

Regione Emilia Romagna



Comune di Finale Emilia



Committente

**VALLETTA SOLAR SRL**

VIA VITTORIA NENNI 8/1

ALBINEA (RE)

CAP 42020

p.iva 03033860358



Titolo del Progetto:

**Progetto per la realizzazione e l'esercizio di un parco agrivoltaico avanzato della potenza di 60,49484 MW, delle opere connesse e delle infrastrutture indispensabili denominato "Valletta"**

Documento:	<b>Progetto di fattibilità tecnico-economica</b> ai sensi del D.lgs 36/23 Art. 41	N° Tavola: REL06
Elaborato:	<b>Relazione idrologica e idraulica</b>	SCALA: -
		FOGLIO: 1 di 1
		FORMATO: A4

folder:	Nome File:	REL06_Relazione idrologica e idraulica_rev.00.pdf
---------	------------	---

Progettazione:  <b>NEW DEVELOPMENTS srl</b> piazza Europa, 14 - 87100 Cosenza (CS)	Progettisti:  dott.ing. Giovanni Guzzo Foliaro    dott.ing. Amedeo Costabile    dott. Ing. Francesco Meringolo
---	--

Rev:	Data Revisione:	Descrizione Revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	15/07/2024	PRIMA EMISSIONE	New. Dev.	VS	VS

## Sommario

Premessa.....	4
1. Area d'intervento.....	5
2. Stato di fatto .....	8
2.1. Sovrapposizione con cartografia PAI e PGRA .....	10
2.1.1. Ambito di riferimento .....	13
2.1.2. Disposizioni specifiche.....	13
3. Obiettivi dello studio idrologico ed idraulico.....	14
4. Analisi idrologica .....	17
4.1. Base dati utilizzata.....	17
4.2. Distribuzione TCEV .....	17
4.3. Approccio gerarchico alla stima regionale dei parametri .....	18
4.4. Curve regionali di crescita delle precipitazioni.....	20
4.5. Analisi delle precipitazioni con il metodo VAPI EMILIA ROMAGNA.....	20
4.6. Definizione dei lineamenti morfologici .....	27
5. Determinazione delle portate di massima piena.....	28
5.1. Calcolo del tempo di corrivazione .....	28
5.2. Il metodo cinematico o razionale .....	30
5.3. Coefficiente di deflusso .....	31
5.4. Risultati dell'applicazione del metodo razionale.....	32
6. Verifiche idrauliche .....	34
6.1. Scelta del tempo di ritorno.....	34
6.2. Descrizione del modello HEC RAS.....	34
6.2.1. Capacità di calcolo.....	34
6.2.2. Algoritmi disponibili per simulazioni nel campo 2D.....	36
6.2.3. Modello concettuale per simulazioni nel campo 2D.....	37
6.2.4. Equazione della conservazione della quantità di moto.....	38
6.2.5. Approssimazione della teoria SW con il metodo dell'Onda Diffusiva .....	39
6.2.6. Tecniche numeriche e stabilità numerica .....	40
6.2.7. La griglia di calcolo e la sotto-griglia topografica .....	42
6.2.8. Schemi di calcolo accoppiati 1D-2D .....	44
6.2.9. Definizione delle condizioni al contorno e iniziali .....	45
6.2.10. Costruzione del modello .....	46
6.3. Risultati delle simulazioni .....	48
Conclusioni.....	52

## Indice delle figure

Figura 1-1 - Inquadramento generale .....	5
Figura 1-2- Suddivisione delle aree di impianto "Area nord" .....	6
Figura 1-3- Suddivisione aree impianto "Area sud" .....	7
Figura 1-4 - Ubicazione dell'impianto e delle opere di connessione su ortofoto .....	8
Figura 2-1 - Immagine satellitare area d'intervento .....	9
Figura 2-2 - Rilievo fotografico dell'area di progetto .....	10
Figura 2-3 - Sovrapposizione opere con la perimetrazione del PAI .....	11
Figura 2-4 - Inquadramento dell'area di progetto nelle mappe di pericolosità del PGRA (RSP) .....	12
Figura 3-1 - Sovrapposizione opere con reticolo idrografico .....	14
Figura 3-2- Sezione tipo cavidotto su terreno .....	15
Figura 3-3-Sezione tipo cavidotto su strada .....	15
Figura 3-4- Sezione tipo di attraversamento mediante staffatura .....	16
Figura 3-5- Sezione tipo di attraversamento mediante TOC .....	16
Figura 4-1- Suddivisione in sottozone pluviometriche omogenee .....	22
Figura 4-2- Isolinee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di un giorno $m(h_g)$ .....	24
Figura 4-3- Isolinee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di un'ora $m(h_1)$ .....	24
Figura 4-4 - Curve di possibilità pluviometrica per l'area di studio per $t>1$ ora .....	25
Figura 4-5- Curve di possibilità pluviometrica per l'area di studio per $t<1$ ora .....	27
Figura 4-6 - Bacino idrografico di riferimento.....	28
Figura 5-1 - Metodo cinematico: schema del bacino e idrogramma di piena per differenti durate di precipitazione .....	30
Figura 5-2 - Copertura e uso del suolo Regione Emilia-Romagna nell'area di studio.....	32
Figura 5-3- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Nord_1 .....	33
Figura 5-4- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Nord_2 .....	33
Figura 5-5- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Sud.....	34
Figura 6-1 - Schema di discretizzazione a doppia griglia utilizzato dal modello HEC RAS 2D .....	42
Figura 6-2 - Faccia della cella, informazione topografica e tabella delle proprietà.....	43
Figura 6-3 - Processo di costruzione della mesh, del modello del terreno e delle proprietà idrauliche associate ai lati e ai nodi delle celle .....	44
Figura 6-4 - Mesh di calcolo del modello 2D.....	47
Figura 6-5 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 30 anni -Aree NORD_1 e NORD_2 .....	48
Figura 6-6 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 50 anni -Aree NORD_1 e NORD_2 .....	49
Figura 6-7 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 30 anni -Area SUD.....	50
Figura 6-8 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 50 anni -Area SUD.....	50

## Indice delle tabelle

Tabella 4-1- Parametri della distribuzione di probabilità dei massimi annuali delle piogge giornaliere nelle 7 SZO .....	22
Tabella 4-2- Valori del coefficiente probabilistico di crescita KT per le piogge giornaliere.....	23
Tabella 4-3- Valore dei parametri adottati .....	25
Tabella 4-4 - Calcolo altezze di pioggia al III livello di regionalizzazione .....	25
Tabella 4-5- Parametri delle curve di possibilità pluviometrica per $t > 1$ ora.....	26
Tabella 4-6- Parametri delle curve di possibilità pluviometrica per $t < 1$ ora.....	26
Tabella 4-7- Lineamenti morfologici dei bacini di studio.....	27
Tabella 5-1- Valori del tempo di corrivazione.....	29
Tabella 5-2 - Coefficienti di deflusso da letteratura .....	31
Tabella 5-3- Risultati del calcolo della portata di picco .....	32

## Premessa

Il seguente studio idrologico e idraulico è parte integrante del Progetto di fattibilità tecnico-economica **impianto agrivoltaico avanzato** denominato "Valletta", in conformità a quanto stabilito dall'articolo 65, comma 1-quater e 1-quinquies, del decreto-legge 24 gennaio 2012, n. 1, e ss. mm, che la società **Valletta Solar SRL** intende realizzare nel territorio del Comune di **FINALE EMILIA (MO)**. La potenza nominale complessiva dell'impianto fotovoltaico è pari a **60,49484 MW**, installata su una superficie complessiva di **78,3546 Ha** dei quali **66,7730 Ha** coltivabili.

Il progetto prevederà oltre le aree destinate alla produzione di **agroenergia**, le opere necessarie per il collegamento dello stesso alla RTN. In particolare, sarà realizzato un **elettrodotto interrato di vettoriamento MT**, una **sottostazione elettrica di trasformazione MT/AT** e un **elettrodotto interrato AT** per il collegamento con la stazione elettrica esistente denominata "**FINALE EMILIA**", come indicato nel preventivo di connessione con codice di rintracciabilità **398995347**.

## 1. Area d'intervento

Il progetto ubicato nel territorio del comune di Finale Emilia (MO), propone la realizzazione di un impianto agrolvoltaico avanzato come soluzione per una forma innovativa di agricoltura che combina la produzione di energia solare con le attività agricole tradizionali.

La figura che segue mostra l'inquadramento del progetto nel contesto cartografico IGM. Il progetto, interesserà due macroaree denominate "Area nord" e "Area sud" suddivise in 6 campi opportunamente delimitati, come mostrato nella seguente Figura 1-1, dove coesisteranno un impianto fotovoltaico ed uno agricolo, un elettrodotto interrato MT, un elettrodotto interrato AT ed una sottostazione di trasformazione. Il collegamento alla RTN avverrà presso la cabina primaria già esistente denominata "FINALE EMILIA" sito in via PER MODENA SNC del suddetto comune. Le aree che non potranno essere utilizzate per l'installazione dei moduli verranno comunque impiegate in ambito agricolo.

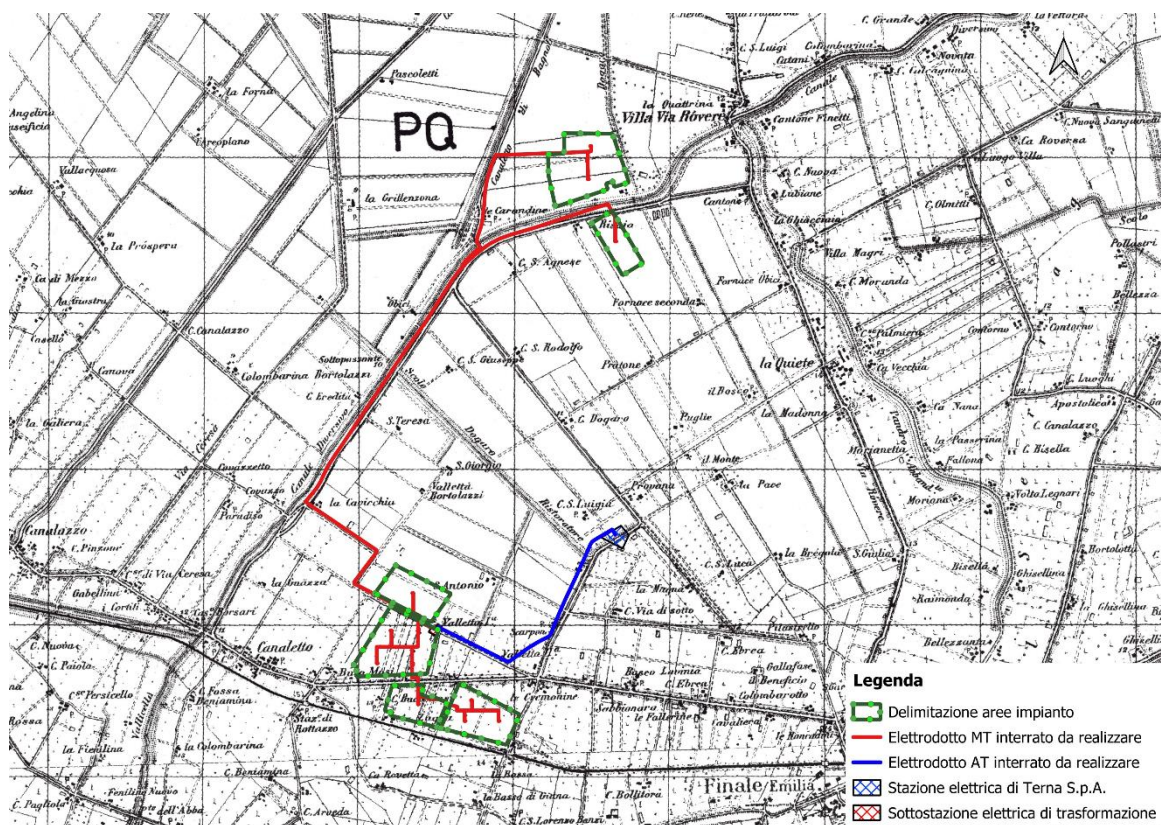


Figura 1-1 - Inquadramento generale

Le aree occupate dall'impianto si sviluppano su una superficie recintata complessiva di circa complessiva di circa **78,3546 Ha** lordi così suddivisa:

- **61,4020 Ha** – area adibita alla produzione di energia elettrica e all'attività agricola;
- **1,671 Ha** – area adibita alla piantumazione delle piante di mitigazione visiva;

- **5,3710 Ha** – area adibita ad uso prettamente agricolo;
- **4,6536 Ha** – area composta da viabilità agricola, zone ripariali, alberatura e casolari.
- **4,0300 Ha** – aree necessarie per il posizionamento supporti delle strutture FV
- **1,0270 Ha** – aree composta da viabilità in misto granulare da realizzare
- **0,2000 Ha** – area occupata dalla sottostazione elettrica



Figura 1-2- Suddivisione delle aree di impianto "Area nord"



Figura 1-3- Suddivisione aree impianto "Area sud"

All'interno dell'area parco saranno inoltre garantiti spazi di manovra e corridoi di movimento adeguati, per facilitare il transito dei mezzi atti alla manutenzione.

L'impianto agrivoltaico avanzato sarà collegato alla rete di e-distribuzione tramite realizzazione nuova uscita in antenna su stallo di **cabina primaria "FINALE EMILIA"**, per come indicato nel preventivo di connessione da e-distribuzione S.p.A., allegata al progetto.

La connessione con la RTN avverrà tramite la realizzazione di un **elettrodotto interrato MT**, fino alla **sottostazione elettrica di trasformazione** e di un **elettrodotto AT** anch'esso interrato, che collegherà la sottostazione con la cabina primaria denominata **"FINALE EMILIA"**. La sottostazione di trasformazione verrà realizzata internamente ad un campo FV di progetto denominato **"Campo D"**.





Figura 1-4 - Ubicazione dell'impianto e delle opere di connessione su ortofoto

## 2. Stato di fatto

L'area studiata ricade, dal punto di vista geologico e geomorfologico, nella bassa pianura modenese; in tal senso si colloca nella parte meridionale dell'ampio bacino subsidente di età pliocenico-quadernaria rappresentato dalla Pianura Padana.

In funzione dell'andamento orografico, l'area d'intervento è mostrata nella seguente immagine satellitare:

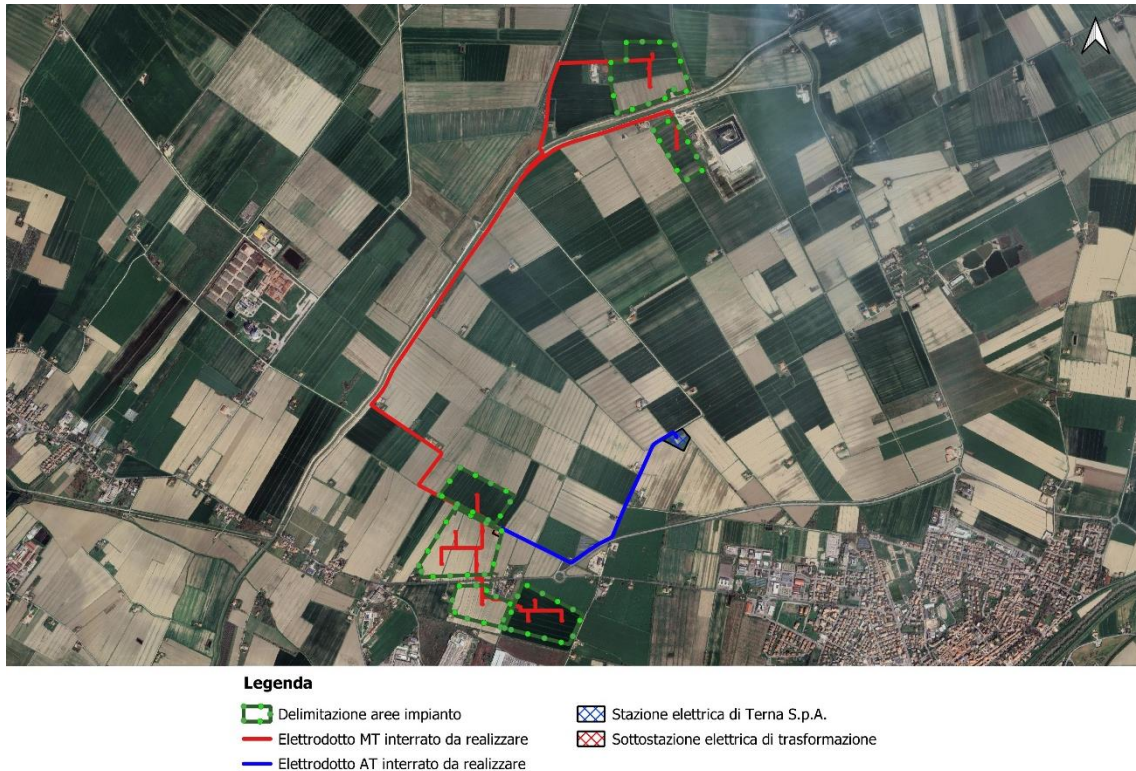


Figura 2-1 - Immagine satellitare area d'intervento

Geomorfologicamente, a livello generale, l'area oggetto di studio si presenta totalmente pianeggiante (essendo appunto collocata nella Pianura Padana) con pendenze massime di  $1^\circ$  e conseguente classificazione topografica del terreno: **T1**.

Per quanto concerne le quote altimetriche, l'area impianti posta più a sud e l'area della stazione elettrica e-distribuzione sorgono ad un'altitudine media di circa 11 m s.l.m.; l'area impianti posta più a nord sorge, invece, a un'altitudine media di circa 8 m s.l.m..

Per quanto riguarda i caratteri geomorfologici, da rilevamento geomorfologico effettuato risaltano subito alla vista gli argini del Canale diversivo di Burana; per il resto, è difficile trovare elementi di spicco in una pianura, le uniche forme degne di nota sono rappresentate da piccoli orli di scarpata dei canali ad uso irriguo che bordano gli appezzamenti terrieri e sono molto diffusi nell'intera area, oltre che orli di scarpata dei piccoli laghetti artificiali presenti sul territorio.

Il reticolo idrografico ricadente nell'area di progetto è costituito essenzialmente da numerose piccole aste idriche e da numerosissimi canali artificiali, poco profondi, di competenza del Consorzio della Bonifica Burana, utilizzati per l'irrigazione dei campi presenti nella zona.

Il principale corso d'acqua presente in prossimità dell'area impianto è il Diversivo di Burana che è la principale arteria del bacino delle acque alte nella Bassa Pianura Modenese, definito di tipo promiscuo,

poiché assolve sia una funzione di scolo che irrigua. Esso dista circa 900 m rispetto all'area Sud dell'impianto ed è limitrofo all'area Nord. Gli argini del Diversivo di Burana sono alti alcuni metri e, spesso, caratterizzati in sommità dalla presenza di strade sterrate.

Inoltre, sempre a circa 900 m più a sud dell'area Sud si segnala la presenza del Fiume Panaro.



Figura 2-2 - Rilievo fotografico dell'area di progetto

### 2.1. Sovrapposizione con cartografia PAI e PGRA

Le aree di intervento ricadono nel territorio di competenza Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Il piano in oggetto, adottato dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di bacino del fiume Po con Deliberazione n. 18 del 26 aprile 2001 e successivamente approvato con DPCM 24 maggio 2001, e le successive modifiche ed integrazioni di tale stralcio del Piano di bacino del Po, compresa l'adozione del "Progetto Di Aggiornamento Del Piano Stralcio Per l'assetto Idrogeologico Del Bacino Del Fiume Po (PaiPo) E Del Pgra Del Distretto Idrografico Del Fiume Po: Fiume Secchia Da Lugo Alla Confluenza Nel Fiume Po E Torrente Tresinaro Da Viano Alla Confluenza Nel Fiume Secchia" E Sua Pubblicazione, Ai Fini Della Partecipazione Attiva Delle Parti Interessate, Ai Sensi Dell'art. 68, Comma 4 Ter Del D. Lgs. N. 152/2006 E Della Successiva Approvazione." (Adottato con Decreto S.G. dell'AdBPo n. 316 del 3/08/2021 ed approvato con Decreto S.G. dell'AdBPo n. 49

del 13/04/2022), pianifica e programma le norme d'uso riguardanti l'assetto idraulico ed idrogeologico del bacino idrografico, le fasce fluviali, le aree a rischio idrogeologico molto elevato.

Da consultazione delle carte tematiche presenti sui siti delle AdB sopra menzionate, sono state riscontrate aree di pericolosità/rischio idraulico di "bassa probabilità" (Fasce Fluviali- "Fascia C") in corrispondenza delle aree oggetto di intervento, come mostrato nella Figura 2-3. Come definito nelle "Norme di attuazione", nel comma 4 art. 31, "Compete agli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, regolamentare le attività consentite, i limiti e i divieti per i territori ricadenti in fascia C".

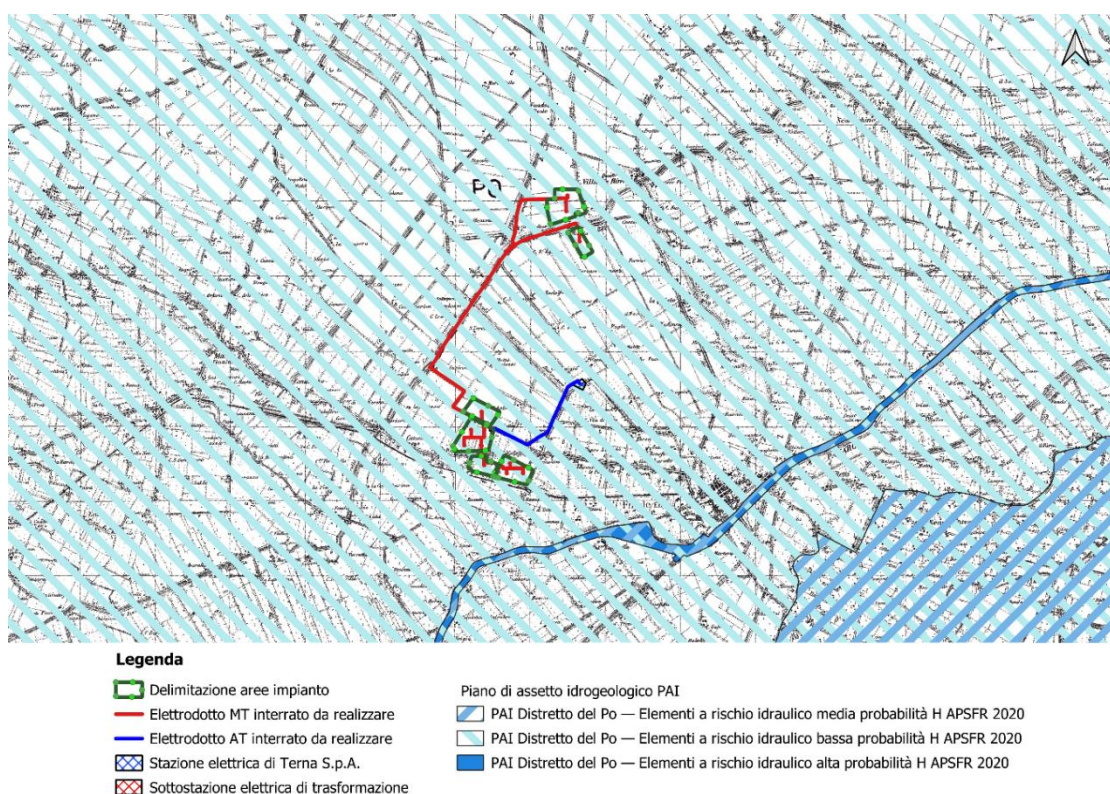


Figura 2-3 - Sovrapposizione opere con la perimetrazione del PAI

Occorre osservare che il presente studio è stato elaborato ai fini di definire limiti e accorgimenti da assumere per rendere l'intervento compatibile con le criticità rilevate, in base al tipo di pericolosità e al livello di esposizione locali, così come previsto nelle "Disposizioni specifiche" di cui al punto 5.2 dell'Allegato 1 alla D.G.R. 1300/2016.

A seguito dell'entrata in vigore delle seguenti normative:

- Deliberazione n. 5 del 17 dicembre 2015 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del Fiume Po è adottato il "Progetto di Variante al Piano stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino fiume Po (PAI) - Integrazioni all'Elaborato 7 (Norme di Attuazione) e al Piano stralcio per l'assetto idrogeologico del Delta del fiume Po (PAI Delta) - Integrazioni all'Elaborato 5 (Norme di Attuazione), pubblicata in Gazzetta Ufficiale il 16.02.2016 (data di decorrenza delle misure di salvaguardia)";

- D.G.R. n. 1300 del 01/08/2016 " Prime disposizioni regionali concernenti l'attuazione del piano di gestione del rischio di alluvione nel settore urbanistico, ai sensi dell'art.58 elaborato n.7 (norme di attuazione) e dell'art.22 elaborato n. 5 (norme di attuazione) del progetto di variante al PAI e al PAI delta adottato dal comitato istituzionale Autorità di Bacino del Fiume Po con deliberazione n. 5/2015";

Dunque, ai fini del rilascio del Permesso di Costruire o dell'efficacia della Segnalazione Certificata di Inizio Attività inerente gli immobili interessati da interventi edilizi in quanto ricadenti in area interessata dal Reticolo Secondario di Pianura (RSP), occorre prendere in considerazione le "Disposizioni specifiche" di cui al punto 5.2 dell'Allegato 1 alla D.G.R. 1300/2016 e predisporre la documentazione tecnica prevista all'ultimo capoverso di tali Disposizioni consistente in una "valutazione che consenta di definire gli accorgimenti da assumere per rendere l'intervento compatibile con le criticità idrauliche rilevate, in base al tipo di pericolosità e al livello di esposizione".

L'area di progetto dell'“Area nord” è localizzata interamente nelle aree “H-P3 – alta probabilità” mentre l'“Area sud” ricade maggiormente nelle aree “M-P2 – media probabilità” e in minima parte in nelle aree “H-P3 – alta probabilità”, incluse nel PGRA del Reticolo Secondario di Pianura (RSP) delimitate nell’ambito delle precedenti normative, come mostrato nella figura sotto riportata.

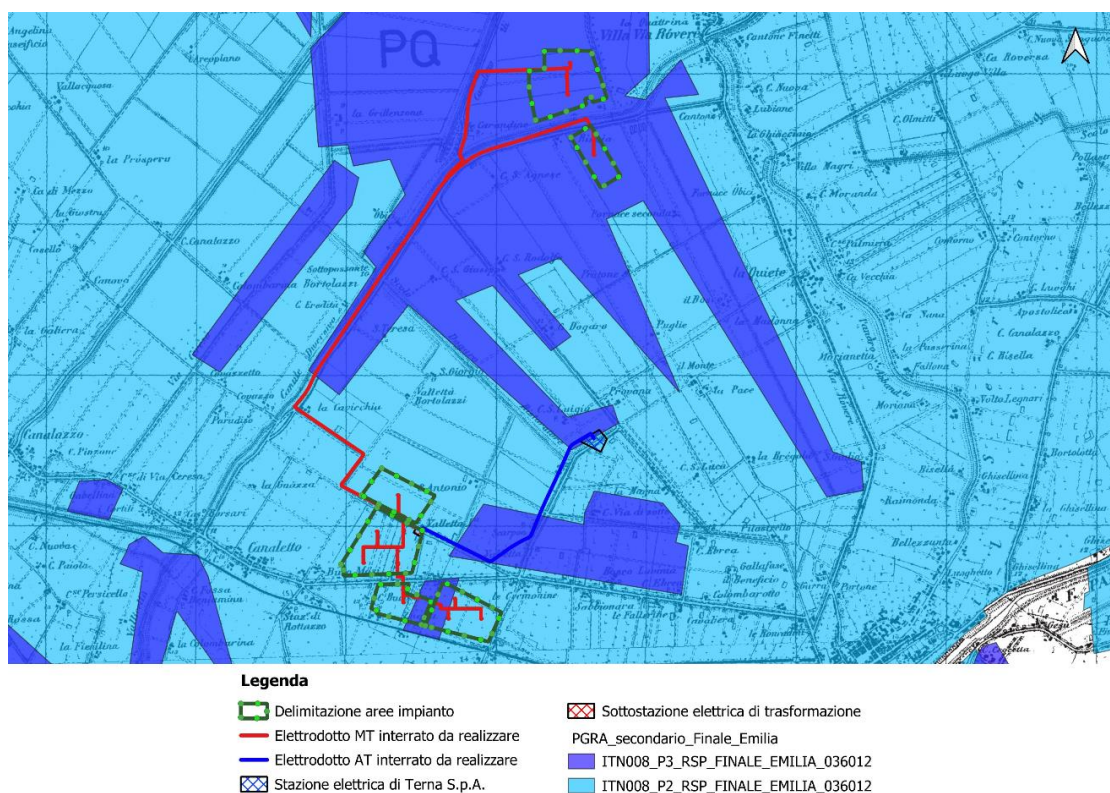


Figura 2-4 - Inquadramento dell'area di progetto nelle mappe di pericolosità del PGRA (RSP)

Nel seguito si riporta un breve stralcio della Delibera Regionale 1300/2016.

### 2.1.1. Ambito di riferimento

Il Reticolo secondario di pianura (RSP) è costituito dai corsi d'acqua secondari di pianura gestiti dai Consorzi di bonifica e irrigui nella medio - bassa pianura padana, nel caso in esame il consorzio competente è il *Consorzio della Bonifica Burana*. La perimetrazione delle aree potenzialmente allagabili è stata effettuata con riferimento agli scenari di alluvione frequente (P3) e poco frequente (P2) previsti dalla Direttiva. Il metodo di individuazione delle aree soggette ad alluvioni è stato di tipo prevalentemente storico - inventariale e si è basato sugli effetti di eventi avvenuti generalmente negli ultimi 20-30 anni in quanto ritenuti maggiormente rappresentativi delle condizioni di pericolosità connesse con l'attuale assetto del reticolo di bonifica e del territorio. A questa tipologia di aree si aggiungono limitate zone individuate mediante modelli idrologico – idraulici e aree delimitate sulla base del giudizio esperto degli enti gestori in relazione alla incapacità, più volte riscontrata, del reticolo a far fronte ad eventi di precipitazione caratterizzati da tempi di ritorno superiori (in media) a 50 anni (individuato come tempo di ritorno massimo relativo allo scenario P3). Stante le caratteristiche proprie del reticolo, nello scenario di alluvione poco frequente (P2), l'involuppo delle aree potenzialmente allagabili, coincidente con gran parte dei settori di pianura dei bacini idrografici, ha carattere indicativo e necessita di ulteriori approfondimenti di tipo conoscitivo. Ne deriva che l'estensione delle aree interessate da alluvioni rare (P1) è ricompresa, di fatto, nello scenario P2. Le alluvioni dovute ad esondazione del reticolo artificiale di bonifica, seppure caratterizzate da alta frequenza, presentano tiranti e velocità esigui che danno origine a condizioni di rischio medio (R2) e moderato/nullo (R1) ed in casi limitati, prevalentemente situati in zone urbanizzate e insediate interessate da alluvioni frequenti, a condizioni di rischio elevato (R3). La mitigazione delle condizioni di rischio per il patrimonio edilizio esistente si fonda su azioni di protezione civile ed eventualmente di autoprotezione e di protezione passiva. Per quanto riguarda gli interventi edilizi nel seguito dettagliati si fa riferimento alle disposizioni specifiche sotto riportate.

### 2.1.2. Disposizioni specifiche

In relazione alle caratteristiche di pericolosità e rischio descritte nel paragrafo precedente, nelle aree perimetrate a pericolosità P3 e P2 dell'ambito Reticolo Secondario di Pianura, laddove negli strumenti di pianificazione territoriale ed urbanistica non siano già vigenti norme equivalenti, si deve garantire l'applicazione:

- di misure di **riduzione della vulnerabilità dei beni e delle strutture esposte**, anche ai fini della tutela della vita umana;
- di misure volte al **rispetto del principio dell'invarianza idraulica**, finalizzate a salvaguardare la capacità ricettiva del sistema idrico e a contribuire alla difesa idraulica del territorio.

Le successive indicazioni operative incluse nei documenti normativi vanno considerate per il rilascio dei titoli relativi agli interventi edilizi che non rientrano nel caso in esame.

In ottemperanza alle disposizioni delle normative vigenti, il presente studio è stato pertanto redatto al fine di verificare e ridurre la vulnerabilità degli interventi progettuali.

### 3. Obiettivi dello studio idrologico ed idraulico

Come precedentemente riportato, le aree di impianto ricadono in aree a pericolosità/rischio idraulico di "alta probabilità" per l'"Area nord" e "media probabilità" e in minima parte "alta probabilità" per l'"Area sud", dunque si procederà ad uno studio idrologico ed idraulico di dettaglio, in modo da verificare e ridurre la vulnerabilità degli interventi progettuali.

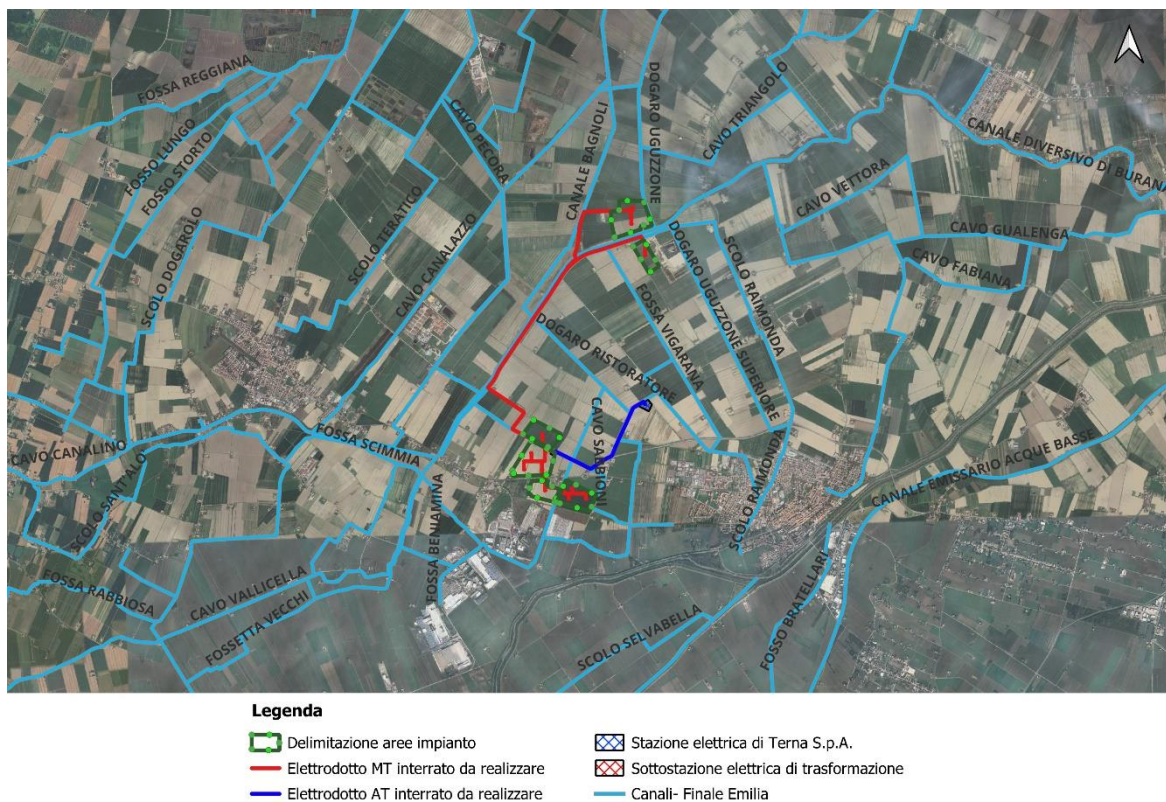


Figura 3-1 - Sovrapposizione opere con reticolo idrografico

Per quanto riguarda il tratto di elettrodotto interrato è stato studiato in modo da sfruttare quanto più possibile percorsi di viabilità esistente e comunque interni o prossimi alle sedi di pertinenza della viabilità esistente. L'elettrodotto sarà posato a profondità di circa 1.00 m rispetto al piano campagna in modo tale da non interferire direttamente con il libero deflusso delle acque del reticolo esistente.

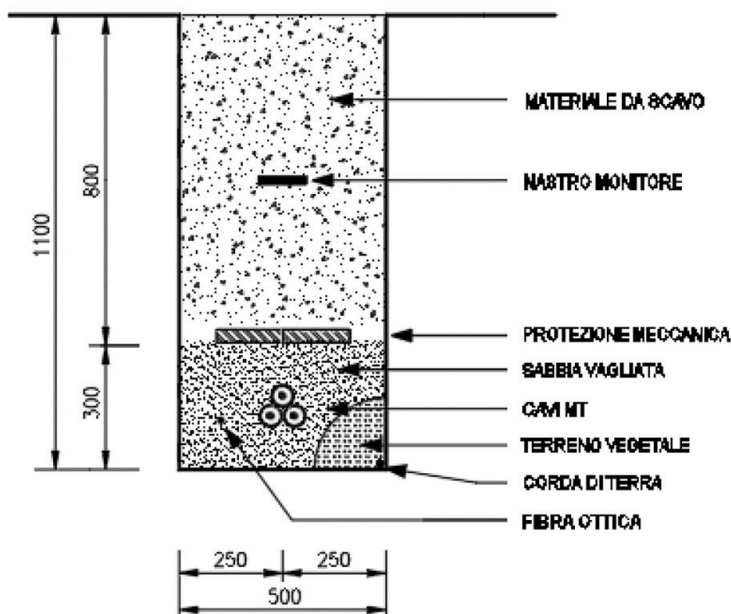


Figura 3-2- Sezione tipo cavidotto su terreno

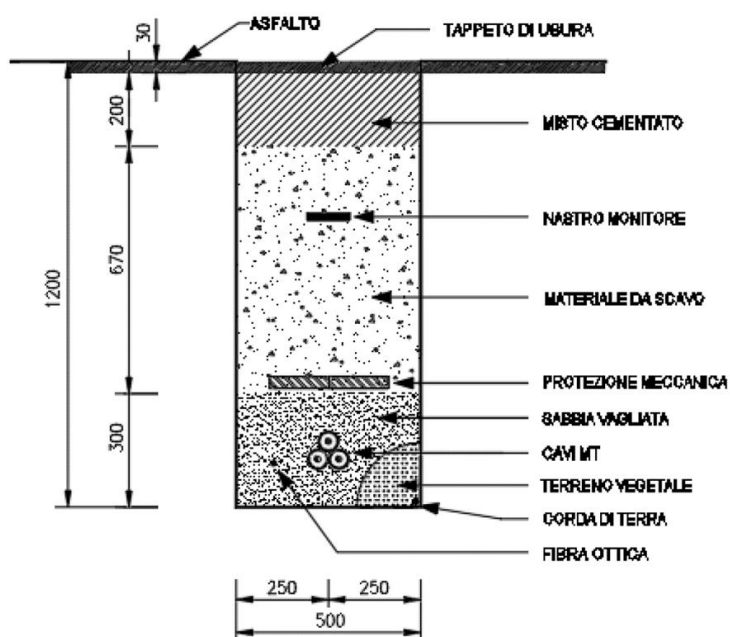


Figura 3-3-Sezione tipo cavidotto su strada

Più in particolare, per quasi la totalità dello sviluppo, il cavidotto sarà posto in opera con sezione tipo su strada, essendo lo stesso posato sulla viabilità secondaria comunale. In corrispondenza degli attraversamenti esistenti, il cavidotto MT sarà ancorato/staffato alle strutture, in modo da non interferire con il libero deflusso delle acque.



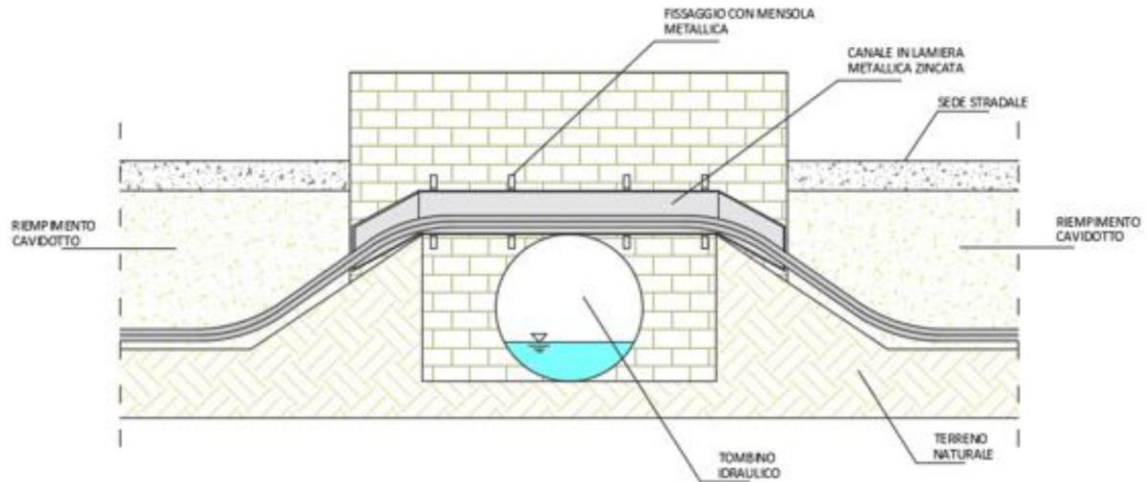


Figura 3-4- Sezione tipo di attraversamento mediante staffatura

In alternativa è possibile ricorrere alla tecnologia di trivellazione orizzontale controllata (TOC) che risulta spesso la soluzione più efficace per l'installazione di sotto-servizi limitando al minimo le zone di lavoro ed eliminando completamente la vista del canale metallico. Con questa tecnica è possibile eseguire l'attraversamento anche sotto il fosso naturale (immediatamente dopo lo sbocco) senza interessare la struttura del tombino idraulico.

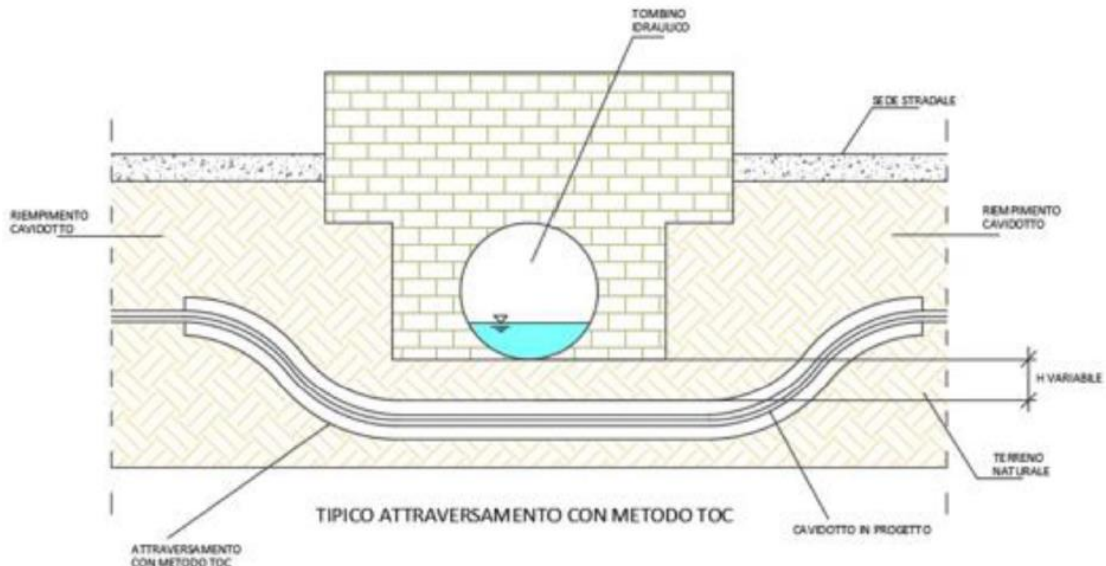


Figura 3-5- Sezione tipo di attraversamento mediante TOC

Per la definizione delle fasi operative e ad integrazione delle analisi idrologiche ed idrauliche effettuate nei successivi capitoli, si procederà, nei livelli successivi di progettazione, ad effettuare uno studio idraulico di maggior dettaglio dell'area, mirato a ottimizzare la gestione del cantiere e, qualora necessario,

definire eventuali misure e/o opere di mitigazione temporanee per la sicurezza delle maestranze e mezzi impiegati nelle lavorazioni.

## 4. Analisi idrologica

In fase di analisi idrologica, si procederà a definire la pluviometria dell'area, da usare successivamente come base per i dimensionamenti e le verifiche idrauliche. Le analisi sono state effettuate attraverso metodi di stima indiretta che, a partire dalla definizione delle curve di possibilità pluviometrica (CPP), esprimenti la relazione fra le altezze di precipitazione  $h$  e la loro durata  $t$ , e dalla perimetrazione del bacino, ha consentito la stima delle portate di progetto ad assegnato tempo di ritorno. Nei paragrafi a seguire verranno descritte nel dettaglio le varie fasi dello studio idrologico.

Gli afflussi naturali sono stati determinati, per assegnati tempi di ritorno, tramite l'impiego di piogge estreme regionalizzate nell'ambito del progetto VAPI-CNR dello studio del GNDCl (*Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche*) con il modello probabilistico che adotta la distribuzione TCEV (*Two-Component Extreme Value*).

L'adozione di tale metodo di indagine idrologica è stata ritenuta più appropriata per l'area in oggetto, in quanto garantisce risultati già ampiamente testati e quindi ritenuti sufficientemente cautelativi rispetto a quelli desumibili dai metodi tradizionali di elaborazione statistica.

Con il modello regionalizzato, in base alla scelta del tempo di ritorno che coincide con la scelta del "rischio idraulico", si ottengono le intensità di pioggia critiche.

### 4.1. Base dati utilizzata

L'analisi statistica è stata condotta sulle stazioni con almeno 30 anni di osservazione, individuando così 792 stazioni di misura della precipitazione giornaliera (numerosità media campionaria 48 anni) e 240 delle piogge di durata 1-24 ore (numerosità media campionaria di 43 anni).

### 4.2. Distribuzione TCEV

Il modello a doppia componente denominato TCEV (Rossi et al., 1984) ipotizza che i massimi annuali delle precipitazioni o delle portate al colmo non provengano tutti dalla stessa popolazione ma da due popolazioni distinte legate a differenti fenomeni meteorologici. Tale ipotesi è, peraltro, giustificata dalla presenza in quasi tutte le serie storiche delle precipitazioni e delle portate al colmo di uno o più valori (outliers) nettamente maggiori degli altri al punto da sembrare non provenienti dalla stessa popolazione dei rimanenti dati.

La funzione di probabilità cumulata del modello TCEV può essere espressa nella forma:

REL06	Relazione idrologica e idraulica	17 di 53
-------	----------------------------------	----------

$$F_X(x) = \exp\left\{-\Lambda_1 \exp\left(-\frac{x}{\Theta_1}\right) - \Lambda_2 \exp\left(-\frac{x}{\Theta_2}\right)\right\} \quad x \geq 0$$

La funzione ha quattro parametri,  $\Lambda_1$ ,  $\Theta_1$ ,  $\Lambda_2$  e  $\Theta_2$ . I parametri contraddistinti dal pedice 1 sono relativi agli eventi più frequenti (componente base) mentre quelli con pedice 2 si riferiscono ad eventi più gravosi e rari (componente straordinaria). Ognuna delle due componenti è, a tutti gli effetti, una legge di Gumbel.

I parametri  $\Lambda_1$  e  $\Lambda_2$  esprimono, rispettivamente per le due componenti, il numero medio annuo di eventi indipendenti superiori ad una soglia. I parametri  $\Theta_1$  e  $\Theta_2$  esprimono invece la media di tali eventi. Spesso è utile fare riferimento, anziché alla  $X$ , alla variabile standardizzata

$$Y = \frac{X}{\Theta_1} - \ln \Lambda_1$$

caratterizzata dalla funzione di probabilità cumulata:

$$F_Y(y) = \exp\left\{-\exp(-y) - \Lambda_* \exp\left(-\frac{y}{\Theta_*}\right)\right\}$$

nella quale risulta:

$$\Theta_* = \frac{\Theta_2}{\Theta_1} \quad \Lambda_* = \frac{\Lambda_2}{\Lambda_1^{1/\Theta_*}}$$

L'espressione completa della funzione di probabilità cumulata della TCEV può essere ulteriormente semplificata facendo riferimento alla variabile adimensionale  $K_{t,Tr} = X_{t,Tr} / \mu(X_t)$  dove con  $\mu(X_t)$  si è indicato il *valore indice* (la media della variabile). La funzione di probabilità cumulata di questa nuova variabile  $K_{t,Tr}$  è la cosiddetta *curva di crescita* la quale dipende dai parametri  $\Lambda_*$ ,  $\Theta_*$ ,  $\Lambda_1$  e  $\Theta_1$ , l'ultimo dei quali è rappresentabile analiticamente in funzione della media.

Tale curva risulta avere validità nell'ambito di sottozone omogenee, per cui rappresenta uno strumento di uso particolarmente comodo. Infatti, nell'ambito delle suddette sottozone, è sufficiente determinare la media della variabile ( $\mu(X_t)$  per avere, a partire dalla  $K_{t,Tr}$ , la distribuzione di probabilità finale.

$$F_X(x) = \mu(X_t) K_{t,Tr}$$

### 4.3. Approccio gerarchico alla stima regionale dei parametri

Sulle relazioni che intercorrono tra momenti teorici e parametri della distribuzione TCEV si basa la strutturazione regionale della stima dei parametri del modello TCEV, in particolare con riferimento ai momenti del secondo e del terzo ordine.

Va innanzitutto detto che mediante l'espressione dei momenti teorici del modello TCEV, si dimostra che il coefficiente di variazione teorico dipende da  $\Lambda_*$ ,  $\Theta_*$  e  $\Lambda_1$  ed è quindi indipendente da  $\Theta_1$ , mentre il coefficiente di asimmetria teorico dipende da  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$  ed è quindi indipendente da  $\Lambda_1$  e  $\Theta_1$ .

La stima su base regionale di parametri dipendenti da momenti di ordine elevato si rende necessaria in quanto i coefficienti di asimmetria e di variazione campionari, espressi rispettivamente dalle relazioni:

$$C_A = \sqrt{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \right]^{3/2}} \quad C_V = \frac{N}{\sqrt{N-1}} \cdot \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \right]^{3/2}}{\sum_{i=1}^N x_i}$$

stimati dalle serie storiche dei massimi annuali delle portate istantanee, o delle piogge di fissata durata, presentano una variabilità spaziale che nell'ambito di vaste aree non è superiore alla variabilità campionaria. In altri termini, presentano variabilità campionaria molto elevata, ma bassa variabilità spaziale.

Ciò consente di ipotizzare l'esistenza di regioni nelle quali si può ammettere che i valori teorici di tali momenti siano costanti. Per le relazioni di cui si è detto in precedenza si ha come conseguenza la costanza dei parametri del modello TCEV direttamente legati ai suddetti momenti campionari.

La procedura di regionalizzazione adottata nello studio regionale è di tipo gerarchico strutturata su tre livelli:

#### *I° Livello di regionalizzazione:*

Si assume che il coefficiente di asimmetria  $C_A$  sia costante in una regione molto ampia (l'intera Italia Appenninica ed insulare ad eccezione della Sardegna). Ciò implica, per quanto detto in precedenza, la costanza dei parametri  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$  del modello TCEV nella medesima zona.

Inoltre in una regione omogenea rispetto a  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$ , risulta unica la funzione di probabilità cumulata della variabile standardizzata  $Y$ , in quanto essa dipende soltanto dai due suddetti parametri del modello. In assenza di dati sufficienti a mettere in discussione localmente la validità di questa assunzione, si pone che ovunque  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$  assumano i valori calcolati nell'ambito della zona unica.

#### *II° Livello di regionalizzazione*

Al secondo livello di regionalizzazione si assume che la regione omogenea rispetto a  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$  possa suddividersi in sottozone in cui il coefficiente di variazione  $C_V$  risulti costante, nel senso che vari con piccoli scarti di disturbo spaziale intorno a valori medi differenti da una zona all'altra.

RELO6	Relazione idrologica e idraulica	19 di 53
-------	----------------------------------	----------

Per il modello TCEV questo si traduce nella costanza del parametro  $\Lambda_1$ , nella sottozona omogenea, oltre che di  $\Lambda_*$  e  $\Theta_*$ . Il valore di  $\Lambda_1$  relativo alla sottozona va stimato utilizzando tutti i dati disponibili nella zona.

Se si individua una sottozona omogenea rispetto a  $\Lambda_1$  la variabile  $K_{t,T} = X_{t,T} / \mu(X_t)$  risulta identicamente distribuita, si ha cioè una curva di crescita unica per l'intera sottozona.

### III° Livello di regionalizzazione

Il terzo livello di regionalizzazione consiste nell'individuazione di aree omogenee nelle quali sia possibile determinare le relazioni che legano la media  $\mu(X_t)$  (valore indice) alle caratteristiche fisiche di interesse.

Nel seguito si fa riferimento al valore indice della precipitazione  $\mu(X_t)$  in quanto l'ipotesi di aree con caratteristiche morfologiche (es. quota) e climatiche tali da poter definire un valore indice  $\mu(X_t)$  costante è applicabile solo per le piogge e spesso non è verificata.

#### 4.4. Curve regionali di crescita delle precipitazioni

Nell'analisi delle piogge orarie per ogni sito è possibile legare il valore medio  $\mu(X_t)$  dei massimi annuali della precipitazione media di diversa durata  $t$  alle durate stesse, attraverso la curva di probabilità pluviometrica:

$$\mu(X_t) = a t^n$$

La stima delle precipitazioni per fissata durata in corrispondenza di un dato tempo di ritorno avviene tramite il calcolo dei valori della media dei massimi delle precipitazioni stesse  $X_t$  relative ad una generica durata  $t$ , e la successiva amplificazione delle stesse attraverso il fattore di crescita (della media con il periodo di ritorno)  $K_T$

$$h_{t,T} = \mu(X_t) K_T$$

#### 4.5. Analisi delle precipitazioni con il metodo VAPI EMILIA ROMAGNA

In questo capitolo si illustreranno i risultati del Progetto VAPI per la stima delle portate di assegnato tempo di ritorno per il territorio di interesse in questo studio. Questa sintesi è stata articolata con riferimento a indagini effettuate nella modellazione dei dati pluviometrici ed idrometrici della regione, contenute nelle seguenti memorie e rapporti tecnici:

- *"Valutazione delle piogge estreme in Romagna e Marche"* [Franchini e Galeati, 1994] e *"La regionalizzazione delle piogge intense mediante modello TCEV. Una applicazione alla regione Romagna Marche"* [Franchini e Galeati, 1994], per quanto riguarda la modellazione statistica dei dati pluviometrici relativi agli eventi massimi annuali osservati nel territorio del compartimento SIMN di Bologna.
- *"Il fattore di riduzione delle piogge all'area. Stima di una legge interpretativa"* [Benaglia, 1996], per quanto riguarda la modellazione del fattore di riduzione areale delle piogge intense (ARF) osservate nelle stazioni pluviometriche dislocate nel bacino del Reno e bacini limitrofi.
- *"Analisi regionale dei massimi annuali delle portate al colmo per la regione Romagna Marche"* [Franchini e Galeati, 1996] e *"Analisi delle portate massime annuali su intervalli di assegnata durata nei corsi d'acqua della regione Romagna Marche"* [Franchini e Galeati, 1998] per quanto riguarda la modellazione statistica degli eventi idrometrici massimi annuali osservati nel territorio del compartimento SIMN di Bologna; *"La valutazione regionale del rischio di piena con il metodo della portata indice"* [Brath e Franchini, 1998] per quanto riguarda la modellazione statistica degli eventi idrometrici massimi annuali osservati nell'Italia settentrionale; *"La stima della portata indice mediante metodi indiretti"* [Brath et al., 1999b] per quanto riguarda la modellazione della portata indice con riferimento ai dati disponibili sul territorio del compartimento SIMN di Bologna e sui bacini appenninici emiliano affluenti in sponda destra del Po compresi tra i fiumi Scrivia e Panaro sui quali ha competenza l'Ufficio Idrografico per il Po.
- *"Valutazione delle piogge intense nell'Italia centrosettentrionale"* [Brath et al., 1998], per quanto riguarda la modellazione statistica dei dati pluviometrici relativi agli eventi massimi annuali osservati nel territorio di competenza dei compartimenti SIMN di Bologna, Pisa e Roma. Questo studio è stato ultimamente affinato considerando anche i dati pluviometrici relativi ai bacini idrografici affluenti in destra Po, dallo Scrivia al Panaro, gestiti dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma. I risultati sono raccolti in *"Valutazione regionale degli indici di rischio idropluviometrico in alcune regioni dell'Italia centrale e settentrionale"* [Brath et al., 1999a] ed in *"La valutazione delle piogge intense su base regionale"* [Brath e Franchini, 1999].

L'analisi pluviometrica inizialmente svolta da Franchini e Galeati [1994] in riferimento al compartimento SIMN di Bologna ha portato all'identificazione di 2 sotto zone omogenee (SZO), una zona costiera ed una zona appenninica, la cui omogeneità in senso statistico è stata confermata in un successivo studio da Brath et al. [1998]. Tale studio si estende anche ai bacini idrografici di competenza dei SIMN di Pisa e Roma. Esso ha portato alla identificazione nell'ambito delle regioni Toscana, Umbria e Lazio di due ulteriori

SZO: la prima include la zona tirrenica costiera e parte della vallata del Tevere, mentre la seconda i contrafforti appenninici lungo il versante tirrenico. Un più recente studio, che integra i precedenti dati pluviometrici con quelli relativi ai bacini idrografici in destra Po compresi tra lo Scrivia e il Panaro (cfr. Brath e Franchini, 1999), ha infine condotto ad una leggera modifica nella suddivisione delle 2 SZO omogenee individuate sul versante adriatico ed alla delimitazione di 3 ulteriori SZO nel territorio di competenza dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma.

L'intero territorio d'indagine risulta pertanto suddiviso in 7 SZO omogenee nei confronti delle precipitazioni intense, le cui curve di crescita, che determinano in maniera univoca la relazione fra periodo di ritorno  $T$  e valore del coefficiente probabilistico di crescita  $K_T$ , risultano completamente definite dai parametri riportati nella seguente Tabella 4-1.

Sottozona	$\Lambda^*$	$\Theta^*$	$\Lambda_1$	$\eta$
A	0.109	2.361	24.700	4.001
B	1.528	1.558	39.200	5.335
C	1.528	1.558	25.700	4.913
D	0.361	2.363	29.000	4.634
E	0.044	3.607	30.450	4.135
F	0.144	2.042	33.030	4.321
G	0.221	3.322	30.780	4.628

Tabella 4-1- Parametri della distribuzione di probabilità dei massimi annuali delle piogge giornaliere nelle 7 SZO

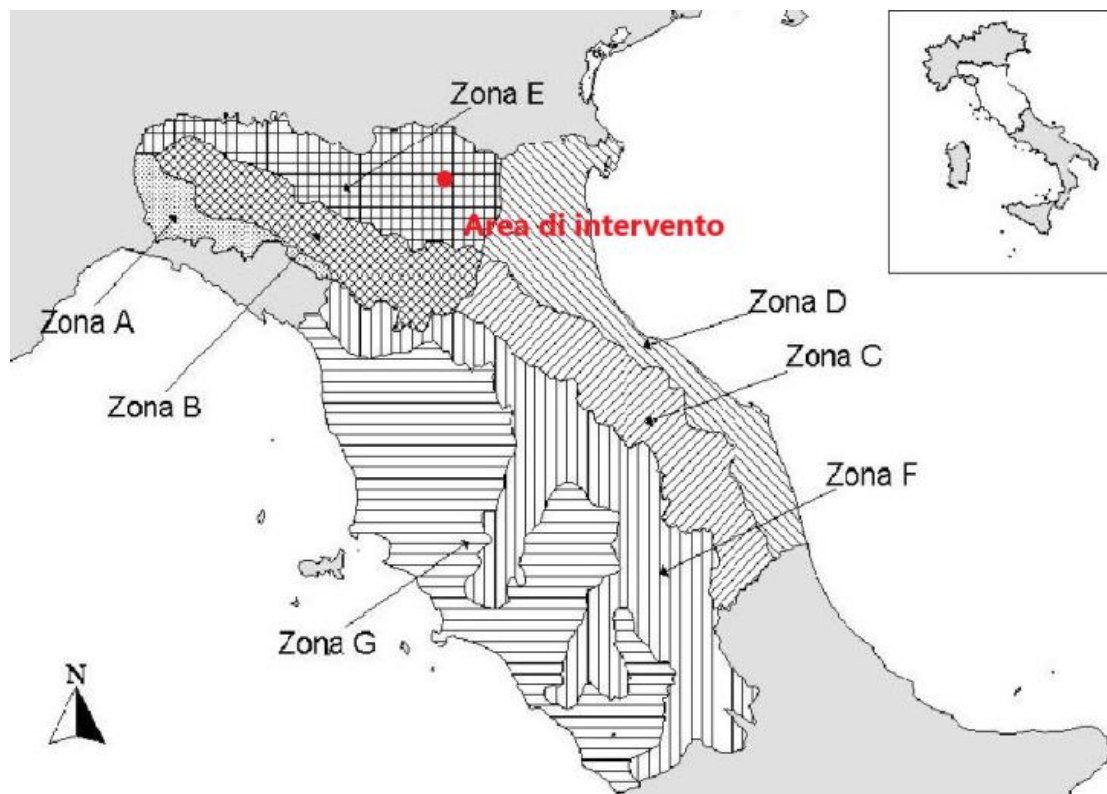


Figura 4-1- Suddivisione in sottozone pluviometriche omogenee

I corrispondenti valori del fattore di crescita  $K_T$ , per diversi tempi di ritorno, sono invece riportati nella seguente tabella:

Sottozona	T (anni)										
	2	5	10	20	25	40	50	100	200	500	1000
SZO A	0.93	1.24	1.46	1.70	1.78	1.95	2.04	2.34	2.68	3.18	3.57
SZO B	1.01	1.30	1.51	1.71	1.77	1.90	1.97	2.17	2.37	2.63	2.83
SZO C	1.01	1.33	1.55	1.77	1.84	1.98	2.05	2.27	2.48	2.77	2.99
SZO D	0.87	1.19	1.44	1.72	1.82	2.02	2.13	2.45	2.79	3.23	3.57
SZO E	0.93	1.22	1.43	1.64	1.72	1.89	1.98	2.32	2.78	3.53	4.13
SZO F	0.93	1.23	1.43	1.65	1.72	1.87	1.95	2.20	2.47	2.86	3.17
SZO G	0.88	1.22	1.50	1.87	2.01	2.32	2.47	2.96	3.46	4.12	4.61

Tabella 4-2- Valori del coefficiente probabilistico di crescita  $K_T$  per le piogge giornaliere

Per ottenere il valore della precipitazione indice di durata  $d$  cui fare riferimento per calcolare il valore della precipitazione di assegnata durata e tempo di ritorno per la regione in esame si utilizza una formulazione analoga alla classica curva di possibilità climatica del tipo:

$$m(h_d) = m(h_1) \cdot d^n$$

con

$$n = \frac{\ln[m(h_g)] - \ln[m(h_1)] - \ln r}{\ln 24}$$

in cui:

- $m(h_d)$  rappresenta la media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione di durata  $d$  (ore);
- $m(h_g)$  identifica la media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione giornaliera;
- $m(h_1)$  è la media del massimo annuale dell'altezza puntuale di precipitazione in 1 ora;
- $r$  esprime il rapporto  $m(h_g) / m(h_{24})$ , pari a 0.89 nella regione di studio.

La definizione dei valori dei parametri  $m(h_g)$  e  $m(h_1)$  della precedente equazione viene effettuata mediante le mappe isoparametriche del territorio d'indagine (Brath et al., 1998 - Brath e Franchini, 1999):





Figura 4-2- Iso linee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di un giorno  $m(h_9)$

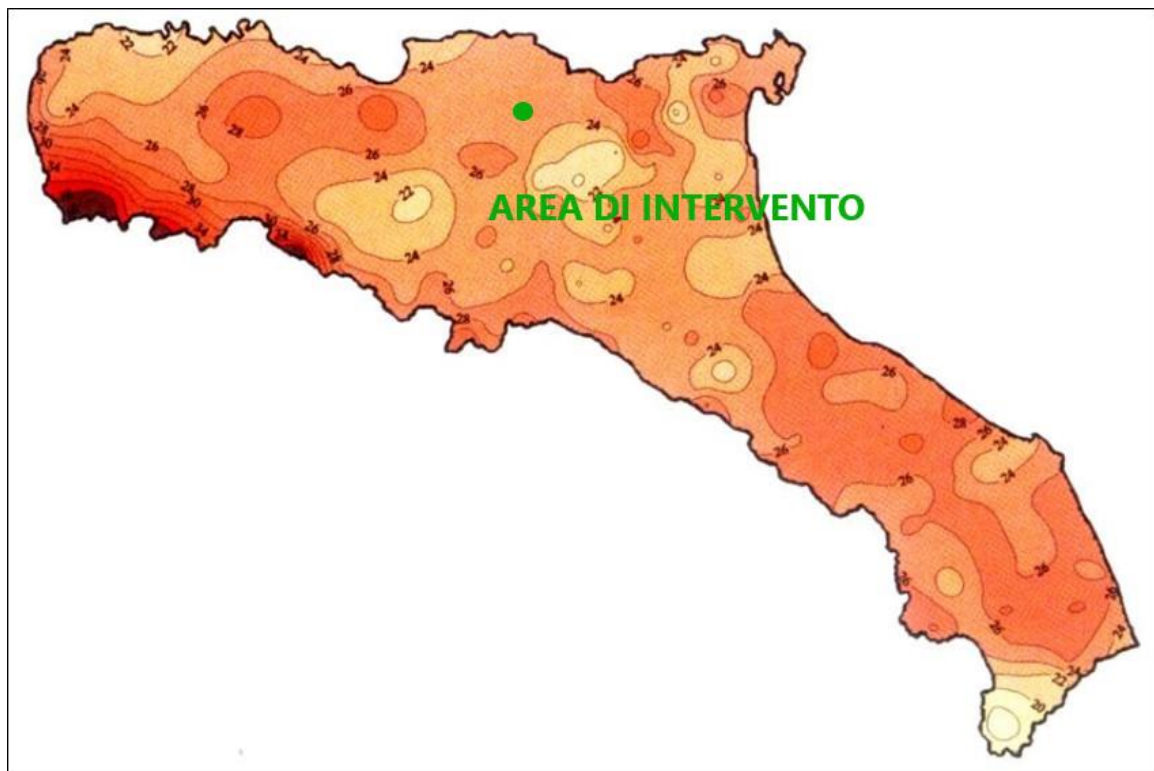


Figura 4-3- Iso linee delle altezze medie di pioggia massime annuali della durata di un'ora  $m(h_1)$

Nel caso in esame sono stati adottati i seguenti parametri  $m(h_g)$  e  $m(h_1)$  per il calcolo della pioggia indice  $m(h_d)$ :

<b>PARAMENTRI PIOGGIA INDICE</b>		
$m(h_g)$	$m(h_1)$	$n$
52	25	0.267

Tabella 4-3- Valore dei parametri adottati

Applicando pertanto la procedura VAPI sono stati ottenuti i seguenti risultati, riportati in forma numerica in Tabella 4-4 e in forma grafica in Figura 4-4:

t (ore)	$h_{T2}$ (mm)	$h_{T5}$ (mm)	$h_{T10}$ (mm)	$h_{T20}$ (mm)	$h_{T25}$ (mm)	$h_{T40}$ (mm)	$h_{T50}$ (mm)	$h_{T100}$ (mm)	$h_{T200}$ (mm)	$h_{T500}$ (mm)	$h_{T1000}$ (mm)
1	22.8	31.9	38.3	45.0	47.3	49.3	52.6	55.4	65.9	80.2	90.1
3	30.9	41.8	49.5	57.6	60.4	62.8	66.8	70.2	82.9	100.1	112.0
6	37.3	49.9	58.7	68.0	71.2	74.0	78.6	82.5	97.0	116.7	130.5
12	45.1	59.3	69.3	79.8	83.4	86.5	91.7	96.1	112.5	134.8	150.4
24	54.3	71.4	83.4	96.0	100.4	104.1	110.4	115.7	135.4	162.3	181.0

Tabella 4-4 - Calcolo altezze di pioggia al III livello di regionalizzazione

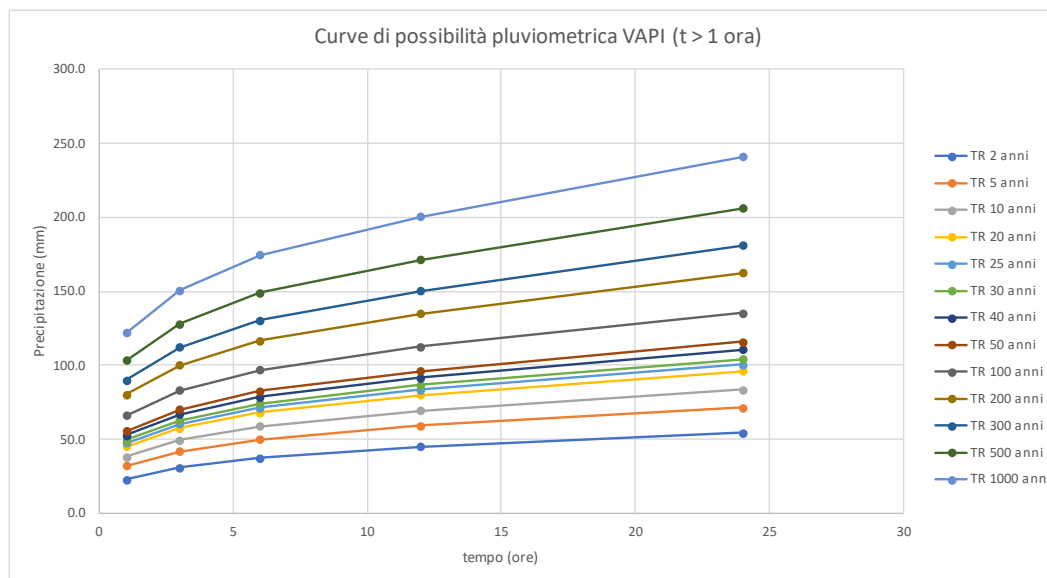


Figura 4-4 - Curve di possibilità pluviometrica per l'area di studio per  $t > 1$  ora

Nella seguente tabella sono riassunti i parametri delle curve di possibilità pluviometrica:

<b>Parametri CPP</b>		
<b>TR anni</b>	<b>a</b>	<b>n</b>
2	22.83	0.23
5	31.75	0.23
10	38.04	0.23

Parametri CPP		
<b>TR</b> <b>anni</b>	<b>a</b>	<b>n</b>
20	44.64	0.23
25	46.93	0.23
30	48.88	0.23
40	52.15	0.23
50	54.91	0.23
100	65.24	0.23
200	79.26	0.23
300	89.04	0.23
500	102.18	0.23
1000	120.50	0.23

Tabella 4-5- Parametri delle curve di possibilità pluviometrica per t>1 ora

Al fine di determinare i parametri delle curve di possibilità pluviometrica per eventi di durata inferiore all'ora è stata utilizzata la formula di Bell:

$$\frac{h_{t,T}}{h_{60,T}} = 0.54 \cdot t^{0.25} - 0.50$$

nella seguente tabella vengono riportati i parametri delle curve di possibilità pluviometrica per piogge di durata minore di un'ora.

Parametri CPP		
<b>TR</b> <b>anni</b>	<b>a</b>	<b>n</b>
2.00	23.76	0.47
5.00	33.23	0.47
10.00	39.90	0.47
20.00	46.90	0.47
25.00	49.31	0.47
30.00	51.38	0.47
40.00	54.86	0.47
50.00	57.78	0.47
100.00	68.73	0.47
200.00	83.60	0.47
300.00	93.96	0.47
500.00	107.89	0.47
1000.00	127.31	0.47

Tabella 4-6- Parametri delle curve di possibilità pluviometrica per t<1 ora

Di seguito sono riportate le curve di possibilità pluviometrica per piogge di durata minore ad un'ora:

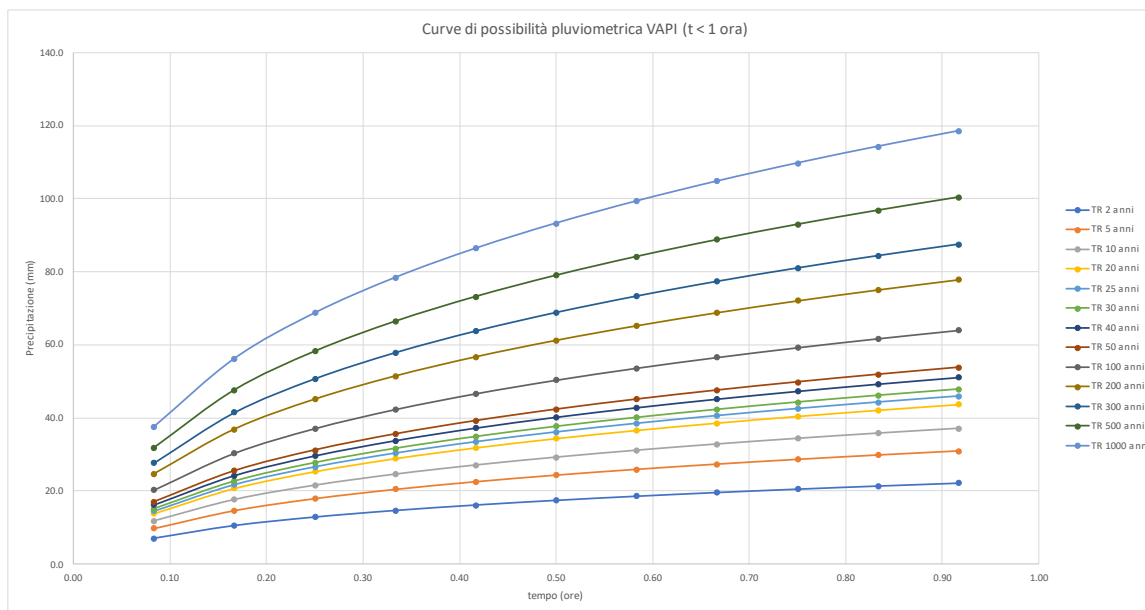


Figura 4-5- Curve di possibilità pluviometrica per l'area di studio per t<1 ora

#### 4.6. Definizione dei lineamenti morfologici

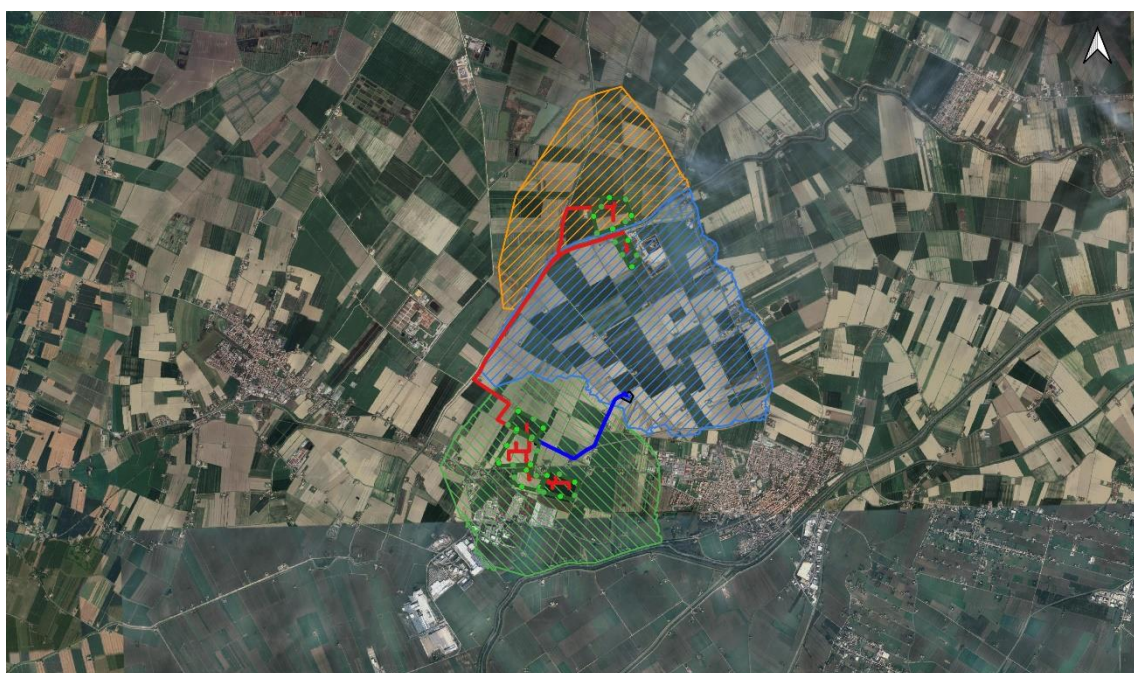
La definizione dei lineamenti morfologici dei bacini idrografici dell'area di studio è stata effettuata in ambiente GIS utilizzando l'informazione altimetrica (DTM 1.0m x 1.0m in formato GeoTiff) acquisita attraverso il portale del MASE.

Nella seguente tabella sono riportate le caratteristiche morfologiche individuate per il bacino di studio:

**Caratteristiche morfologiche**

Bacino	Area	Lunghezza asta	Z <sub>MAX</sub>	Z <sub>MIN</sub>	Z <sub>MED</sub>	i <sub>MED</sub>
n.	km <sup>2</sup>	km	m s.l.m.	m s.l.m.	m s.l.m.	m/m
NORD_1	3.40	3.00	8.12	7.27	7.70	0.015
NORD_2	7.18	2.99	10.1	8.4	9.25	0.015
SUD	5.54	3.17	11.74	9.12	10.43	0.015

Tabella 4-7- Lineamenti morfologici dei bacini di studio



Legenda					
	Delimitazione aree impianto		Sottostazione elettrica di trasformazione		Bacino area SUD
	Elettrodotto MT interrato da realizzare		Bacini area NORD		NORD_1
	Elettrodotto AT interrato da realizzare		NORD_2		
	Stazione elettrica di Terna S.p.A.				

Figura 4-6 - Bacino idrografico di riferimento

## 5. Determinazione delle portate di massima piena

### 5.1. Calcolo del tempo di corrivazione

Il tempo di corrivazione, parametro chiave quando si fa riferimento a metodi analitici di tipo semplificato, è definito come il tempo impiegato dalla particella d'acqua idraulicamente più lontana a percorrere l'intero bacino fino alla sezione di chiusura.

Per procedere al calcolo dei valori di portata di piena, corrispondenti ad assegnati tempi di ritorno si è proceduto alla definizione del tempo di corrivazione per ciascuno dei bacini considerati mediante le formulazioni più utilizzate in questo tipo di studi.

Una relazione frequentemente utilizzata per tale calcolo è la formula di *Giandotti* (1934) che tiene conto della morfologia del bacino:

$$t_c = \frac{(4 \cdot \sqrt{S} + 1.5 \cdot L)}{0.8 \cdot \sqrt{(H_m - H_0)}}$$

dove

- $A$  rappresenta area del bacino sottesa alla sezione di calcolo [km<sup>2</sup>];
- $L$  identifica lunghezza dell'asta principale del corso d'acqua principale [km];

- $H_m$  è quota media del bacino [m s.l.m.];
- $H_o$  è quota della sezione di chiusura [m s.l.m.].

La formula di Giandotti ha il pregio, rispetto ad altre relazioni, di comprendere nei parametri utilizzati per il calcolo del tempo di corrivazione diverse caratteristiche dei bacini analizzati. Questo garantisce una ricostruzione dei tempi di corrivazione basata sui principali parametri dei medesimi.

Un'altra equazione spesso utilizzata per la stima del tempo di corrivazione è quella di *Ventura* (1905). La relazione ha la seguente espressione:

$$t_c = 0,1272 \cdot \sqrt{\frac{A}{i_m}}$$

dove  $i_m$  è la pendenza media della rete di drenaggio ed  $A$  la superficie del bacino.

Nell'ambito del presente studio è stata utilizzata anche la formula di *Pezzoli*, sviluppata sui dati di piccoli bacini montani di dimensioni inferiori ai 20 km<sup>2</sup>

$$t_c = 0,055 \cdot \frac{L}{\sqrt{i_m}}$$

Inoltre, un'altra formulazione è quella di *Kirpich* che ha la seguente espressione:

$$t_c = 0.000325 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385}$$

dove:

- $t_c$  rappresenta il tempo di corrivazione (h)
- $L$  è la lunghezza dell'asta principale (m)
- $S$  è la pendenza media del bacino

Infine, è stata applicata anche la formulazione di *Viparelli*, che ipotizza una velocità media di deflusso lungo l'asta principale  $L$  pari a 1.5 m/s:

$$t_c = \frac{L}{V}$$

La seguente tabella riporta il valore del tempo di corrivazione  $t_c$  utilizzando le differenti formulazioni.

Bacino	T <sub>c</sub> Giandotti	T <sub>c</sub> Kirpich	T <sub>c</sub> Pezzoli	T <sub>c</sub> Viparelli	T <sub>c</sub> Ventura	T <sub>c</sub> medio
n.	[ore]	[ore]	[ore]	[ore]	[ore]	[ore]
NORD_1	5.35	3.54	1.35	1.13	1.91	2.66
NORD_2	6.25	2.70	1.34	2.40	2.78	3.09
SUD	5.49	2.45	1.43	1.75	2.44	2.71

Tabella 5-1- Valori del tempo di corrivazione

## 5.2. Il metodo cinematico o razionale

La stima delle portate, corrispondente ad un assegnato tempo di ritorno considerato, è stata effettuata mediante l'applicazione della formula razionale, il cui approccio si basa sull'utilizzo della curva di possibilità pluviometrica e sull'assunto che, a parità di tempo di ritorno, la portata al colmo maggiore è prodotta dall'evento la cui durata è identica al tempo di corrivazione  $t_c$ .

La schematizzazione alla base del metodo si basa sulle seguenti tre ipotesi fondamentali:

- la pioggia critica ha durata pari al tempo di corrivazione;
- la precipitazione si suppone di intensità costante per tutta la durata dell'evento;
- il tempo di ritorno della portata è pari a quello della pioggia critica.

La portata di piena, in funzione del tempo di ritorno, è pari a:

$$Q = \frac{\varphi \cdot i_c \cdot A}{3.6}$$

dove

- $\varphi$  rappresenta il coefficiente di deflusso, rapporto tra i deflussi e gli afflussi [ad]
- $i_c$  è l'intensità di pioggia di un evento avente durata  $d$  pari a  $t_c$  [mm/ora]
- $A$  è la superficie del bacino (o area scolante) [Km<sup>2</sup>]
- $Q$  è la portata al colmo di piena che defluisce alla sezione di chiusura in corrispondenza di un evento di durata  $t_c$  e tempo di ritorno  $T$  [m<sup>3</sup>/s].

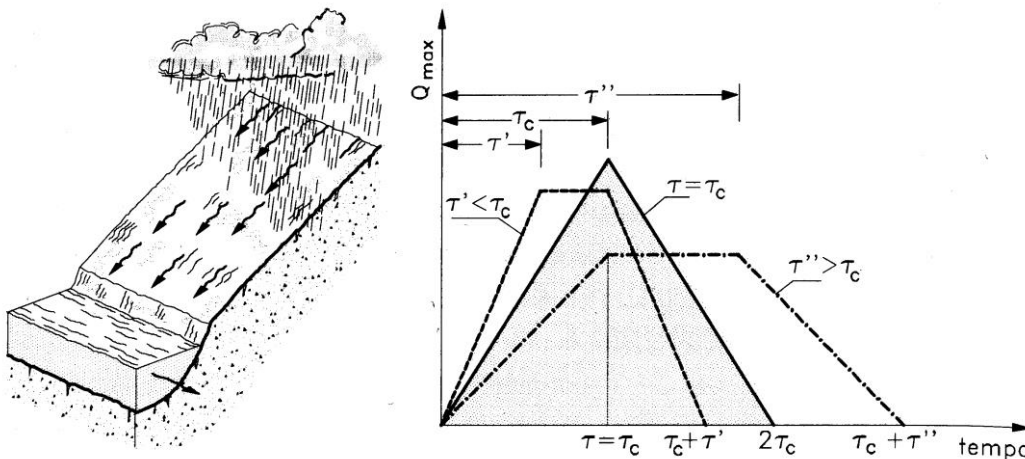


Figura 5-1 - Metodo cinematico: schema del bacino e idrogramma di piena per differenti durate di precipitazione

Il valore di  $i_c$  rappresenta l'altezza di precipitazione che cade in un dato sito in un tempo uguale al tempo di corrivazione  $t_c$ : infatti se la durata della precipitazione è inferiore al tempo  $t_c$  solo una parte del bacino  $A$  contribuirà alla formazione della portata, che risulterà pertanto di minore entità. Viceversa, se la durata dell'evento è maggiore, l'intensità della pioggia sarà minore e quindi meno intenso il colmo di piena.

Nella Figura 5-1 è riportato uno schema del funzionamento del modello cinematico con tre precipitazioni di diversa durata (minore, uguale e maggiore rispetto al tempo di corrivazione).

Si noti come per un tempo di pioggia pari a quella di corrivazione l'idrogramma di piena assuma la forma triangolare.

### 5.3. Coefficiente di deflusso

Per la determinazione del coefficiente di deflusso si è fatto riferimento alla monografia "La sistemazione dei bacini montani" di Vito Ferro. Per il caso in esame sono stati utilizzati i coefficienti indicati nella summenzionata pubblicazione e riportati in Tabella 5-2.

Tali coefficienti sono stati applicati alle classi della carta dell'uso del suolo e della carta dei sistemi di terre per l'area di studio, come mostrato in Figura 5-2.

Detto  $\varphi_i$  il coefficiente di deflusso relativo alla superficie  $A_i$ , il valore medio del coefficiente relativo ad aree caratterizzate da differenti valori di  $\varphi$  si ottiene con una media ponderata:

$$\varphi = \frac{\sum \varphi_i \cdot A_i}{\sum A_i}$$

Tipi di suolo	Copertura bacino		
	Coltivi	Pascoli	Boschi
Suoli molto permeabili sabbiosi o ghiaiosi	0.20	0.15	0.10
Suoli mediamente permeabili (senza strati di argilla). Terreni di medio impasto o simili	0.40	0.35	0.30
Suoli poco permeabili, suoli fortemente argillosi o simili, con strati di argilla vicino alla superficie. Suoli poco profondi sopra roccia impermeabile.	0.50	0.45	0.40

Tabella 5-2 - Coefficienti di deflusso da letteratura



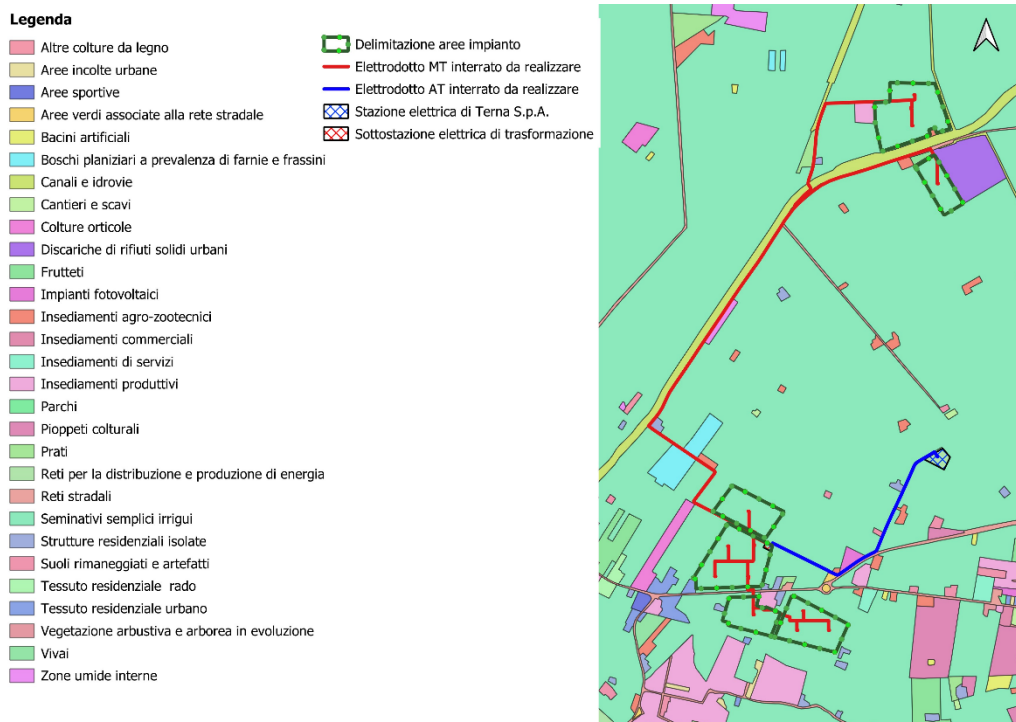


Figura 5-2 - Copertura e uso del suolo Regione Emilia-Romagna nell'area di studio

Nel caso in esame si è scelto un valore del coefficiente di deflusso  $\phi$  pari a 0.6.

### 5.4. Risultati dell'applicazione del metodo razionale

La seguente tabella riporta il valore della portata di picco, calcolata mediante l'applicazione del metodo razionale, per diversi valori del tempo di ritorno.

TR anni	NORD_1		NORD_2		SUD	
	$i_{t,TR}$ mm/h	$Q_{P,TR}$ m <sup>3</sup> /s	$i_{t,TR}$ mm/h	$Q_{P,TR}$ m <sup>3</sup> /s	$i_{t,TR}$ mm/h	$Q_{P,TR}$ m <sup>3</sup> /s
2	10.79	6.12	9.60	11.49	10.63	9.82
5	15.00	8.51	13.35	15.98	14.78	13.65
10	17.97	10.19	15.99	19.15	17.70	16.35
20	21.09	11.96	18.77	22.47	20.78	19.19
25	22.17	12.57	19.73	23.62	21.84	20.17
30	23.09	13.09	20.55	24.60	22.75	21.01
40	24.64	13.97	21.92	26.25	24.27	22.42
50	25.94	14.71	23.08	27.64	25.55	23.61
100	30.82	17.48	27.42	32.83	30.36	28.05
200	37.45	21.23	33.32	39.89	36.89	34.08
300	42.07	23.85	37.43	44.82	41.44	38.28
500	48.28	27.37	42.95	51.43	47.55	43.93
1000	56.93	32.28	50.65	60.65	56.08	51.81

Tabella 5-3- Risultati del calcolo della portata di picco

Nelle successive figure vengono riportati i corrispondenti idrogrammi di piena:

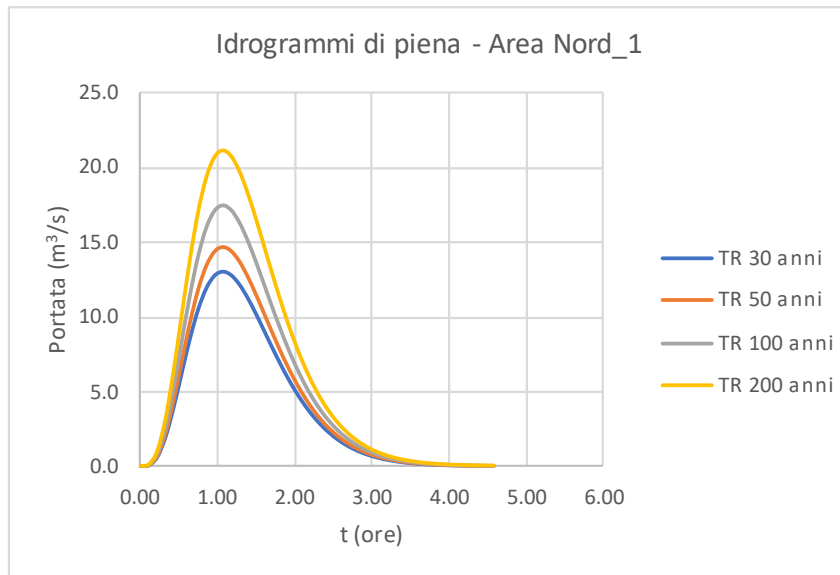


Figura 5-3- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Nord\_1

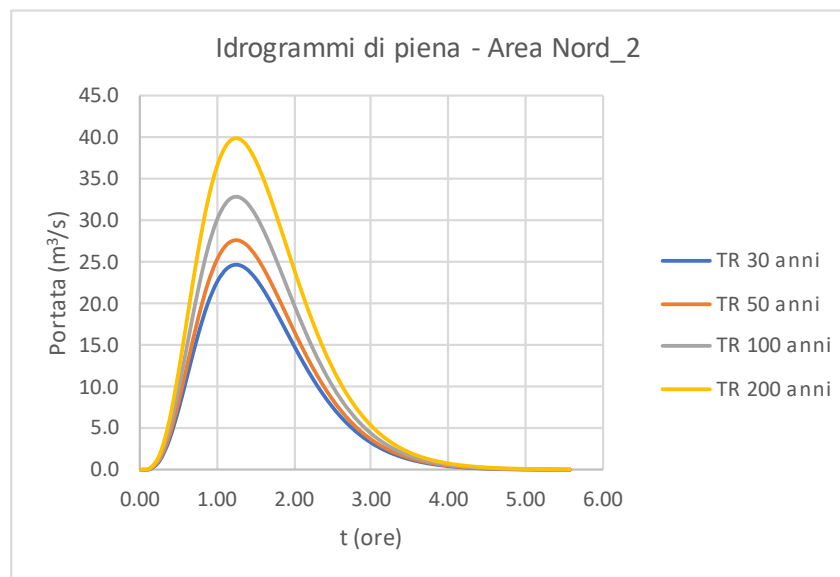


Figura 5-4- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Nord\_2

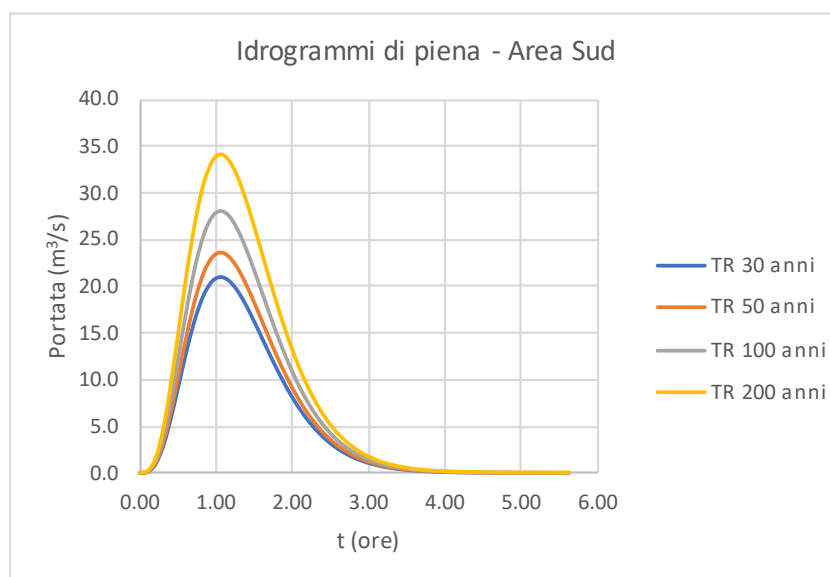


Figura 5-5- Idrogramma di piena definiti mediante applicazione del metodo razionale- Area Sud

## 6. Verifiche idrauliche

Nei paragrafi a seguire verranno mostrate le fasi e le scelte progettuali delle modellazioni idrauliche in moto permanente bidimensionale effettuate per i tratti d'asta dei bacini oggetto di studio, per la definizione dei profili di corrente, durante il passaggio delle piene di progetto con tempi di ritorno 30 e 50 anni.

### 6.1. Scelta del tempo di ritorno

I tempi di ritorno adottato nelle verifiche idrauliche è pari a *30 e 50 anni* poiché facendo riferimento al PGRA, del Reticolo Secondario di Pianura (RSP), L'area di progetto dell'"Area nord" è localizzata interamente nelle aree "**H-P3 – alta probabilità**" mentre l'"Area sud" ricade maggiormente nelle aree "**M-P2 – media probabilità**" e in minima parte in nelle aree "**H-P3 – alta probabilità**", nei tratti del reticolo prossimi all'area di progetto.

### 6.2. Descrizione del modello HEC RAS

#### 6.2.1. Capacità di calcolo

Il modello di simulazione HEC-RAS (River Analysis System) è un codice numerico inizialmente sviluppato dall'US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, di Davis (USA) per lo studio idrodinamico nelle reti di canali aperti, attraverso la ricostruzione dei profili idraulici di moto permanente in

regime subcritico e supercritico, operando nell'ipotesi di monodimensionalità del flusso (1D) e di invariabilità della geometria dell'alveo (fondo fisso). Fino alla versione 2.x HEC-RAS rappresentava l'evoluzione del noto modello HEC-2 (HEC 1991) con l'aggiunta di numerose funzioni e strumenti di analisi nonché di una completa interfaccia grafica operante in ambiente Windows. In seguito, a partire dalla versione 3.0, il codice è stato integrato incorporando gli algoritmi del modello idraulico UNET "One-Dimensional Unsteady Flow Through a Full Network of Open Channels" (Barkau 1992 and HEC 1997) che consentono di simulare il comportamento della corrente in moto vario per il solo regime subcritico. L'integrazione dei due modelli è avvenuta previa realizzazione di una particolare versione del modello UNET capace di condividere i medesimi algoritmi di analisi delle strutture idrauliche presenti nella libreria di HEC-RAS. Successivamente, il modello UNET è stato sostituito da un nuovo modello di simulazione a moto vario capace di una maggiore stabilità numerica e utilizzabile in correnti supercritiche. L'algoritmo si è rilevato essere sufficientemente stabile anche per simulare la propagazione di piene artificiali causate dal cedimento di sbarramenti o brusche manovre di apertura degli scarichi (Dam Break).

Con la diffusione della versione 4.X, il modello assumeva la capacità di lavorare anche nell'ipotesi di fondo mobile in condizioni quasi stazionarie, mantenendo sempre l'ipotesi di monodimensionalità del moto.

Con la versione 5.x pubblicata nell'aprile 2016 (HEC 2016 a, HEC 2016 b), il modello è stato integrato con un codice numerico per simulare i fenomeni propagatori nell'ipotesi bidimensionale del moto e con un ambiente grafico specifico per elaborare dati plano-altimetrici di tipo spaziale.

Le simulazioni idrauliche nel presente elaborato sono state effettuate utilizzando la versione HEC-RAS 6.5.

Attualmente il modello costituisce un sistema integrato per l'analisi idraulica di:

- **elaborazioni 1D:** propagazione in reti di canali a maglie aperte e chiuse, operante in regime di moto permanente e vario, a fondo fisso e mobile, con presenza di ponti e di manufatti di regolazione fissi o dotati di dispositivi mobili;
- **elaborazioni 2D:** propagazione in canali o aree aperte discretizzati da una o più griglie di calcolo interconnesse costituite da elementi poligonali associate ad un modello digitale del terreno, in regime di moto vario e nell'ipotesi di fondo fisso;
- **elaborazioni accoppiate 1D-2D:** simulazione in reti 1D accoppiate, ma non sovrapposte, a griglie di calcolo 2D, in regime di moto vario e nell'ipotesi di fondo fisso.

L'ambiente grafico organizza le informazioni topografiche relative agli alvei, alla geometria dei manufatti idraulici e di attraversamento, ai piani di esondazione 2D, in modo da combinarle all'occorrenza per realizzare simulazioni accoppiate.

Tralasciando i concetti alla base del modello utilizzato in ambito 1D, per i quali si rimanda alla relazione specifica, ci si sofferma sui principi di impostazione del problema matematico e sulla tecnica di risoluzione del modello applicato in regime 2D.

### 6.2.2. Algoritmi disponibili per simulazioni nel campo 2D

Per la descrizione rigorosa del moto dei fluidi nello spazio è necessario ricorrere alle equazioni di Navier-Stokes la cui risoluzione risulta piuttosto complessa. Tuttavia, nel caso di analisi idrauliche in ambito fluviale dove il moto avviene entro canali o in aree di esondazione golenali, possono essere adottate alcune ipotesi che semplificano la loro risoluzione.

Oltre alle ipotesi di fluido incompressibile e densità uniforme, è infatti ragionevole assumere che le distanze lungo la direzione verticale siano molto inferiori rispetto a quelle sul piano, che la componente verticale della velocità sia abbastanza piccola da poter essere trascurata e che la distribuzione delle pressioni lungo la verticale sia approssimabile a quella idrostatica. Sotto queste ipotesi, la risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes porta alla teoria del flusso bidimensionale in acque basse (SW, Shallow Water).

Nel caso di flussi in acque basse, la gravità e le forze di attrito tra acqua e fondo canale sono i termini di gran lunga dominanti e anche le forze dovute alla non stazionarietà del moto e alla viscosità turbolenta possono essere trascurate. L'equazione del momento della quantità di moto può allora essere riscritta in termini ancora più semplificati dando luogo all'equazione dell'Onda Diffusiva. Combinando questa con il principio di conservazione della massa, si giunge ad un'unica equazione nota come teoria dell'onda diffusiva in acque basse (DSW, Diffusion Shallow Water).

Il codice di calcolo HEC-RAS 2D è in grado di risolvere le equazioni del moto dei fluidi operando sia sotto le ipotesi della teoria SW, sia in quella semplificata DSW.

Per quanto riguarda la valutazione degli effetti dovuti alle turbolenze, tenute in considerazione solo nel caso si utilizzi la teoria SW, HEC-RAS 2D utilizza il metodo delle medie di Reynolds (RANS: Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations), una delle tecniche più utilizzate nei modelli di questo tipo, che richiede la conoscenza del coefficiente di viscosità turbolenta (eddy viscosity).

Un'altra particolarità del modello riguarda la tecnica di discretizzazione del dominio di calcolo che avviene facendo uso di due griglie sovrapposte. L'idea alla base di questo approccio è quella di utilizzare una "griglia di calcolo" (mesh) a risoluzione relativamente bassa, al fine di ridurre il numero di equazioni e minimizzare i tempi di calcolo, e una "sotto-griglia topografica" di maggiore risoluzione, per non perdere accuratezza nella definizione della componente topografica o batimetrica (Casulli 2008). Questa tecnica è stata elaborata nella considerazione che le moderne tecnologie di rilievo topografico mettono a disposizione modelli digitali del terreno di risoluzione così elevata che i calcolatori non riescono a sfruttare pienamente

per l'eccessivo numero di equazioni che deriverebbe da una mesh di pari risoluzione. Con il metodo proposto da Casulli, l'elevato dettaglio fornito dall'uso della sotto griglia topografica viene utilizzato per rappresentare con precisione il volume contenuto nella cella (associato al suo centroide) e i parametri di trasporto (associati ai lati della cella) che determinano il cinematismo del fenomeno di propagazione del fluido. L'equazione di conservazione della massa è discretizzata con la tecnica dei volumi finiti.

Questa tecnica può essere utilizzata indipendentemente dal tipo di equazioni impiegate per descrivere il momento della quantità di moto (SW o DSW). Nella documentazione allegata alla pubblicazione del modello (HEC 2016 a, HEC 2016 b) vengono riportati i dettagli teorici su come il modello impone e risolve le equazioni del moto.

### 6.2.3. Modello concettuale per simulazioni nel campo 2D

Il ruolo assunto dalla sotto-griglia topografica può essere meglio compreso considerando la tecnica numerica di risoluzione dell'equazione differenziale che esprime il bilancio della massa nel tempo. Assumendo il fluido incompressibile, tale bilancio può essere espresso dall'equazione differenziale:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

dove  $t$  è la variabile temporale,  $u$  e  $v$  sono le componenti della velocità lungo le direzioni  $x$  e  $y$ ,  $q$  è il termine che esprime la portata entrante/uscente dalla regione spaziale considerata.

Con il termine  $q$  si vuole considerare ogni contributo di massa esterno (entrante o uscente) in modo da poter rappresentare i contributi della precipitazione, le infiltrazioni, i sistemi di pompaggio, e ogni altra particolare apporto o sottrazione di massa.

Indichiamo con  $\Omega$  lo spazio volumetrico (tridimensionale) occupato dal fluido, con  $S$  la superficie del contorno, con  $V(u, v)$  il vettore della velocità e con  $n$  il valore della componente normale a  $S$  del vettore unitario della velocità, in modo che  $V \cdot n$  indichi la componente di  $V$  normale a  $S$ .

Integrando l'equazione lungo la superficie  $S$  l'equazione di continuità, ricorrendo al teorema della Divergenza di Gauss, si ottiene:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS + Q = 0$$

Nella scrittura di questo integrale si è assunto che il termine  $Q$  rappresenta qualsiasi flusso transitante attraverso la faccia inferiore (batimetria) e superiore (superficie libera) della cella. Per convenzione, i volumi in uscita sono di segno positivo, quelli in ingresso sono negativi.

L'integrale dell'equazione di continuità scritto in questa forma ben si presta ad essere utilizzato in sinergia con la sotto-griglia topografica, come descritto nel prossimo capitolo. In questo contesto, la regione spaziale  $\Omega$  viene rappresentata dalla cella di volume finito e l'integrale viene computato utilizzando le informazioni ricavate dalla dettagliata sotto-griglia topografica.

#### 6.2.4. Equazione della conservazione della quantità di moto

Come accennato sopra, nel caso in cui lo sviluppo verticale del campo di moti sia di molto inferiore a quello orizzontale, le equazioni di Navier-Stokes possono essere scritte nelle ipotesi semplificate che danno origine all'equazione SW (Shallow Water).

L'equazione che esprime la conservazione della quantità di moto può essere scritta in termini medi sulla verticale. Le componenti della velocità lungo la verticale possono essere trascurate così come le derivate lungo tale direzione degli altri termini. Le equazioni SW sono così scritte:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità  $\nu_t$  è il coefficiente di viscosità turbolenta in direzione orizzontale,  $c_f$  è il coefficiente di attrito sul fondo,  $R$  è il raggio idraulico e  $f$  è il parametro di Coriolis.

I termini a sinistra rappresentano le accelerazioni mentre i termini a destra rappresentano le forze, interne ed esterne, che agiscono sul fluido. I due membri delle equazioni sono rapportati tra loro secondo la Legge di Newton.

Su come vengono calcolati i singoli termini delle equazioni si rimanda alla documentazione del modello (HEC 2016). Ci si sofferma sul calcolo dell'attrito tra fluido sul fondo che, specie per bassi valori del tirante idraulico, risulta quello maggiormente influente sul risultato. HEC RAS 2D calcola tale termine utilizzando la formulazione di Chézy:

$$c_f = \frac{g|V|}{C^2 R}$$

dove  $C$  è il coefficiente di Chézy.

Si noti che il coefficiente di Chézy non è adimensionale bensì è espresso in  $m^{1/2}/s$  nel Sistema Internazionale (S.I.) e in  $ft^{1/2}/s$  nel Sistema Anglosassone (U.S.).

Risultati ottenuti per via empirica dimostrano che il coefficiente di Chézy può essere espresso mediante la correlazione con la nota formula di Gauckler-Strickler-Manning's:

$$C = R^{1/6}/n$$

dove  $n$  è il coefficiente di Manning's.

Il coefficiente  $n$  è adimensionale e il suo valore dipende dal sistema metrico utilizzato; pertanto l'utilizzo dell'equazione di Manning's nei due diversi sistemi di misura richiede l'uso della costante di conversione  $1.48592 \text{ (ft/m)}^{1/3}$ .

Il coefficiente di attrito tra il fluido e la superficie batimetrica può quindi essere calcolato sulla base del coefficiente di Manning's:

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{4/3}}$$

### 6.2.5. Approssimazione della teoria SW con il metodo dell'Onda Diffusiva

Come si è visto, apportando ulteriori ipotesi semplificative è possibile giungere alla formulazione di un'equazione di più semplice utilizzo. L'equazione dell'Onda Diffusiva può essere utilizzata al posto dell'equazione della conservazione della quantità di moto per dare origine a una versione approssimata del modello Shallow Water noto come Diffusion Shallow Water (DSW). Tale modello può essere utilizzato in particolari ambiti o per effettuare simulazioni preliminari. In altri ambiti il metodo può dare luogo a risultati eccessivamente approssimati del fenomeno reale.

L'equazione alla base di questa teoria viene ricavata dall'equazione della conservazione della quantità di moto eliminando i termini trascurabili e lasciando solo quelli che rappresentano le forze di attrito e quelle gravitazionali.

Si giunge alla seguente espressione:

$$\frac{n^2 |V| V}{(R(H))^{4/3}} = -\nabla H$$

dove  $V$  è il vettore velocità,  $R$  il raggio idraulico,  $\nabla H$  è il gradiente della quota idrometrica ed  $n$  è il coefficiente di Manning's.

L'equazione può essere scritta anche nella forma più nota:

$$V = \frac{-(R(H))^{2/3}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{1/2}}$$



### 6.2.6. Tecniche numeriche e stabilità numerica

I solutori numerici dei sistemi di equazioni alla base del modello utilizzano la tecnica di Crank-Nicolson (Fox, 1957; Gregory et al., 1988). anche nota come la tecnica dei trapezi. Il tipo di discretizzazione (differenze finite o volumi finiti). Nel caso delle equazioni DSW, le derivate temporali vengono discretizzate secondo la tecnica delle differenze finite le derivate spaziali vengono approssimate con una tecnica mista. Se la simulazione viene trattata con la teoria SW allora i termini dell'equazione di continuità sono sempre discretizzati con la tecnica dei volumi finiti mentre per l'equazione del momento il tipo di discretizzazione può variare. Per ulteriori dettagli sulle tecniche numeriche utilizzate si rimanda agli specifici documenti (Schenk et al., 2004; Schenk et al., 2006). Le tecniche numeriche si avvalgono delle librerie Intel PARDISO nella soluzione dei grandi sistemi di equazioni di tipo sparso al fine di trarre vantaggio dall'uso parallelo della memoria nei processi multi-thread (Schenk et al., 2011).

L'accuratezza di una simulazione dipende dalla scelta del passo temporale di calcolo che deve essere commisurato alla dimensione delle celle che compongono la mesh.

La dimensione della cella viene assegnata con l'obiettivo di cogliere in modo appropriato l'andamento plano-altimetrico del terreno tenendo conto dei tempi di elaborazione che ne conseguono.

Sulla scelta della dimensione della cella va tenuto conto del differente approccio utilizzato da HEC-RAS rispetto ai più comuni modelli idraulici che lavorano nel campo 2D. Nei modelli a griglia (grid based model) il terreno viene approssimato da celle ciascuna delle quali possiede un'unica quota del fondo. Nei modelli ad elementi finiti, il terreno è usualmente (ma non sempre) approssimato da elementi triangolari con quote diverse per ogni vertice e superficie di fondo approssimata con un piano passante per i suddetti vertici. HEC RAS utilizza un approccio differente. Gli elementi sono costituiti da poligoni la cui superficie del fondo assume il reale andamento altimetrico definito dall'accuratezza dell'informazione topografica disponibile. Se questa viene ottenuta da un rilievo di elevata precisione, anche gli elementi della mesh rappresenteranno in modo estremamente fedele l'andamento del terreno. La mesh di calcolo può essere costituita da celle quadrate (mesh strutturata) o poligonali (mesh non strutturata), di dimensione relativamente elevata rispetto a quelle utilizzate da altri modelli. Laddove vi sia bisogno di maggiore accuratezza a causa di una maggiore irregolarità del terreno, è possibile utilizzare elementi poligonali di dimensioni inferiori.

Una volta realizzata la mesh, è necessario stabilire un corretto passo temporale di calcolo, sulla base della dimensione degli elementi che costituiscono la mesh e della velocità della corrente.

E' anche necessario considerare che il modello dispone di due algoritmi di calcolo differenti:

- Diffusion Wave Equations;
- Full Momentum Equation (l'interfaccia grafica di HEC RAS 2D chiama in questo modo le equazioni di

Saint Venant attraverso le quali viene risolta l'equazione Shallow Water).

Utilizzando il primo algoritmo è possibile utilizzare passi temporali di calcolo maggiori di quelli utilizzati con il secondo.

Per ottenere un'indicazione di massima sul passo temporale di calcolo ( $\Delta t$ ) da adottare si può ricorrere alla regola di Courant. Nel caso di simulazioni condotte con l'algoritmo Full Momentum Equations, lo schema numerico risulterà stabile se:

$$C = \frac{V \Delta t}{\Delta X} \leq 1.0 \quad \text{e pertanto} \quad \Delta t \leq \frac{\Delta X}{V}$$

dove  $C$  è il numero di Courant,  $V$  è la celerità dell'onda,  $\Delta X$  è la dimensione della cella.

In alcuni casi il valore di  $C$  può arrivare anche fino a 3.0.

Nel caso di simulazioni condotte con l'algoritmo Diffusion Wave Equations, lo schema numerico risulterà stabile se si verifica almeno una delle seguenti condizioni:

$$C = \frac{V \Delta t}{\Delta X} \leq 2.0 \quad \text{e pertanto} \quad \Delta t \leq \frac{2 \Delta X}{V}$$

In alcuni casi il valore di  $C$  può arrivare anche fino a 5.0.

La stabilità numerica dipende anche dalle particolari condizioni al contorno assegnate e da altri fattori che non rientrano nella regola di Courant, pertanto, i limiti sopra esposti non devono essere considerati regola assoluta.

Nella pratica applicazione del modello il corretto passo temporale di calcolo viene ottenuto per tentativi osservando l'andamento e l'esito delle simulazioni al variare di  $\Delta t$ , evidenziando l'insorgenza di eventuali oscillazioni dei parametri idraulici e monitorando il tempo di calcolo complessivo.

### 6.2.7. La griglia di calcolo e la sotto-griglia topografica

Le moderne tecniche di rilievo topografico condotte con strumentazioni aviotrasportabili consentono di ottenere informazioni plano-altimetriche di elevatissima risoluzione. Talvolta la densità dell'informazione è così elevata da non poter essere sfruttata pienamente dai modelli numerici di simulazione idraulica. Si determina quindi una situazione in cui i modelli numerici, per non appesantire eccessivamente le elaborazioni, utilizzano griglie di calcolo di risoluzione relativamente bassa rispetto a quella disponibile e l'informazione topografica di alta risoluzione non viene sfruttata per migliorare la qualità dei risultati.

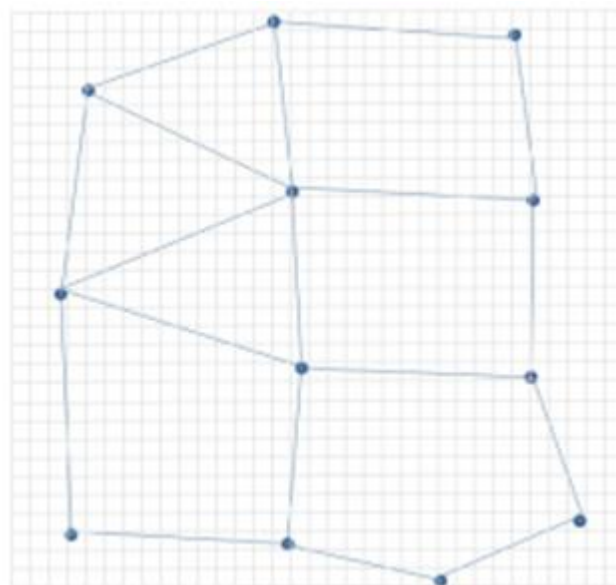


Figura 6-1 - Schema di discretizzazione a doppia griglia utilizzato dal modello HEC RAS 2D

Una soluzione a questo problema è stata proposta da Casulli (2008) che ha proposto uno schema basato sulla sovrapposizione di due griglie. La prima è la "griglia di calcolo" ovvero la mesh alla quale saranno associati i parametri idraulici che entreranno nelle equazioni da risolvere. Tanto maggiore è la risoluzione di questa griglia e tanto maggiore sarà il numero di equazioni da risolvere così come i tempi di calcolo. La seconda è la "sotto-griglia topografica" contenente la totalità delle informazioni topografiche che consente la definizione dettagliata delle proprietà geometriche degli elementi della mesh. Tali informazioni tuttavia non entreranno a far parte delle elaborazioni iterative per la risoluzione del sistema di equazioni. Nella Figura 6-1, la griglia topografica è rappresentata con sistema cartesiano in grigio mentre la griglia di calcolo ad elementi poligonali è disegnata in azzurro.

HEC RAS 2D applica questo approccio nel seguente modo: alle celle che compongono la griglia di calcolo vengono associate una serie di informazioni aggiuntive calcolate a partire dalla sotto-griglia topografica.

Il dettaglio topografico viene così condensato nella "tabella delle proprietà idrauliche" dove, al variare della quota idrometrica  $H$ , vengono memorizzati i parametri necessari per l'applicazione del principio di continuità.

La tabella viene associata agli elementi (facce e centroidi) che costituiscono la griglia di calcolo.

Operando in questo modo, anche se di risoluzione relativamente bassa, la griglia di calcolo utilizzata dal modello numerico contiene informazioni derivate dalla base topografica di dettaglio e l'applicazione del principio di continuità avverrà in modo estremamente accurato.

Ogni elemento della griglia di calcolo rappresenta la regione spaziale indicata con il simbolo  $\Omega$  nell'equazione di continuità. Il volume di ogni elemento è dato dall'integrale triplo. Assumendo che tale volume sia funzione della quota idrometrica  $H$  si ha:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega = \frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t}$$

dove l'indice  $n$  è il numero degli step di calcolo e  $\Delta t$  è la durata dello step di calcolo.

La seguente Figura 6-2 rappresenta il processo di associazione dell'informazione topografica alla faccia  $k$ -esima della cella poligonale e la ricostruzione, per punti, della funzione  $A_k(H)$  al variare della quota idrometrica  $H$ .

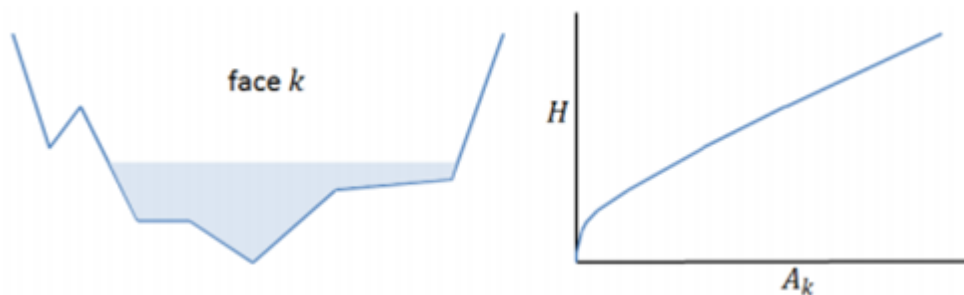


Figura 6-2 - Faccia della cella, informazione topografica e tabella delle proprietà

Con lo stesso procedimento si determina l'andamento di ogni generico parametro  $P_k(H)$  associato alla faccia  $k$ -esima e del valore del volume  $\Omega(H)$  associato al centroide della cella. Nella seguente tabella si riportano tutti i parametri calcolati in fase di pre-processamento e l'associazione faccia/centroide della cella.

- |  |             |
|--|-------------|
| ➤ Quota idrometrica – Volume               | → Centroide |
| ➤ Quota idrometrica – Area sezione bagnata | → Faccia    |
| ➤ Quota idrometrica – Perimetro bagnato    | → Faccia    |
| ➤ Quota idrometrica – Manning's n          | → Faccia    |

Si noti che nel caso di cella con volume nulla, le superfici liquide di tutte le facce sono nulle e il parametro velocità resta indefinito. La cella resterà asciutta per tutta la durata della simulazione. Per ovviare a questo inconveniente è necessario imporre alcune condizioni al calcolo del momento della quantità di moto. Con opportune considerazioni è possibile implementare la tecnica di risoluzione anche con celle inizialmente asciutte.

Lo schema di seguito proposto riassume il processo di costruzione dei parametri geometrici associati alla griglia di calcolo.

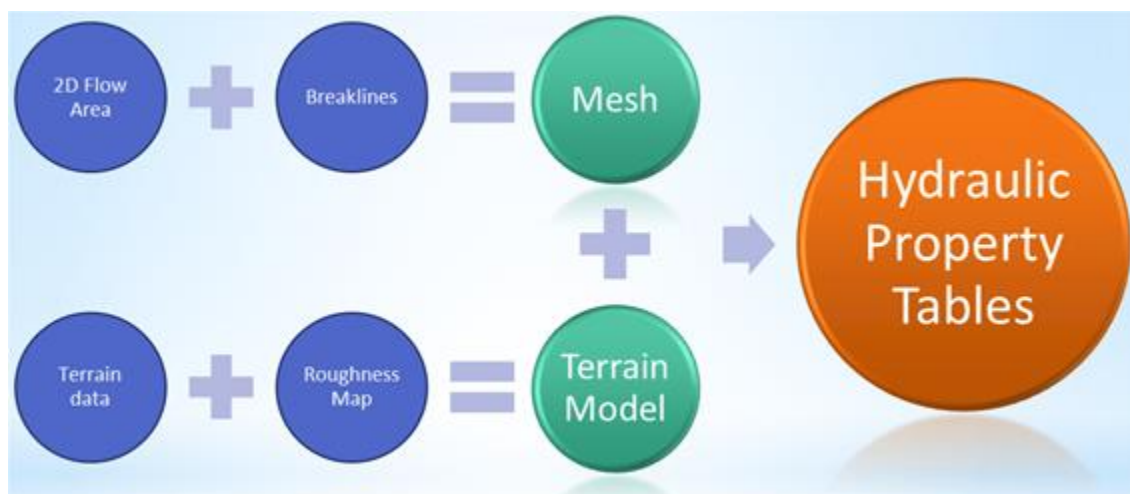


Figura 6-3 - Processo di costruzione della mesh, del modello del terreno e delle proprietà idrauliche associate ai lati e ai nodi delle celle

I dati topografici (Terrain Data) e la mappa delle scabrezze (Roughness Map) vanno a costituire il modello del terreno (Terrain Model). Il perimetro della 2D Flow Area con le eventuali linee poste dall'utente in modo da vincolare la posizione dei nodi in alcuni punti particolari del terreno (Breakline) danno origine alla griglia di calcolo (mesh). Dal modello del terreno vengono ricavati i valori dei parametri idraulici necessari per le elaborazioni. Tali valori vengono calcolati per passi spaziali verticali ( $\Delta Z$ ) andando a creare una serie di tabelle, una per ogni parametro, dando origine alla tabella delle proprietà idrauliche.

#### 6.2.8. Schemi di calcolo accoppiati 1D-2D

L'area entro la quale si desidera eseguire una simulazione in regime 2D viene indicata come 2D Flow Area (2DFA). La 2DFA coincide pertanto con il perimetro della griglia di calcolo. Un modello HEC RAS può essere costituito da una o più 2DFA oltre che da tratti di canale (Reach) in regime 1D purché tutti gli elementi 1D e 2D siano opportunamente connessi tra loro mediante una delle equazioni idrauliche che determinano il comportamento del flusso al passaggio tra un elemento e l'altro. Ogni elemento verrà elaborato separatamente e, mediante un processo iterativo, verrà garantita la congruenza delle variabili idrauliche sul contorno condiviso di ogni elemento con quello adiacente.

Il rispetto del vincolo di congruenza rende HEC RAS un modello 1D-2D di tipo "accoppiato". Tuttavia, all'interno di ogni elemento (Reach o 2DFA) saranno risolte esclusivamente le equazioni del moto 1D oppure le equazioni del moto 2D. HEC RAS non consente elaborazioni in regime 1D-2D di tipo "misto".

### 6.2.9. Definizione delle condizioni al contorno e iniziali

Nell'esporre i fondamenti teorici alla base del modello si è accennato alla necessità di assegnare opportune condizioni al contorno e iniziali per permettere la risoluzione del sistema di equazioni differenziali che governa il fenomeno del moto vario.

Le condizioni iniziali hanno la funzione di stabilire il valore dei parametri che descrivono lo stato del flusso all'istante iniziale della simulazione in tutte le sezioni del canale (1D) e in tutte le celle che compongono la griglia di calcolo (2D).

Le condizioni al contorno hanno il compito di descrivere la variazione temporale di tali parametri laddove il moto viene influenzato da fattori esterni non valutabili dal modello. Ciò avviene inevitabilmente nelle sezioni di estremità o lungo il confine della griglia di calcolo (contorno) dove portate, livelli e velocità possono essere influenzate da molteplici fattori (fenomeni meteorici, oscillazioni di marea, gestione dei serbatoi artificiali, ecc...) non valutabili dal modello. Particolari condizioni al contorno sono rappresentate dagli afflussi laterali in ingresso e/o in uscita dalla rete oppure possono essere dovute all'intervento umano che agisce sulla regolazione degli organi mobili posti a presidio delle luci di sfioro o degli scarichi di fondo dei manufatti idraulici. In quest'ultimo caso si parla di condizioni al contorno interne. È evidente che, nelle simulazioni a moto vario, tali condizioni di deflusso, esterne ed interne, possono variare durante l'elaborazione rendendo necessaria la loro assegnazione per ogni passo temporale di calcolo.

**Nel caso di moto 1D**, l'assegnazione delle condizioni iniziali avviene: a) mediante la ricostruzione di un profilo a moto permanente, previa assegnazione di un solo valore di portata per ogni tratto; b) facendo leggere al modello i risultati di una precedente simulazione contenuti nell'apposito "restart file", anch'esso generato automaticamente al termine della precedente simulazione. A rigore, la prima modalità può essere utilizzata solamente quando lo stato idrometrico iniziale corrisponde ad un regime di magra, dove il valore della portata in arrivo rimane costante per un tempo sufficientemente lungo per stabilire effettivamente un regime di moto permanente. Nel caso di simulazioni particolarmente lunghe (i.e. monitoraggio continuo di un corso d'acqua) o in tempo reale, essendo necessaria l'esecuzione di più elaborazioni consecutive, risulta utile l'utilizzo del restart file. L'assegnazione delle condizioni iniziali è mirata all'imposizione della reale capacità di invaso degli alvei e delle golene che influisce notevolmente sui tempi di propagazione dell'onda e sulla capacità di laminazione.

L'assegnazione delle condizioni al contorno richiede di fornire i valori della portata e del livello idrometrico per tutti i passi temporali di calcolo nelle sezioni di estremità.

Nel caso di simulazione a moto permanente le condizioni al contorno si riducono al solo valore della portata, eventualmente variabile da tratto a tratto, e al grado di regolazione dei manufatti idraulici che

devono necessariamente comportarsi come organi fissi. Ovviamente il concetto di condizione iniziale perde di significato.

Appare interessante far notare la possibilità di scorporare il solutore del modello dagli altri programmi che gestiscono l'interfaccia grafica. In questo modo, per particolari e sofisticate applicazioni modellistiche, HEC-RAS può essere integrato con altri modelli aventi differenti finalità (es. modelli idrologici, modelli di propagazione della marea, modelli di gestione, reti di monitoraggio, ecc...), mediante l'implementazione di procedure automatiche in grado di assegnare le corrette condizioni al contorno senza la necessità di un'introduzione manuale.

**Nel caso di moto 2D**, l'assegnazione delle condizioni al contorno e iniziali riveste un aspetto più delicato e complesso. L'assegnazione delle condizioni iniziali richiede di stabilire i parametri che definiscono lo stato del moto in tutti gli elementi della mesh, costringendo l'utente ad un lavoro assai lungo e oneroso. Per ovviare a questa situazione HEC RAS 2D consente di avviare le simulazioni in condizioni di alveo asciutto, disponendo di uno schema di calcolo in grado di gestire questa condizione. Tuttavia, in alcuni ambiti, questa condizione può comportare fenomeni di instabilità numerica fino a far fallire lo schema numerico stesso. HEC RAS dispone allora di alcune tecniche per creare un'opportuna condizione iniziale al fine di migliorare la stabilità numerica nella fase iniziale della simulazione (Single Water Surface Elevation, Restart File).

Può inoltre essere utilizzata la *Rump Up Option* con la quale il modello mantiene la portata costante nel tempo per un certo intervallo di tempo (*Warm Up period*). Vi è inoltre la possibilità di portare gradualmente la portata a tale valore utilizzando una seconda opzione *Initial Condition Rump Up Time*, stabilita dall'utente, durante la quale le celle vengono portate, in modo graduale, dalla condizione iniziale a una condizione di moto corrispondente al primo passo temporale di calcolo.

L'assegnazione delle condizioni al contorno non è molto differente da quanto avviene con il modello 1D. Mancando il concetto di "sezione d'alveo", la portata o il livello verranno assegnate a due tratti del perimetro della mesh, opportunamente definiti dall'utente, come punto di ingresso e di uscita.

#### 6.2.10. Costruzione del modello

Per analizzare la modalità di propagazione della piena sulla porzione di territorio, in cui ricadono le aree di studio, è stato utilizzato il codice di calcolo HEC-RAS bidimensionale.

Per la descrizione dell'alveo del corso d'acqua in esame e del territorio circostante è stato utilizzato un modello 3D del terreno (DTM) ricavato dal DTM acquisito attraverso il sito del *MASE (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica)*, caratterizzato da una risoluzione 1.0mx1.0m.

Il modello HEC RAS simula il fenomeno della propagazione dei flussi entranti nel dominio di calcolo schematizzando il campo di moto con elementi finiti poligonalari che nel loro insieme costituiscono la griglia di

calcolo (mesh). Come si è visto nel paragrafo dedicato alla tecnica di impostazione e risoluzione delle equazioni del moto, si tratta di una mesh ibrida ovvero in parte strutturata e in parte non strutturata.

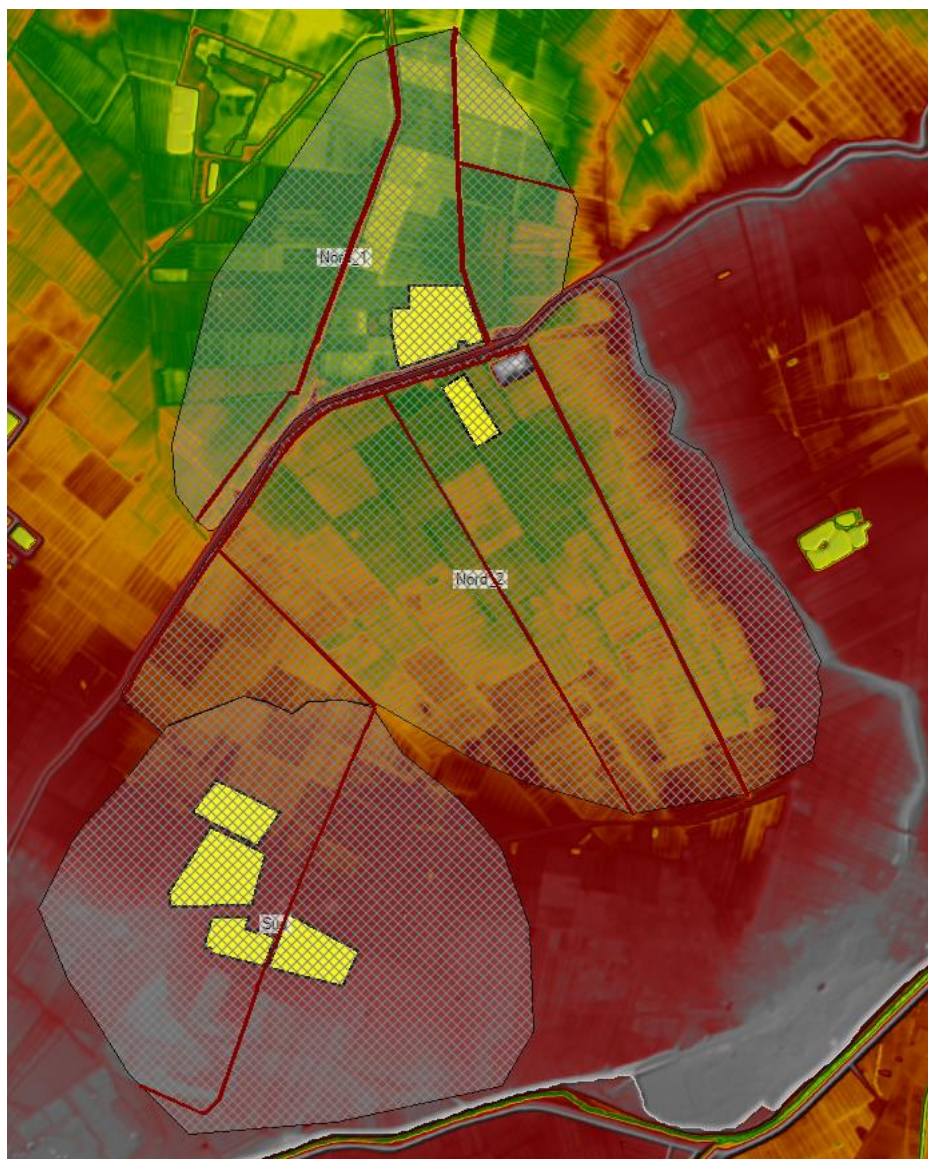


Figura 6-4 - Mesh di calcolo del modello 2D

Le condizioni al contorno utilizzate nel calcolo del modello bidimensionale sono ubicate a monte, all'interno dell'alveo degli elementi idrici oggetto di studio, mentre a valle, sono rappresentate da segmenti lungo i lati esterni del dominio di calcolo 2D.

La condizione al contorno di monte è rappresentata dagli idrogrammi di piena, per differenti valori del tempo di ritorno, descritti nel precedente capitolo.

Come condizione al contorno di valle è stata utilizzata la "Normal Depth" con pendenza pari a 0.02% estesa ai lati del rettangolo di calcolo. Tale valore è stato desunto dalla pendenza media della livelletta lungo il tratto d'alveo considerato.



Le simulazioni sono state condotte previa ricerca del set ottimale dei parametri al fine di rendere maggiormente stabile la risoluzione numerica. Il parametro che influenza maggiormente la stabilità numerica è il passo temporale di calcolo che, a parità di altre condizioni, determina il numero di Courant.

Il modello è stato simulato per i *tempi di ritorno* pari a 30 e 50 anni in quanto l'area impianto ricade per la maggior parte in zona H-P3: Alluvioni frequenti (TR: 20-50 anni) - elevata probabilità.

### 6.3. Risultati delle simulazioni

La lettura dei parametri che caratterizzano il campo di moto, ossia le quote di massima piena, i tiranti idraulici, consentono di comprendere il comportamento idrometrico dei canali nonché la dinamica con cui avvengono le esondazioni e la propagazione delle acque nel territorio circostante.

Al fine di illustrare i risultati si ricorre ad alcune immagini che rappresentano la situazione istantanea del moto in alcuni particolari passi temporali di calcolo. Si possono così individuare i punti di esondazione e i percorsi seguiti dalle acque nel loro propagarsi nel dominio di calcolo, specie per le acque esondate nel piano campagna esterno alle sponde fluviali.

Ai fini della definizione dell'estensione delle aree allagabili risultano molto utili i risultati delle simulazioni che mostrano la distribuzione dei tiranti idrici con cui la corrente si propaga nell'alveo del corso d'acqua analizzato e in parte nel territorio circostante in caso di esondazione.



Figura 6-5 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 30 anni -Aree NORD\_1 e NORD\_2

Per il tempo di ritorno pari a 30 anni, nella fase di colmo della piena, in corrispondenza dell'area dell'impianto i tiranti idrici è pari a circa a 20 cm sia per l'area NORD\_1 che per l'area NORD\_2.



Figura 6-6 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 50 anni -Aree NORD\_1 e NORD\_2

Per il tempo di ritorno pari a 50 anni, nella fase di colmo della piena, in corrispondenza dell'area dell'impianto i tiranti idrici è pari a circa a 23 cm sia per l'area NORD\_1 che per l'area NORD\_2.

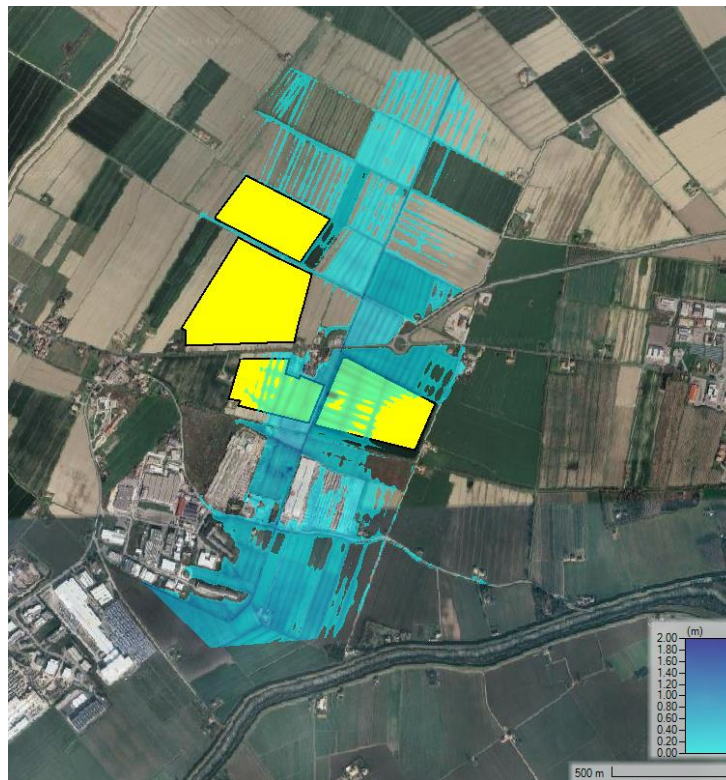


Figura 6-7 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 30 anni -Area SUD

Per il tempo di ritorno pari a 30 anni, nella fase di colmo della piena, in corrispondenza dell'area dell'impianto i tiranti idrici è pari a circa a 22 cm per l'area SUD.

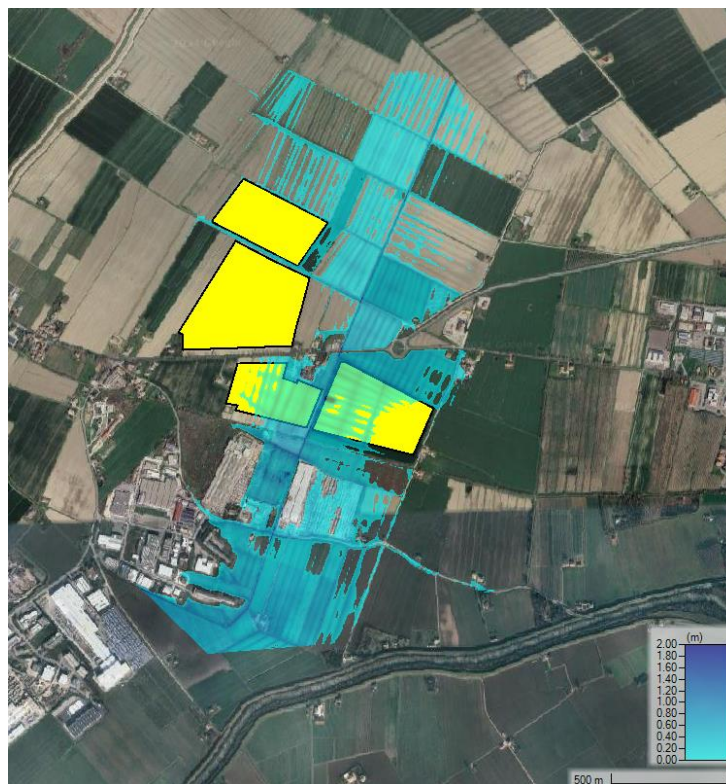


Figura 6-8 - Distribuzione dei tiranti idrici per TR 50 anni -Area SUD

Per il tempo di ritorno pari a 50 anni, nella fase di colmo della piena, in corrispondenza dell'area dell'impianto i tiranti idrici è pari a circa a 25 cm per l'area SUD.

L'impianto da realizzare è un parco agrivoltaico avanzato, con strutture monoassiali ad inseguimento solare, le cui strutture sono posizionate su supporti metallici semplicemente infissi nel terreno; i moduli fotovoltaici risultano ubicati ad una altezza minima di 2.10 m dal piano campagna e le cabine di campo poste su plinti con altezza minima dal piano campagna di 30 cm. Per tale motivo, avendo l'impianto determinate caratteristiche, i tiranti idrici che si manifestano in seguito ad un evento di piena, con tempo di ritorno di 30 anni e 50 anni precedentemente calcolati, risultano ininfluenti.

## Conclusioni

Il seguente studio idrologico e idraulico è parte integrante del Progetto di fattibilità tecnica ed economica dell'impianto agrivoltaico avanzato denominato "Valletta" di potenza nominale complessiva dell'impianto fotovoltaico è pari a 60,49484 MW, che la società **Valletta Solar SRL** intende realizzare nel territorio Comune di **FINALE EMILIA (MO)**. Le aree occupate dall'impianto si sviluppano su una superficie recintata complessiva di circa **78,3546 Ha** dei quali **66,7730 Ha** coltivabili. All'interno delle aree costituenti l'impianto agrivoltaico avanzato, inoltre, saranno garantiti spazi di manovra e corridoi di movimento adeguati, per facilitare il transito dei mezzi atti alla manutenzione.

L'area di intervento è composta da terreni a vocazione agricola, caratterizzata da una vegetazione rada e conformazione pressoché pianeggiante. Inoltre, all'interno delle aree non si registra la presenza di manufatti o fabbricati. Il reticolo idrografico è costituito da una serie di fossi artificiali di modesto sviluppo, funzionali al drenaggio delle acque derivanti dalle attività agricole, di competenza del Consorzio della Bonifica Burana.

Al fine di ottemperare a quanto richiesto dagli Enti Autorizzativi, nell'ambito del presente studio sono stati verificati gli aspetti riguardanti la compatibilità idraulica degli interventi.

Dalla sovrapposizione delle opere in progetto alla cartografia PAI è emerso che le aree di impianto riscontrate aree di pericolosità/rischio idraulico di "bassa probabilità" (Fasce Fluviali- "Fascia C") in corrispondenza delle aree oggetto di intervento, come mostrato nella Figura 2-3, dal Piano di Assetto Idrogeologico – Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po. Come definito nelle "Norme di attuazione", nel comma 4 art. 31, *"Compete agli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica, regolamentare le attività consentite, i limiti e i divieti per i territori ricadenti in fascia C"*.

Facendo riferimento al PGRA, del Reticolo Secondario di Pianura (RSP), L'area di progetto dell'"**Area nord**" è localizzata interamente nelle aree "**H-P3 – alta probabilità**" mentre l'"**Area sud**" ricade maggiormente nelle aree "**M-P2 – media probabilità**" e in minima parte in nelle aree "**H-P3 – alta probabilità**".

Gli afflussi naturali sono stati determinati, per assegnati tempi di ritorno, tramite l'impiego di piogge estreme regionalizzate nell'ambito del progetto VAPI-CNR dello studio del GNDCl (*Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche*) con il modello probabilistico che adotta la distribuzione TCEV (*Two-Component Extreme Value*).

Da quanto emerso dalle verifiche idrauliche in moto permanente bidimensionale, effettuate per i tratti d'asta prossimi e/o interferenti con le opere in progetto, i deflussi all'interno dell'area di progetto mostrano tiranti idrici di circa 20 cm con tempo di ritorno *30 anni* e di 23 cm per tempo di ritorno di 50 anni sia per l'area NORD\_1 che per l'area NORD\_2.

RELO6	Relazione idrologica e idraulica	52 di 53
-------	----------------------------------	----------

Mentre per l'area SUD si avranno tiranti idrici di circa 22 cm per  $TR=30$  anni, e di circa 25 cm per  $TR=50$  anni.

In fase di realizzazione dell'impianto, considerato che l'area è continuamente soggetta a pratiche agricole, si procederà ad aggiornare il rilievo topografico dello stato di fatto e a rettificare, se necessario, le simulazioni e le verifiche idrauliche sulla base del nuovo scenario individuato. Qualora risultasse necessario si procederà alla realizzazione di interventi di mitigazione.

I progettisti

\_\_\_\_\_  
(dott. ing. Giovanni Guzzo Foliaro)

\_\_\_\_\_  
(dott. ing. Amedeo Costabile)

\_\_\_\_\_  
(dott. ing. Francesco Meringolo)