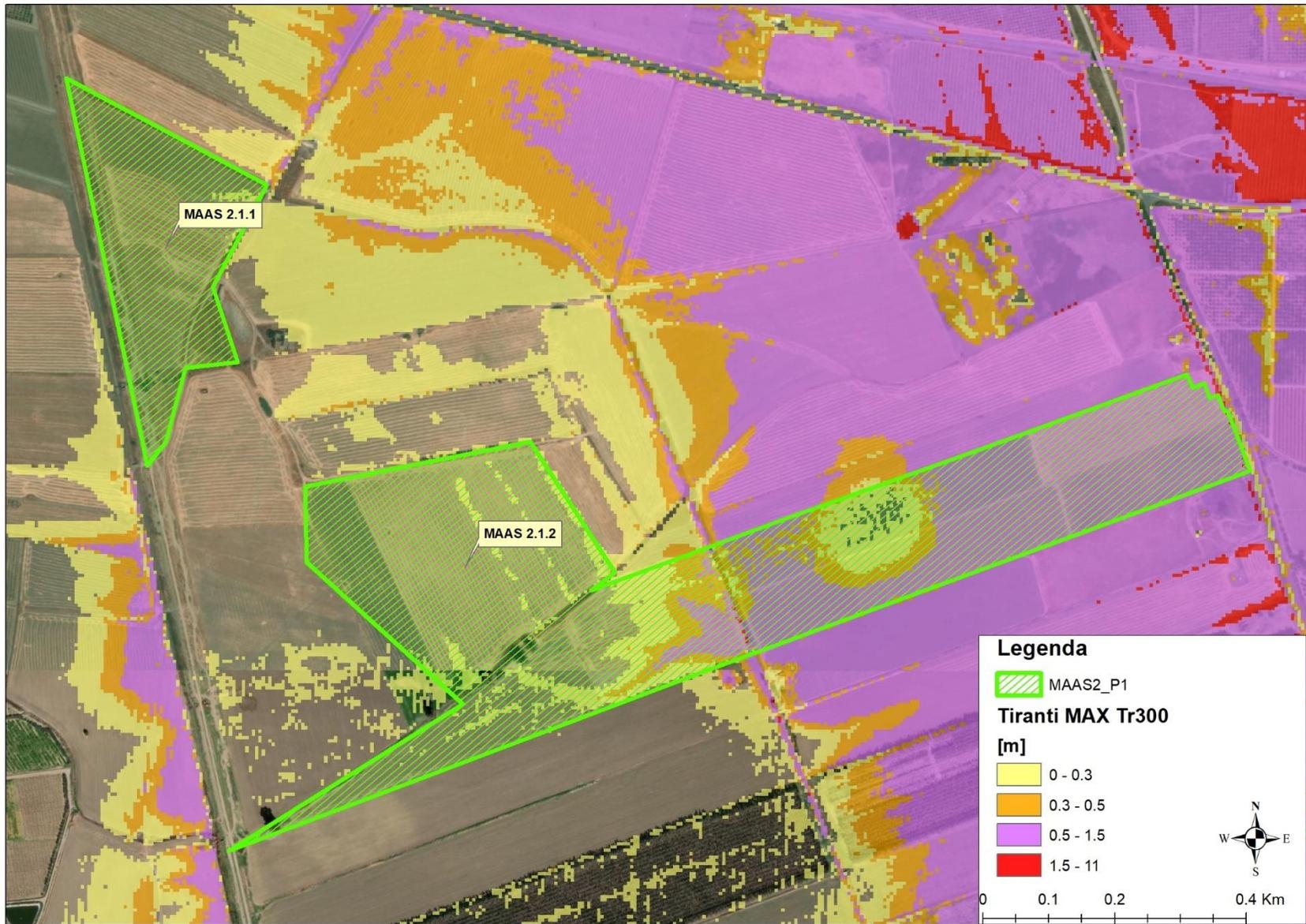


Figura 29 - Macro-modello Maas 1.1-1.2: risultati per TR 300 anni (massimi tiranti)

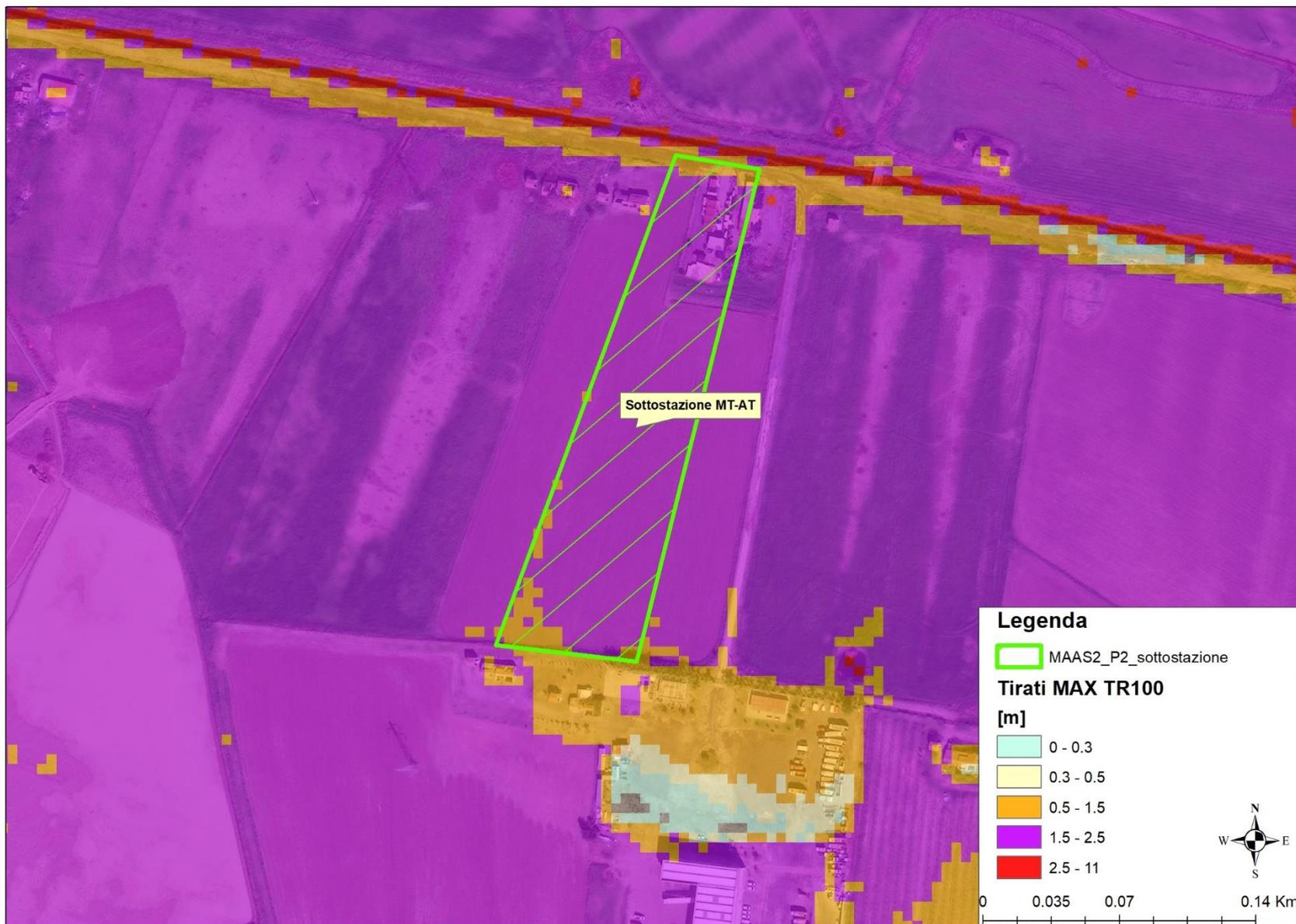


Figura 30 - Macro-modello sottostazione MT-AT: risultati per TR 100 anni (massimi tiranti) – Valori compresi tra 1,5 e 2,5 m

7 Conclusioni

Nella presente relazione, nell'ambito del progetto di un impianto agro-fotovoltaico denominato "Maas 2", sito in Comune di Ramacca (CT) e Catania, è stato effettuato uno studio idrologico-idraulico finalizzato alla determinazione dello scenario alluvionale in caso di eventi meteorologici critici insistenti sul bacino, corrispondentemente ai tre periodi di ritorno di riferimento, 50-100-300 anni, in funzione della pericolosità idraulica individuata dal PAI vigente per ogni area oggetto d'intervento. Tale studio è stato redatto allo scopo di accertare la compatibilità fra l'intervento proposto ed il reale livello di pericolosità esistente, alla luce dell'insieme di assunzioni e ipotesi, dettagliatamente descritte nel presente documento, poste alla base dei modelli idraulici implementati.

Come rappresentato nel presente documento, rispetto all'intervento in progetto, l'area di interesse dei diversi campi fotovoltaici in progetto ricade in area classificata come P1, P2 e P3 dal PAI Vigente. La sottostazione MT-AT, anch'essa parte del progetto, ricade in area P2. La SE su RTN - Pantano D'Archi, non ricompresa nel presente progetto, ricade in area P2.

Da qui, la necessità di predisporre il presente studio di compatibilità idraulica, ai sensi delle NTA di riferimento e "APPENDICE C - Contenuti tecnici degli studi di compatibilità idraulica" delle NTA 2021, quest'ultima adottata quale riferimento per la definizione dei requisiti minimi dei modelli implementati.

A seguito di una breve disamina della documentazione bibliografica dei piani vigenti di particolare interesse per il presente studio idrologico-idraulico, è stata effettuata una modellazione idraulica combinata 1D-2D in condizioni di moto vario (Unsteady flow), con l'ausilio del software *HEC-RAS 5.0.6* della *US Army Corps of Engineers*.

Nel precedente Capitolo 6 del presente documento, si è pertanto proceduto alla *verifica della compatibilità di opere e interventi, esistenti o proposti, con le condizioni di pericolosità e di rischio* determinando, come previsto dal PAI vigente, per i tre periodi di ritorno di riferimento (50-100 e 300 anni), nelle aree di interesse, i livelli di tirante medi tra i massimi osservabili negli areali di progetto.

Si è rilevato che, per i periodi di ritorno di riferimento (a seconda della classificazione di pericolosità idraulica proposta dal PAI vigente), i valori massimi dei tiranti idrici, restituiti dai modelli implementati, in ciascuna area pannellabile non raggiungono la quota minima di installazione dei pannelli fotovoltaici (fissata a 2,5 m dal piano campagna), determinando, nel complesso, franchi idraulici tra i 0,7 m e 2 m, come si evince dalla Tabella 9 fornita in precedenza.

Per quanto attiene, invece, allo spessore dei pali che sostengono i pannelli, esso risulta variabile tra 35 cm e 50 cm e, pertanto, i pali possono ragionevolmente essere considerati "idraulicamente trasparenti" rispetto al transito delle piene esaminate.

Per quanto riguarda la sottostazione MT-AT in progetto, questa si colloca in un area P2 (in accordo alla perimetrazione del PAI vigente) e il macro-modello implementato in questa sede ne conferma l'interessamento della piena con TR 100 anni, osservando per tutta l'area tiranti massimi compresi tra 1,5 e 2,5 m. La soluzione proposta in questa sede, a solo scopo indicativo, per rendere compatibili le opere in progetto con le caratteristiche dell'esondazione nell'area in esame, consiste nel proteggere la superficie di circa 2.000 m² occupata dalla sottostazione mediante la realizzazione di muri di idonea altezza (allo stato attuale di conoscenza dei fenomeni idraulici che potrebbero

verificarsi nell'area, l'altezza minima individuata per tali opere è di 2,5 m). Al Capitolo 6 dell'elaborato è stato altresì fornito un primo giudizio di compatibilità idraulica delle opere della sottostazione confrontando il volume della piena complessiva e quello sottratto alla stessa mediante la realizzazione delle opere descritte.

Per i suddetti motivi, quindi, si ritiene che l'intervento oggetto della presente relazione possa considerarsi compatibile con l'assetto idrologico-idraulico dell'area in esame.

Le verifiche di cui sopra costituiscono parte integrante dello studio di compatibilità richiesto, per la tipologia di intervento in esame, dalle NTA del PAI di riferimento.

Quale ulteriore elemento da considerare, resta opportuno evidenziare come la vita utile dei campi fotovoltaici in progetto sia pari a circa 30 anni, dunque relativamente trascurabile rispetto ai periodi di ritorno analizzati nell'ambito della presente relazione per comprendere la compatibilità idraulica dell'intervento in progetto. Pertanto, a rigore, secondo il principio d'invarianza delle condizioni di rischio idraulico considerare i periodi di ritorno presi a riferimento del PAI (50-100-300anni) risulta un approccio estremamente a vantaggio di sicurezza.

In ultima analisi, per rafforzare il complessivo giudizio di compatibilità, a parere degli scriventi, fra le opere in progetto e i fenomeni di natura idrologico-idraulica dell'area d'interesse, si sottolinea il seguente passaggio estratto dalle Definizioni fornite dall'ISPRA nel rapporto del 2018 sul consumo di suolo in Italia:

“Le aree coinvolte dall'installazione dei campi fotovoltaici potranno essere potenzialmente reindirizzate alla loro destinazione d'uso originaria, a valle della vita utile degli impianti, dal momento in cui il relativo consumo di suolo è definito dalla stessa Ispra come “consumo di suolo reversibile” in grado di consentire il ripristino delle condizioni iniziali anche in termini di permeabilità

Tutto quanto sopra premesso in tema di norme e pareri di riferimento per la redazione del presente studio, i risultati delle modellazioni e delle verifiche di compatibilità qui presentati, rapportati con le caratteristiche degli interventi in progetto, hanno consentito di appurare che i tiranti delle piene di riferimento (Tr 50 -100 e 300 anni) sono compatibili con gli interventi in progetto, consistenti nell'installazione di un campo fotovoltaico, suddiviso in nove distinte aree pannellabili, e della relativa sottostazione elettrica MT-AT.

Ing. Francesco Morlando
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Napoli
(Sez. A – n. 20111)

Ing. Davide Prato
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Bari
(Sez. A – n. 10083)