

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN NUOVO IMPIANTO AGRIVOLTAICO
E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RTN
LOCALITA' LAMA PAGLIARA
COMUNE DI RUVO DI PUGLIA (BA)
DENOMINAZIONE IMPIANTO - PVA004 RUVO LAMA PAGLIARA
POTENZA NOMINALE 12.7 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

PROGETTAZIONE E SIA

HOPE engineering

ing. Fabio PACCAPELO

ing. Andrea ANGELINI

arch. Gaetano FORNARELLI

dott.ssa Anastasia AGNOLI

Studio ALAMI

Arch.Fabiano SPANO

Arch. Valentina Marta RUBRICHI

Arch. Susanna TUNDO

AGRONOMIA E STUDI COLTURALI

dott.ssa Lucia PESOLA

STUDI SPECIALISTICI E AMBIENTALI

MICROCLIMATICA

dott.ssa Elisa GATTO

ARCHEOLOGIA

dott.ssa Domenica CARRASSO

GEOLOGIA

Apogeo Srl

ACUSTICA

dott.ssa Sabrina SCARAMUZZI

REV.	DATA	DESCRIZIONE
	12-23	prima emissione

R.2 RELAZIONI SPECIALISTICHE

R.2.2 Relazione idrologica e idraulica



1	PREMESSA	2
2	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TERRITORIALE	3
3	QUADRO NORMATIVO – PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO	5
3.1	INDIVIDUAZIONE DELLE INTERFERENZE CON IL P.A.I.	5
3.2	RISOLUZIONE DELLE INTERFERENZE CON IL P.A.I.	7
4	BREVE DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	9
4.1	IMPIANTO DI GENERAZIONE	9
4.2	CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO E MODULI FOTOVOLTAICI	9
4.3	CONNESSIONE ALLA RETE ELETTRICA - CAVIDOTTO DI VETTORIAMENTO	11
5	ANALISI IDROLOGICA	13
5.1	DEFINIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO	13
5.2	CALCOLO DELLE PORTATE DI PIENA – METODOLOGIA VA.PI.	14
5.3	DEFINIZIONE DELL' IDROGRAMMA DI PIENA	16
6	VERIFICA IDRAULICA – MODELLI BIDIMENSIONALI	18
6.1	MODELLO GEOMETRICO DI BASE	18
6.2	TEORIA DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE	18
6.3	MODELLO IDRAULICO CON APPROCCIO A PARAMETRI CONCENTRATI	20
6.4	INDIVIDUAZIONE AREE INONDABILI	21
6.5	GEOMETRIA E IMPOSTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO BIDIMENSIONALE	23
6.6	RISULTATI DELLA SIMULAZIONI 2D – STATO DI FATTO	25
7	CONCLUSIONI	27

1 PREMESSA

La presente relazione idrologico-idraulica ha la finalità di descrivere e valutare gli aspetti idrologici e idraulici relativi all'area interessata dal progetto di impianto agrivoltaico in un sito a destinazione agricola ricadente sul territorio comunale di Ruvo di Puglia nella Provincia di Bari.

La società Santa Barbara Energia S.r.L., con sede in Milano, via Lanzone n31, intende realizzare un impianto agrivoltaico della potenza nominale pari a circa **12,7 MWp** in un sito a destinazione agricola sul territorio comunale di Ruvo di Puglia, il progetto definitivo comprende le opere necessarie alla connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale.

Con il termine “**agrivoltaico**” si intende un sistema che coniuga la produzione agricola con la produzione di energia elettrica mediante impianto fotovoltaico, ospitando le due componenti nel medesimo terreno; pertanto, si tratta della convivenza, sul medesimo sito della conduzione delle colture agricole unitamente alla produzione di energia elettrica mediante l'installazione di pannelli fotovoltaici su apposite strutture di supporto, le caratteristiche di tali strutture dovranno essere compatibili con il regolare svolgimento dell'attività agricola e il transito dei mezzi agricoli necessari alla stessa.

L'impianto è denominato “PVA004 – RUVO – LAMA PAGLIARA” riprendendo il nome dal toponimo della zona oggetto di intervento.

Vengono di seguito sviluppati gli aspetti idrologici e idraulici dell'area oggetto di intervento allo scopo di definire le caratteristiche idrauliche relative allo stato di fatto e di verificare le condizioni idrauliche relative allo stato di progetto.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E TERRITORIALE

L'impianto agrivoltaico Santa Barbara è situato a sud-ovest del Comune di Ruvo di Puglia, nella provincia di Bari, in località Lama Pagliara.

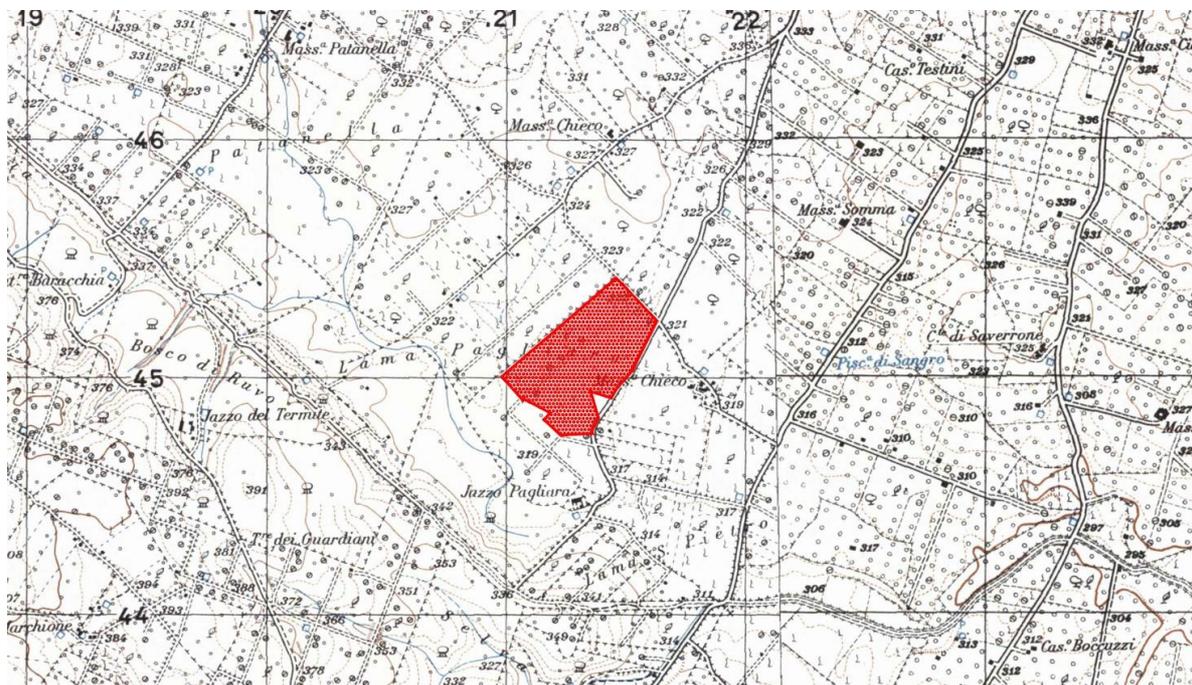


Figura 1 – Localizzazione dell'intervento su cartografia IGM

Le aree di installazione ricadono tra le aree nella disponibilità della Santa Barbara Energia srl.

L'estensione complessiva dei terreni in disponibilità della Santa Barbara Energia srl ed area di progetto è di circa 20,8 ha.

Le aree nella disponibilità della Santa Barbara Energia sono per la maggior parte destinate a seminativo e parzialmente a mandorleto.

I terreni a seminativo, pari a 18,3 ha, allo stato attuale sono coltivati a lenticchia e coincidono con l'area di intervento denominata **CAMPO 2**.

I terreni a mandorleto hanno un'estensione di circa 2,5 ha e coincidono con l'area di intervento denominata **CAMPO 1**.



Figura 2 - Vista a volo d'uccello – Stato dei luoghi attuale

Di seguito si riporta una tabella con le superfici occupate dai campi e la relativa potenza:

DENOMINAZIONE CAMPI			
Lotto	superficie catastale (ha)	superficie impianto (ha)	Potenza (mWp)
CAMPO 1	2,48	2,48	1,24
CAMPO 2	18,31	18,31	11,47
	20,80	20,79	12,72

Figura 3 - Tabella delle superfici occupate



Schema suddivisione campi

L'intera area nella disponibilità del Proponente è stata suddivisa in 2 Campi per lo più coincidenti con le campagne di installazione, denominati "Campo 1-2".

3 QUADRO NORMATIVO – PIANO DI ASSETTO IDROGEOLOGICO

3.1 INDIVIDUAZIONE DELLE INTERFERENZE CON IL P.A.I.

Per quanto riguarda il Piano Assetto Idrogeologico (P.A.I.), come riportato nelle immagini sotto, in corrispondenza dell'area di realizzazione dell'impianto e lungo il tracciato del cavidotto di vettoriamento, si possono riscontrare le seguenti interferenze:

- l'area su cui è prevista la realizzazione dell'impianto non è interessata dalla presenza di aree perimetrate a pericolosità idraulica;
- l'area su cui è prevista la realizzazione dell'impianto è collocata in prossimità di due reticoli riportati sulla Carta Idrogeomorfologica, il primo reticolo, quello più distante, è collocato a oltre 150 m di distanza mentre il secondo reticolo attraversa l'area ovest dell'impianto;
- il tracciato del cavidotto di vettoriamento di progetto interseca in diversi punti sia aree ad alta, media e bassa pericolosità idraulica che reticoli idrografici.

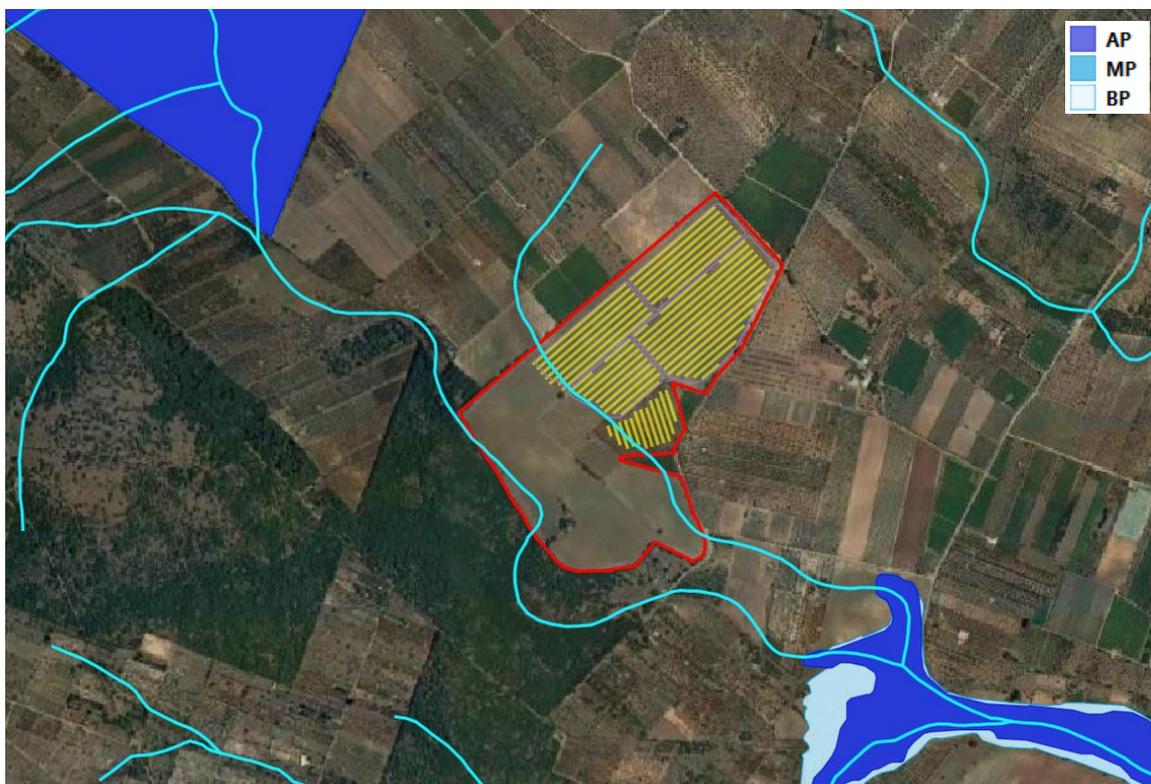


Figura 4 – Stralcio vincoli PAI su area di realizzazione dell'impianto con indicazione del reticolo idrografico



Figura 5 - Stralcio vincoli PAI su tracciato cavidotto di vettoriamento con indicazione del reticolo idrografico

Per quel che riguarda l'area di realizzazione dell'impianto, il primo reticolo è collocato a distanza superiore di 150 m dalle aree in cui sarà realizzato l'impianto, pertanto, la sua presenza esula dalle NTA del PAI. Il secondo reticolo invece, attraversando l'area su cui si prevede l'installazione dei moduli fotovoltaici, è soggetto alle NTA del PAI.

In particolare, dal punto di vista normativo, la presenza di questo reticolo comporta l'osservanza degli articoli 6-10 delle NTA del PAI relativi rispettivamente a "Alveo fluviale in modellamento attivo e aree golenali" e "Disciplina delle fasce di pertinenza fluviale".

Secondo l'art.6 comma 4:

"All'interno delle aree e nelle porzioni di terreno di cui al precedente comma 1, possono essere consentiti l'ampliamento e la ristrutturazione delle infrastrutture pubbliche o di interesse pubblico esistenti, comprensive dei relativi manufatti di servizio, riferite a servizi essenziali e non delocalizzabili, nonché la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico, comprensive dei relativi manufatti di servizio, parimenti essenziali e non diversamente localizzabili, purché risultino coerenti con gli obiettivi del presente Piano e con la pianificazione degli interventi di mitigazione. Il progetto preliminare di nuovi interventi infrastrutturali, che deve contenere tutti gli elementi atti a dimostrare il possesso delle caratteristiche sopra indicate anche nelle diverse soluzioni presentate, è sottoposto al parere vincolante dell'Autorità di Bacino.

E comma 7:

"per tutti gli interventi consentiti nelle aree di cui al comma 1 l'AdB richiede, in funzione della valutazione del rischio ad essi associato, la redazione di uno studio di compatibilità idrologica ed idraulica che ne analizzi compiutamente gli effetti sul regime idraulico a monte e a valle dell'area interessata."

Per quel che riguarda il tracciato del cavidotto di vettoriamento, la presenza delle aree a pericolosità idraulica comporta altresì l'osservanza degli articoli 7-8 e 9 delle NTA del PAI, secondo i quali la

realizzazione del cavidotto rientra tra gli interventi ammissibili per quanto riportato al comma 1 lettera d):

“interventi di ampliamento e di ristrutturazione delle infrastrutture a rete pubbliche o di interesse pubblico esistenti, comprensive dei relativi manufatti di servizio, riferite a servizi essenziali e non delocalizzabili, nonché la realizzazione di nuove infrastrutture a rete pubbliche o di interesse pubblico, comprensive dei relativi manufatti di servizio, parimenti essenziali e non diversamente localizzabili, purché risultino coerenti con gli obiettivi del presente Piano e con la pianificazione degli interventi di mitigazione. Il progetto preliminare di nuovi interventi infrastrutturali, che deve contenere tutti gli elementi atti a dimostrare il possesso delle caratteristiche sopra indicate anche nelle diverse soluzioni presentate, è sottoposto al parere vincolante dell’Autorità di Bacino”

E al comma 2:

“per tutti gli interventi consentiti nelle aree di cui al comma 1 l’AdB richiede, in funzione della valutazione del rischio ad essi associato, la redazione di uno studio di compatibilità idrologica ed idraulica che ne analizzi compiutamente gli effetti sul regime idraulico a monte e a valle dell’area interessata”

Gli interventi di progetto rientrano tra gli interventi ammissibili, pertanto si provvede in questa sede alla redazione dello studio di compatibilità idrologica e idraulica, per valutare le condizioni idrauliche in prossimità delle aree oggetto di intervento.

3.2 RISOLUZIONE DELLE INTERFERENZE CON IL P.A.I.

Sulla base delle interferenze individuate al paragrafo precedente si riportano di seguito alcune proposte di risoluzione delle stesse.

In particolare per quel che riguarda l’area di realizzazione dell’impianto e il reticolo idrografico, affluente di Lama Pagliara, che la attraversa, si procederà nei paragrafi successivi alla redazione dello studio di compatibilità idrologico e idraulico richiesto dalle NTA del PAI, ovvero in primo luogo alla valutazione delle portate di piena per i tempi di ritorno 30, 200 e 500 anni e successivamente alle verifiche idrauliche dell’area del compluvio mediante impostazione di un modello idraulico bidimensionale, utilizzando il software di modellazione Flo-2d. Dai risultati derivanti dal modello idraulico bidimensionale si potranno valutare le condizioni di deflusso in prossimità delle aree di intervento e quali accorgimenti adottare per la realizzazione delle opere.

Per quel che riguarda il cavidotto di vettoriamento, per la sua realizzazione in corrispondenza delle interferenze individuate si procederà come di seguito:

- per i tratti in interferenza con aree ad alta, media e bassa pericolosità idraulica, risultando gli stessi alquanto estesi, soprattutto nel tratto in cui il reticolo perimetrato procede pressoché parallelo alla strada su cui si prevede la posa del cavidotto, si procederà mediante scavo a cielo aperto, posa del cavidotto e ripristino dello stato dei luoghi, per lasciare invariato il regime idraulico a monte e a valle dell’area interessata. Per il rinterro della sezione di scavo dovrà essere utilizzato materiale non facilmente erodibile (ad esempio misto cementato o similare);

- per i tratti in interferenza con reticoli idrografici non perimetrati si procederà mediante la posa in opera del cavidotto adottando tecnologie no-dig, ovvero senza scavo, mediante TOC, al fine di non alterare in nessun modo lo stato dei luoghi durante la realizzazione degli interventi di progetto.

In fase di esecuzione delle opere, inoltre, soprattutto in corrispondenza delle aree a pericolosità idraulica, dovranno essere adottate particolari misure preventive di protezione per le maestranze, per garantire la loro sicurezza: in caso di eventi meteorici si procederà a sospendere temporaneamente i lavori che potranno riprendere al termine dell'evento piovoso ed eventualmente dopo l'aggettamento delle acque di pioggia presenti nella trincea di scavo.

In particolare, le operazioni di scavo in questi tratti dovranno essere programmate tenendo conto dei seguenti aspetti:

- delle variazioni dei deflussi idrici eventualmente esondati dal reticolo idrografico o presenti nell'area di lavoro a seguito di eventi meteorici;
- delle prevedibili condizioni atmosferiche (piogge, siccità, ecc.) della zona interessata all'attività di scavo e a monte della stessa;
- delle variazioni del livello dell'acqua derivanti da qualsiasi altra causa.

Bisogna inoltre:

- prevedere la presenza di mezzi per garantire la rapida evacuazione in caso di effettivo allagamento dell'area di lavoro;
- dotare e fare indossare al personale idonei DPI;
- predisporre eventualmente canalizzazioni, barriere o altri mezzi equivalenti per impedire l'allagamento dello scavo;
- predisporre l'impiego di adeguati sistemi di captazione preventiva delle acque.

4 BREVE DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

4.1 IMPIANTO DI GENERAZIONE

Riguardo alla **componente fotovoltaica**, questa sarà nel complesso suddivisa in 2 campi, per lo più coincidenti con le campagne di installazione e denominati lotti. Lo schema tabellare che segue descrive il quantitativo di strutture il numero dei moduli e la potenza dei singoli lotti.

SCHEMA POTENZE DI CAMPO						
	strutture	moduli	potenza modulo	potenza lotto kW	cabine power skids 4,0 MW	Moduli BESS 2 Mwh
CAMPO 1	72	1.728	0,715	1.236	-	-
CAMPO 2	664	15.936	0,715	11.394	3	6
TOTALE	736	17.664		12.630	3	6

I **moduli** che si prevede di installare saranno del tipo bifacciale prodotti dalla Huasun, modello Himalaia G12 DS720, da 132 Celle, con potenza del singolo modulo pari a 720 W. I moduli previsti hanno dimensione di 2384x1303 mm.

Con l'obiettivo di combinare nel giusto modo la produzione agricola e la produzione di energia, per l'impianto agrivoltaico Santa Barbara si è scelto di utilizzare particolari **strutture di supporto**, sviluppate da una azienda leader nel settore, la Rem Tec, il modello selezionato è denominato tracker 3D T2.1, l'inseguitore solare ha un funzionamento del tipo biassiale gestito da un sistema di controllo Tracking e backtracking secondo calendario solare; la struttura selezionata, è composta da sotto moduli in acciaio zincato a caldo della lunghezza di 14 metri, infissi nel terreno in maniera amovibile e legati tra loro con un sistema a tensostruttura, ogni sotto modulo è in grado di ospitare e movimentare 24 pannelli fotovoltaici, corrispondenti alla "stinga" del sistema elettrico.

Le **cabine di campo, anche denominate Power Skids**, raccoglieranno l'energia prodotta in ogni sottocampo, convogliandola attraverso cavidotti MT opportunamente dimensionati, fino al punto di raccolta e poi alla rete.

I **Power Skids** selezionati sono prodotti dalla SMA, i modelli della linea MV Power Station saranno individuati in base alle potenze del sottocampo che vanno a servire e potranno variare tra il modello SMA SC 2660 UP e il modello SMA SC 4000 UP. Ogni singolo Power Skids è un elemento prefabbricato delle dimensioni di 6x2.9x2.4 metri che contiene al suo interno l'inverter, il trasformatore i quadri di campo e tutte le componenti del BoS (Balance of System) necessarie per la trasformazione e l'innalzamento della corrente continua, in una configurazione ready to use.

Si rimanda alle relazioni specialistiche e agli elaborati grafici del progetto definitivo per gli approfondimenti necessari.

4.2 CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO E MODULI FOTOVOLTAICI

Il generatore fotovoltaico dell'impianto agrivoltaico Santa Barbara sarà composto da 17.664 moduli fotovoltaici bifacciali al silicio, installati su strutture ad inseguimento di tipo biassiale ancorate nel terreno. Il layout complessivo dell'impianto è stato progettato per massimizzare la potenza installata e la produzione agricola sottostante, cercando di valutare tutte le alternative possibili e trovare soluzioni di compromesso che ottimizzino entrambe le produzioni.

Per quanto riguarda il Balance Of System (BoS), i paragrafi seguenti descrivono le principali componenti e le scelte tecnologiche effettuate per l'impianto agrivoltaico. È importante sottolineare che i criteri adottati per la suddivisione delle strutture di supporto e delle cabine di campo sono stati pensati per consentire lo svolgimento corretto delle attività agricole e garantire un accesso adeguato ai singoli sottocampi. Il layout generale, diviso in 2 lotti come già menzionato, è stato progettato tenendo conto delle dimensioni delle macchine agricole più ingombranti necessarie per la raccolta (ad esempio, una mietitrebbia con barra di taglio di 6 metri) e della loro

accessibilità ai campi agricoli. Per quanto riguarda il posizionamento dei principali cavidotti e delle cabine di campo, è stata scelta la strategia di utilizzare lo stradone esistente centrale del lotto e di posizionare tutte le strutture lungo tale asse, in modo da agevolarne la manutenzione ed evitare l'introduzione di elementi estranei nell'ambiente agricolo che potrebbero interferire con le operazioni agricole.

SCHEMA POTENZE DI SOTTOCAMPO						
	strutture	moduli	potenza modulo	potenza lotto kW	cabine power skids 4,0 MW	Moduli BESS 2 Mwh
SOTTOCAMPO - A	247	5928	0,720	4268	1	2
SOTTOCAMPO - B	243	5832	0,720	4199	1	2
SOTTOCAMPO - C	246	5904	0,720	4251	1	2
TOTALE	736	17664		12718	3	6

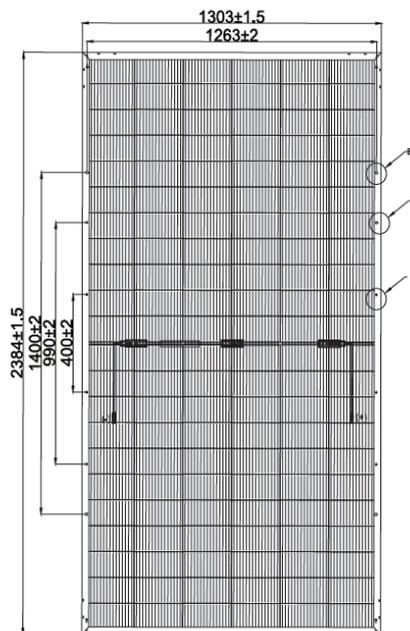
Il sistema ad inseguimento biassiale offre il vantaggio di consentire un orientamento delle strutture e della griglia dei pilastri di supporto che rispetti la conformazione e la disposizione delle aree interessate, senza dover seguire un orientamento fisso est-ovest o nord-sud tipico delle strutture di supporto tradizionali. Questa flessibilità ha permesso di massimizzare la potenza installata e, allo stesso tempo, migliorare l'efficienza delle operazioni agricole sui terreni interessati.



Il modulo fotovoltaico scelto è in silicio monocristallino Huasun, modello Himalaia G12 DS720, da 132 Celle, con potenza del singolo modulo pari a 720 W. I moduli sono del tipo "bifacciali", cioè in grado di convertire in energia elettrica anche la radiazione solare riflessa dall'ambiente circostante e incidente sul retro dei moduli. Si rimanda all'elaborato "disciplinare descrittivo degli elementi tecnici" per maggiori specifiche.

Si riporta di seguito un estratto della scheda tecnica con le principali caratteristiche del modulo utilizzato.

Engineering Drawings Unit: mm



4.3 CONNESSIONE ALLA RETE ELETTRICA - CAVIDOTTO DI VETTORIAMENTO

L'impianto sarà allacciato alla Rete di Distribuzione mediante la realizzazione di un cavidotto di vettoriamento, realizzato seguendo il tracciato delle strade esistenti.

Nella scelta tecnica per la realizzazione del nuovo collegamento si è tenuto conto principalmente dei seguenti fattori:

- posizione del punto di inserimento;
- posizione e configurazione dell'impianto di connessione;
- minimizzare la costruzione di nuovi elettrodotti;
- ottimizzare i collegamenti elettrici utilizzando, per quanto possibile, tracciati più brevi, salvaguardando allo stesso tempo eventuali presenze di zone antropizzate;
- minimizzare l'impatto ambientale e le interferenze;
- utilizzare quanto più possibile la viabilità esistente.

Alla luce di ciò, e vista la posizione della Stazione Elettrica si è progettato un elettrodotto interrato con lunghezza di c.a. 15 km.

Il cavidotto di Vettoriamento segue un percorso che attraversa i territori Comunali di Ruvo e Bitonto da ovest a est, attraversando solo strade pubbliche. La sua lunghezza totale è di circa 15 chilometri. Il percorso selezionato è stato scelto in base a considerazioni tecniche, in quanto si ritiene che sia il più adatto data la posizione della futura cabina di consegna.



Figura 6 - Inquadramento del tracciato del cavidotto di vettoriamento MT

Il cavidotto di vettoriamento a media tensione (MT) attraversa strade pubbliche.

Tutti gli attraversamenti di sottoservizi esistenti avverranno nel rispetto dei parametri indicati dalla normativa di settore e dalle norme CEI specifiche per interferenze delle linee elettriche con altre reti, quali linee Gas, acquedotti o linee di telecomunicazione.

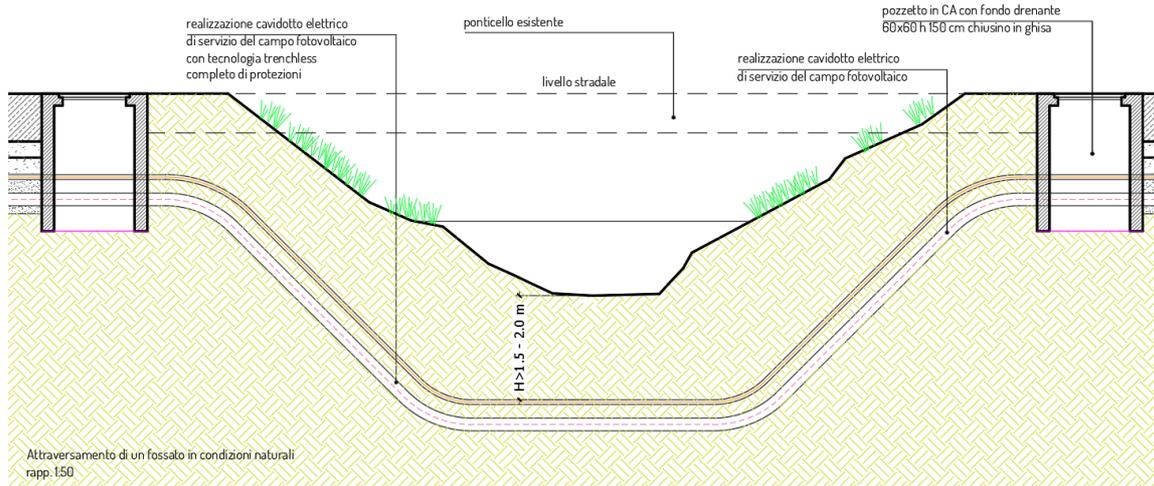


Figura 7 - Tipico dell'attraversamento di un fossato in TOC

5 ANALISI IDROLOGICA

5.1 DEFINIZIONE DEL BACINO IDROGRAFICO

Per il calcolo delle portate di piena è necessario ricostruire l'andamento del bacino idrografico sotteso dalla sezione di chiusura considerata in questo caso lungo il compluvio in studio, in prossimità del limite dell'area di intervento.

Il bacino idrografico è stato ricostruito sulla base del reticolo idrografico e sulla base della cartografia, da cui sono state estrapolate le curve di livello.

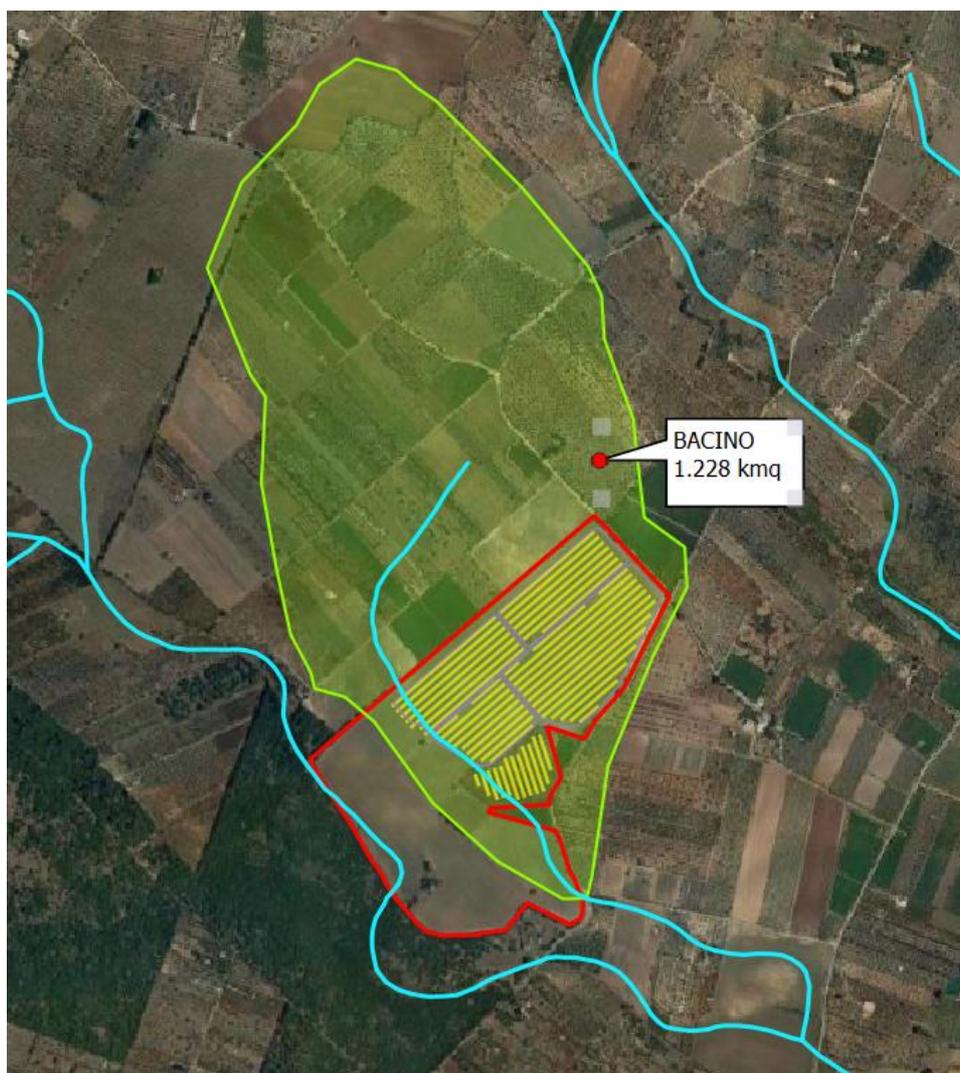


Figura 8 – Individuazione bacino idrografico in studio

Il bacino idrografico si sviluppa nel territorio comunale di Ruvo e riguarda il reticolo minore, affluente in sinistra idraulica di Lama Pagliara.

Il bacino idrografico di questo affluente si sviluppa a partire da quota pari a 340.00 m s.l.m. e nel suo sviluppo è delimitato in sinistra dal displuvio del bacino di un altro reticolo idrografico e in destra dal displuvio del bacino idrografico di Lama Pagliara.

L'interferenza con le aree di progetto si verifica circa 600 m a valle della testa del compluvio e riguarda un tratto di compluvio di circa 550 m.

Il bacino presenta un'estensione complessiva pari a circa 1.228 kmq.

5.2 CALCOLO DELLE PORTATE DI PIENA – METODOLOGIA VA.PI.

Per il calcolo delle portate di piena si è proceduto con l'utilizzo della metodologia riportata nel Va.Pi.

È stato pertanto condotto uno studio conforme a quanto prescritto dalle Norme tecniche di attuazione del PAI ed in particolare a quanto previsto dal progetto Valutazione delle Piene (VaPi) del Gruppo Nazionale di Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI). In particolare, le portate sono state stimate sulla base delle curve di possibilità pluviometrica calcolate con il metodo VAPI-Puglia del G.N.D.C.I..

Lo studio idrologico a livello di bacino ha condotto alla determinazione delle portate attese con diversi tempi di ritorno ovvero **30, 200 e 500** anni.

Il bacino oggetto di studio ricade all'interno del territorio pugliese che dal punto di vista dell'approccio pluviometrico, può essere suddiviso in sei zone pluviometricamente omogenee, per ciascuna delle quali il GNDCI nel progetto Va.Pi., ha fornito i criteri per la definizione delle curve di possibilità pluviometriche.

Il bacino idrografico in studio ricade interamente nella zona omogenea 5, per la quale la curva di possibilità pluviometrica è definita dalla seguente relazione:

$$X(t) = 28,8 t^{((0,628+0,0002 z) / 3,178)}$$

Si utilizza ora il metodo razionale per la valutazione della piena indice; si adotta a tal fine un semplice modello di regionalizzazione basato su una formula di tipo razionale. Essa esprime un legame correlativo tra la piena indice **X**, la superficie del bacino **A** e il valore medio, **I(tr)**, dei massimi annuali delle intensità di pioggia puntuali di durata pari al tempo di ritardo caratteristico del bacino.

Questo modello, empiricamente proposto da Rossi e Versace [1982], ha anche trovato successivamente i supporti teorici che ne rendono più affidabile l'applicazione.

La formula razionale viene generalmente scritta come:

$$x = \frac{I(tr)A C^*}{3,6}$$

in cui:

x espressa in m³/s, indica il valore della piena indice;

I(tr) espressa in mm/h, indica l'intensità di pioggia nel tempo di ritardo;

A espressa in Km², indica l'area del bacino;

tr espresso in ore, indica il tempo di ritardo.

C* è un coefficiente, detto **probabilistico di piena**, che porta in conto, oltre all'effetto naturale di laminazione del picco di piena rispetto al picco di pioggia, l'effetto di riduzione areale delle piogge e le perdite idrologiche nel bilancio di piena, dovute principalmente al fenomeno dell'infiltrazione nel suolo ed a quello dell'intercettazione da parte della vegetazione. Per l'applicazione della formula razionale è richiesta pertanto la conoscenza del tempo di ritardo **tr**, delle curve di probabilità

pluviometrica e delle modalità con cui l'eventuale variabilità di C^* dipende dalle dimensioni del bacino idrografico e dalle sue caratteristiche morfologiche, geolitologiche e d'uso del suolo.

Si ricordi che per **tempo di ritardo** di un evento di piena si intende la distanza temporale tra i baricentri dell'idrogramma di piena superficiale e dello ietogramma efficace che lo ha generato e che, per **tempo di ritardo caratteristico**, tr , del bacino idrografico, si intende il valore medio a cui questo tende all'aumentare del periodo di ritorno della portata al colmo dell'idrogramma.

Per i bacini pugliesi si è inoltre ricavato:

$$tr = 0.344 A^{0.5}$$

Le aree dei bacini idrografici di verifica sono riportate nella tabella seguente, nella quale sono anche riassunti i calcoli relativi al **tempo di ritardo**, ai valori di $H(tr, h)$ ottenuti in base all'applicazione della curva di possibilità pluviometrica relativa alla zona omogenea 5 e ai valori di $I(tr)$ **intensità di pioggia** ottenuta come segue:

$$I(tr) = \frac{H(tr, h)}{tr}$$

	A (kmq)	tr (ore)	H (tr,h) (mm)	I(tr) (mm/h)
Bacino idrografico	1.228	0.38	22.85	59.94

Per la valutazione di C^* si fa riferimento alla seguente formula:

$$C^* = 0,09 + 0,471 (1-PE)$$

nella quale l'unica incognita è rappresentata da **PE** ovvero la percentuale di area ad elevata permeabilità. Anche per la valutazione di C^* è stata effettuata la regionalizzazione e si è giunti all'identificazione di un valore medio caratteristico dei bacini pugliesi ovvero $C^*=0,21$ corrispondente a una percentuale $PE = 74\%$.

Nel caso in questione il valore di PE è stato valutato con l'ausilio delle Carte Geologiche relative all'estensione dei bacini, in particolare le carte geologiche indicano per il territorio in questione la presenza delle seguenti formazioni geologiche:

- calcare di Bari, costituito da una potente serie di strati e banchi calcarei di colore biancastro, permeabile per fessurazione e carsismo;
- depositi alluvionali recenti, depositi di natura argilloso-sabbiosa-ghiaiosa; si rinvencono prevalentemente nelle piane alluvionali dei principali fiumi ed affluenti, permeabili.

Si tratta di formazioni geologiche per definizione permeabili, il che ci porta a stabilire che il valore di PE è prossimo al 100%.

Una leggera riduzione è stata applicata al fine di tenere in conto la presenza di formazioni geologiche meno permeabili e di alcune piccole aree impermeabili legate alla presenza di fabbricati e piccole aree pavimentate.

Riassumendo, dunque, i valori del coefficiente probabilistico di piena C^* che si ricavano dal Va.Pi. sono i seguenti:

	PE	C^*
Bacino idrografico	89.50%	0.139

Si procede dunque con il calcolo dei valori della piena indice X con riferimento ai valori del coefficiente probabilistico di piena appena riportati e applicando la formula razionale.

Ai valori della piena indice X bisogna applicare il Fattore di Riduzione Areale $K_{(A,d)}$ (funzione della superficie del bacino e della durata dell'evento piovoso di progetto), per calcolare i valori della portata indice Q_{indice} :

$$K_{(A,d)} = 1 - (1 - e^{-(0.0021A)}) e^{(-0.53d^{0.25})}$$

$$Q_{\text{indice}} = K_{(A,d)} X$$

Dunque, si possono calcolare i valori della **portata indice** tenendo conto del coefficiente di riduzione areale risultano pari a:

	A (kmq)	$K_{(A,d)}$	X indice	Q_{indice}
Bacino idrografico	1.228	0.9983	2.85	2.846

L'ultima operazione consiste nel considerare il fattore di crescita delle portate K_t funzione del tempo di ritorno che ci consente di differenziare la portata indice secondo i tempi di ritorno prescelti

$$K_T = 0,1599 + 0,5166 \ln T \quad (\text{per la zona 5-6})$$

$$K_t (30) = 1,92$$

$$K_t (200) = 2,90$$

$$K_t (500) = 3,37$$

Si ottengono in tal modo i seguenti valori di portata per i bacini imbriferi in esame:

SEZIONE DI CHIUSURA	C^*	A (Km ²)	Q_{30} (m ³ /s)	Q_{200} (m ³ /s)	Q_{500} (m ³ /s)
Bacino idrografico	0.139	1.228	5.46	8.25	9.59

5.3 DEFINIZIONE DELL' IDROGRAMMA DI PIENA

L'idrogramma di piena del bacino idrografico è stato ricostruito a partire dall'idrogramma adimensionale di Mockus ossia una curva adimensionale ricavata da numerosi idrogrammi unitari ottenuti da idrogrammi di piena registrati in bacini di differente estensione e posizione geografica, che mette in relazione il rapporto tra la generica portata Q all'istante t e la portata al colmo Q_p che si verifica all'istante t_a (tempo di accumulo: durata della fase di crescita) con la variabile t/t_a .

La determinazione dell'idrogramma di piena è consistita quindi nell'amplificare l'ascissa e l'ordinata dell'idrogramma unitario di Mockus mediante due fattori, rispettivamente pari a t_a e Q_p caratteristici del bacino.

Il tempo di accumulo è stato calcolato per mezzo della seguente formula:

$$t_a = \frac{t_r}{0.9}$$



Figura 9 – Idrogramma adimensionale di Mockus

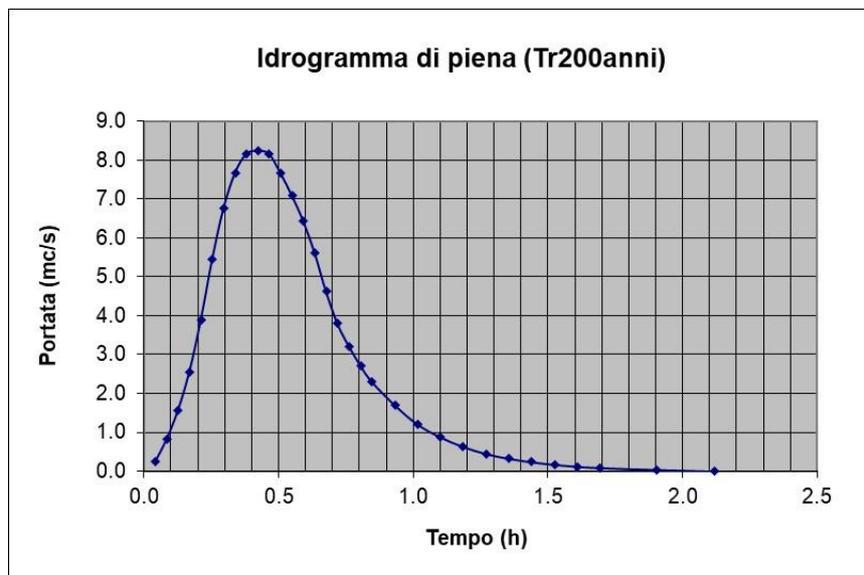


Figura 10 - Idrogramma di piena bacino idrografico (T=200 anni)

6 VERIFICA IDRAULICA – MODELLI BIDIMENSIONALI

Come accennato in precedenza si procede ora con le verifiche idrauliche dell'area di intervento e del suo intorno utilizzando dei modelli di calcolo bidimensionali.

6.1 MODELLO GEOMETRICO DI BASE

Saranno analizzate le condizioni idrauliche relative allo **stato di fatto**, al fine di individuare le aree di allagamento e i tiranti idrici che si generano nei pressi dell'interferenza individuata al transito delle portate di piena con tempo di ritorno 200 anni e verificare che l'area di realizzazione dell'impianto si trova in condizioni di sicurezza idraulica.

6.2 TEORIA DEL MODELLO IDRAULICO BIDIMENSIONALE

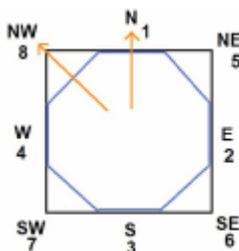
L'analisi idraulica per l'individuazione delle aree inondabili è stata condotta in regime di moto vario e con un modello di calcolo bidimensionale. Il software Flo-2D è accreditato presso la FEMA e la Corps Engineers come modello di calcolo affidabile per lo studio dei fiumi e dei fenomeni di inondazione ed è in grado anche di schematizzare i fenomeni idrologici (precipitazione e infiltrazione del terreno) e la presenza di opere infrastrutturali (canali, strade, edifici, tombini, casse di espansione, etc).

Dal punto di vista fisico-matematico il software di calcolo Flo-2D si basa su modello alle differenze finite basato sulla conservazione dei volumi e risolve le equazioni di De Saint Venant:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \text{equazione di continuità}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \frac{U}{g} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} = i_f - J \quad \text{equazione dinamica}$$

nelle otto potenziali direzioni di deflusso su una griglia di elementi quadrati secondo il seguente schema. Dove i termini corrispondono a: Q portata, A area, U velocità, y tirante idrico, il gradiente idraulico e J cadente idraulica



L'equazione di continuità esprime il bilancio della massa entrante e uscente da una generica cella mentre l'equazione del moto esprime, per la medesima cella, l'equilibrio energetico. Il programma GDS genera una griglia a maglia quadrata ed associa ad ogni cella un valore di elevazione, interpolando i dati del DTM, e un valore di scabrezza di Manning. La progressione dell'onda di piena nel dominio di calcolo è controllata dalla topografia e dalla scabrezza superficiale. L'algoritmo risolve

le equazioni del moto e della conservazione dei volumi, una alla volta, nelle otto possibili direzioni di deflusso e tra due elementi della griglia ad ogni step temporale calcola i parametri idraulici: pendenza, tirante idrico, velocità del flusso e portata.

Il modello di propagazione bidimensionale, il Flo2D, è basato sul principio di conservazione del volume e simula i deflussi superficiali non-confinati utilizzando dei dati topografici estrapolati da un modello digitale del terreno, o da una mappa di base digitalizzata. Consente quindi di simulare il moto dell'acqua in canali, studiare fenomeni non confinati, e ricavare quindi le aree inondate, il trasporto solido e fenomeni a esso legati.

Il software, applicando l'equazione completa del moto di un'onda dinamica ed uno schema centrale alle differenze finite con otto potenziali direzioni di flusso, simula un'inondazione su una topografia complessa e con una data scabrezza.

L'output della simulazione fornisce informazioni quali la profondità massima del flusso e le velocità massime raggiunte, variabili temporanee (tiranti), energia specifica, dati di pressione (sia statica che dinamica) e inoltre le vie di deflusso possono essere visualizzate graficamente.

Un modello in Flo2D è composto da una serie di componenti: pioggia caduta (rainfall), flusso nei canali, flusso in strada, infiltrazione, evaporazione, argini e altre grandezze fisiche, costruiti su di una griglia di elementi con dimensioni comprese tra i 25 ft e i 500 ft, e numero degli teoricamente illimitato. La componente riferita agli argini (levees) può ad esempio essere utilizzata per testare la mitigazione della propagazione nello spazio conseguente alla loro presenza. Il flusso nelle strade viene simulato come il moto in un canale rettangolare, praticamente in maniera monodimensionale a differenza dei flussi non confinati in cui non si può prescindere da un approccio bidimensionale. Se il problema è misto, vengono anche calcolate le interazioni tra strade ed elementi della griglia circostanti, considerando nel bilancio finale della cella, gli scambi di flusso tra i vari elementi.

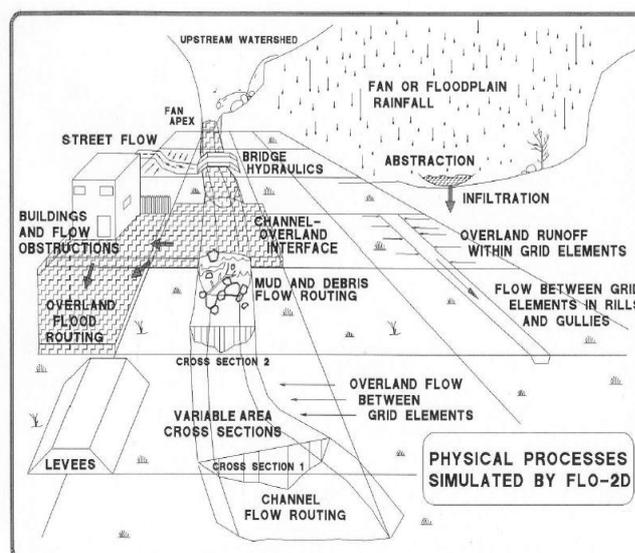


Figura 11 - Fenomeni fisici simulabili con il Flo 2D

Ogni simulazione richiede un idrogramma di piena o un idrogramma di pioggia. Il Flo2D è in grado di generare un idrogramma di flusso in una specifica zona, utilizzando un modello afflussi-deflussi nella parte a monte del bacino.

L'approccio bidimensionale viene compiuto tramite l'integrazione numerica delle equazioni del moto e di conservazione del volume. L'equazione del moto in Flo2D è meglio definita come quasi-bidimensionale e viene risolta elaborando, per ciascuna direzione del flusso (si ricorda che il modello studia le 8 potenziali direzioni di flusso), i valori medi delle velocità del flusso sugli elementi della griglia. Il calcolo delle velocità per le singole direzioni è essenzialmente monodimensionale, e viene risolto indipendentemente dagli altri sette.

L'equazione di continuità e quella del moto espresse in forma differenziale, sono risolte dal Flo2D con uno schema numerico centrale alle differenze finite. Questo algoritmo esplicito risolve l'equazione del moto in funzione della velocità di flusso attraverso il confine di un elemento di griglia, un elemento per volta. La stabilità di questo schema numerico è basata su uno specifico criterio di controllo della dimensione della variabile computazionale tempo.

La simulazione è condotta inizialmente sulla griglia, e in un secondo momento viene determinato il deflusso nel canale. Successivamente, se sono state introdotte nella geometria di base anche le strade, viene calcolato lo scarico stradale e per ultimo il deflusso dell'acqua nelle 8-direzioni.

Il controllo dei risultati di una simulazione parte dalla verifica della conservazione del volume di tutto il modello restituita tra gli output del software. Verificandone la correttezza, si ha una garanzia sulla stabilità del modello e sulla sua accuratezza. Il volume di afflusso, quello di efflusso, il cambio nell'acqua immagazzinata, e quella persa per infiltrazione ed evaporazione vengono sommate alla fine di ogni timestep. La differenza tra il volume totale di afflusso e la somma tra deflusso, immagazzinamento e perdite, rappresenta la conservazione del volume.

6.3 MODELLO IDRAULICO CON APPROCCIO A PARAMETRI CONCENTRATI

Generalmente nel modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi il bacino idrografico viene considerato come un sistema soggetto ad ingresso variabile nel tempo e nello spazio dell'intensità di pioggia (input), la cui uscita è rappresentata dall'andamento della portata nel tempo (output) defluente attraverso la sezione di chiusura. La risposta del sistema dipende dalla variabilità spaziale e temporale sia delle caratteristiche dell'evento pluviometrico, che di quelle geopedologiche e morfologiche del bacino idrografico.

Poiché non è possibile una conoscenza completa di tutti i processi che influenzano la risposta idrologica del bacino, nel modello idrologico la complessità del sistema reale viene semplificata, esaltando le grandezze fondamentali e trascurando gli elementi ritenuti secondari.

Nel modello idrologico fisicamente basato a parametri distribuiti la complessità del sistema viene rappresentata attraverso tutti i fenomeni fisici coinvolti. Oltre a rappresentare la relazione input-output, sono riprodotte le relazioni interne fra le variabili idrologiche.

Adottando la schematizzazione spaziale a griglia (raster), è possibile infatti attribuire ad ogni cella le informazioni relative a morfologia del bacino, sviluppo del reticolo idrografico, caratteristiche idrogeologiche del suolo, (anche eventualmente carico inquinante immesso), afflusso meteorico, ecc. che vengono utilizzate nelle varie equazioni di bilancio e di trasferimento.

Il modello restituisce una descrizione dei processi funzionanti in un sistema idrologico in maniera puntuale, mediante la ricerca della soluzione delle equazioni differenziali, esprimenti i

bilanci di massa, di quantità di moto e, quando necessario, di energia, che governano i processi medesimi.

Nonostante le ipotesi semplificative necessarie a risolvere le equazioni che governano i vari processi, tali modelli richiedono una cospicua mole di dati e notevoli tempi di calcolo.

Per i bacini idrografici oggetto di studio le variabili che concorrono alla definizione del problema sono:

- idrogrammi di piena;
- durata dell'evento di piena;

I parametri di input sono inseriti nella cella del dominio di calcolo in corrispondenza dell'inizio dei compluvi oggetto di analisi.

Il dato di output per ogni cella risulta essere il deflusso superficiale, che viene elaborato nel suo insieme nel modello idraulico su dominio bidimensionale in funzione delle equazioni di moto ed energia che regolamentano il suo trasferimento in funzione delle condizioni morfologiche del percorso.

6.4 INDIVIDUAZIONE AREE INONDABILI

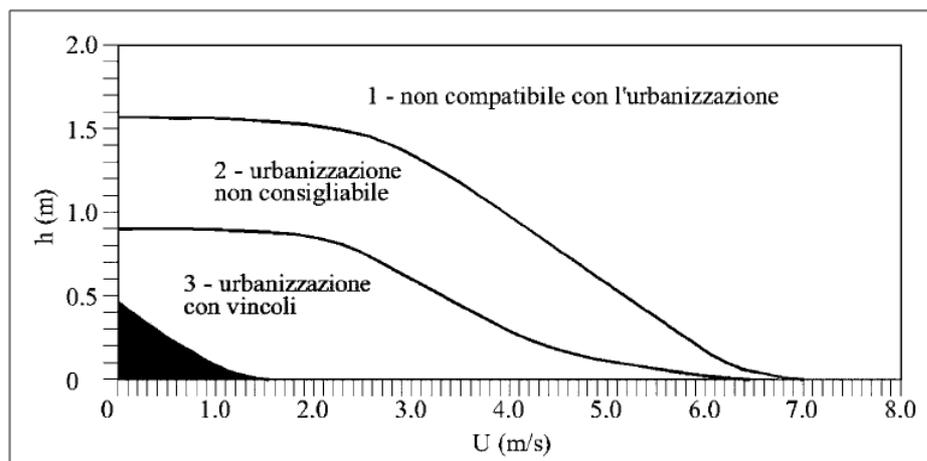
L'indicazione di allagamento di una superficie non rappresenta di per sé un fattore di pericolosità; d'altronde, particolari condizioni di allagamento, possono generare condizioni di pericolo per persone e/o cose presenti nelle aree in cui esse si verificano.

Oltre al tirante idrico, i fattori che influiscono sul livello di pericolosità sono la velocità di scorrimento idrico e la persistenza del fenomeno. A tal proposito, l'Autorità di Bacino del Tevere propone una serie di approcci per la delimitazione delle fasce fluviali, definendo tre differenti tipologie di inondazione:

- Aree di inondazione diretta, in immediata comunicazione con il corso d'acqua, dove l'inondazione è rapida e le velocità di deflusso sono relativamente elevate;
- Aree di inondazione indiretta, inondate solo attraverso passaggi ristretti che limitano drasticamente la rapidità di allagamento;
- Aree di inondazione marginale, in cui la velocità e l'altezza idrica sono talmente basse da non causare seri pericoli alle persone.

Per la determinazione delle aree marginali, l'AdB del Fiume Tevere ha fatto riferimento al diagramma seguente, diagramma velocità- tirante, in cui tramite curve a uguale spinta totale sono determinate combinazioni di diversa pericolosità.

Vengono così definite aree "*marginali*", quelle ricadenti nella porzione scura del grafico seguente



fonte: A.B. Tevere, 2002

In definitiva viene messo in evidenza il fatto che le condizioni di rischio non dipendono solo dalla presenza/assenza d'acqua e dall'entità del tirante idrico ma anche dal fattore velocità di scorrimento (valutata localmente) che gioca un ruolo nell'attribuzione del livello di danno effettivo.

Nel presente studio, secondo una prassi condivisa con l'AdB Puglia, si è preferito escludere dalla pericolosità idraulica le aree marginali ottenute adottando la seguente relazione matematica:

$$h + 0.38 v > 0.2$$

6.5 GEOMETRIA E IMPOSTAZIONE DEL MODELLO MATEMATICO BIDIMENSIONALE

La ricostruzione della geometria del modello bidimensionale ha riguardato un dominio di calcolo comprendente il reticolo oggetto di studio esteso verso monte fino all'estensione del bacino idrografico e verso valle fino all'intersezione del reticolo con l'area di realizzazione dell'impianto, lungo la Strada Vicinale Alfieri.

La geometria è stata ricostruita dal punto di vista altimetrico sulla base del DTM della Regione Puglia con precisione del dato a 8mx8m integrato con i dati del Lidar con precisione 1mx1m sull'intera area del dominio analizzato.

Nel modello è stata generata una griglia di calcolo con cella **5x5 m**.

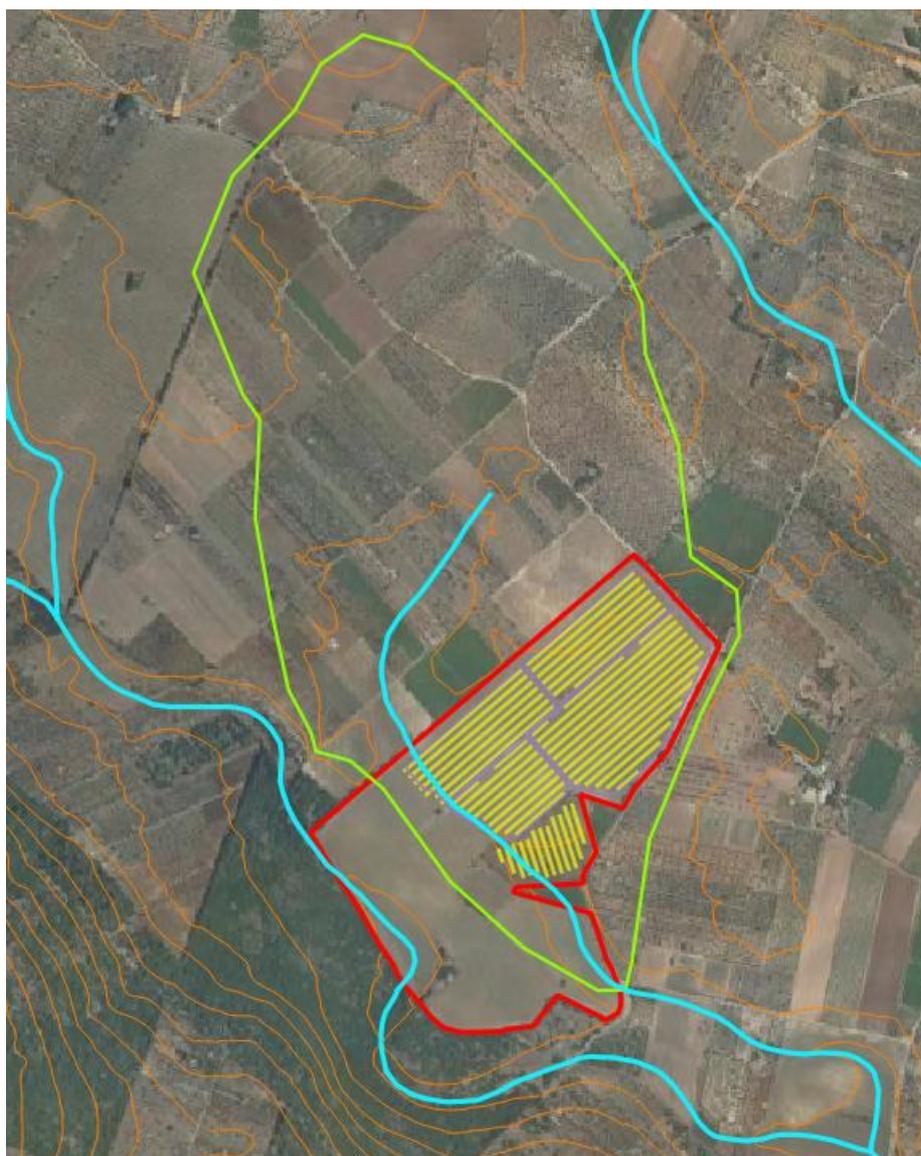


Figura 12 – Dominio di calcolo oggetto di analisi

La scabrezza nell'intero dominio è stata assunta pari 0.04 di Manning.

Nell'impostazione del modello di calcolo, in diverse celle lungo il limite di valle del dominio di calcolo, laddove è presente la traccia del compluvio che poi prosegue verso valle, è stata inserita la funzione

di uscita di flusso dal sistema (outflow element) necessaria per consentire il deflusso al di fuori del dominio computazionale evitando erronei punti di accumulo.

Come dati di input nel modello elaborato è stato inserito l'idrogramma di piena per il tempo di ritorno 200 anni in corrispondenza dell'inizio del compluvio a monte dell'area di intervento.

La durata della simulazione è stata assunta pari a 2.60 ore, leggermente maggiore della massima durata dell'idrogramma considerato (2.1 ore) al fine di ottenere nelle celle di uscita un idrogramma il cui ramo discendente sia rappresentativo dell'esaurimento della piena, ottenendo così la conservazione dei volumi.

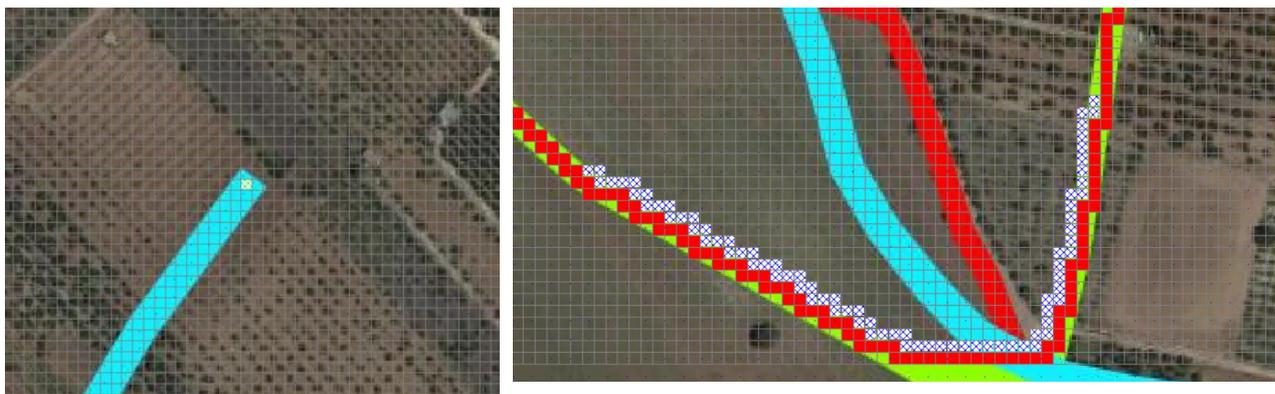


Figura 13 – Geometria del modello di calcolo con celle di outflow e inflow

6.6 RISULTATI DELLA SIMULAZIONI 2D – STATO DI FATTO

I risultati della simulazione relativa alla condizione dello **stato di fatto**, per il tempo di ritorno 200 anni, riportati di seguito in alcuni stralci, dopo aver filtrato i risultati in base all'equazione di vulnerabilità riportata in precedenza e in uso presso l'AdB Puglia, mostrano le modalità con cui le portate di piena defluiscono nel compluvio e nelle aree oggetto di intervento.

In primo luogo, si può osservare come i deflussi idrici non interessano l'area di realizzazione dell'impianto che pertanto risulta in condizioni di sicurezza idraulica.



Figura 14 – Tiranti idrici (tempo di ritorno 200 anni)

In generale, sul dominio oggetto di analisi, la portata di piena a 200 anni defluisce lungo il compluvio occupando una fascia più ampia del compluvio stesso, compresa tra 30-130 m e con tiranti massimi di circa 40-60 cm, fatta eccezione per due aree morfologicamente depresse situate lungo il compluvio stesso, una in prossimità della testa del compluvio e l'altra a monte della strada sterrata

parallela al limite Nord dell'area di intervento dove i deflussi si accumulano raggiungendo tiranti dell'ordine di 1.10-1.20 m.

I deflussi idrici, giunti alla sopra citata strada sterrata, si esauriscono e non procedono oltre verso l'area di intervento che pertanto risulta in condizioni di sicurezza idraulica.

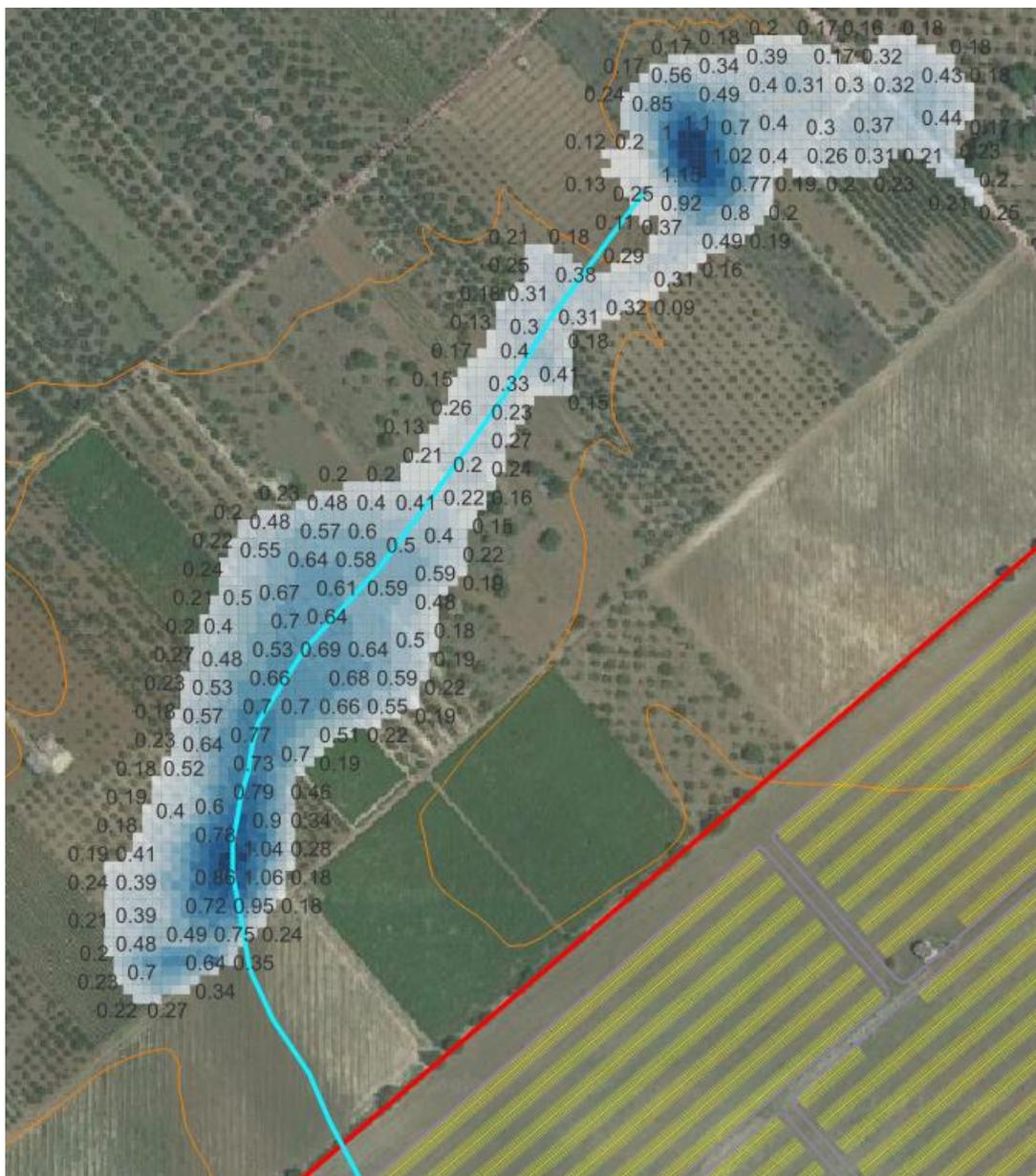


Figura 15 – Stralcio di dettaglio tiranti idrici in prossimità nell'area di intervento

7 CONCLUSIONI

Concludendo, dalle verifiche idrauliche effettuate, risulta quanto segue.

Per quel che riguarda l'area in cui si prevede la realizzazione dell'impianto, la stessa risulta in condizioni di **sicurezza idraulica** poiché a seguito delle verifiche eseguite non risulta interessata da deflussi idrici.

Per quel che riguarda il cavidotto di vettoriamento, per la sua realizzazione in corrispondenza delle interferenze individuate si procederà come di seguito:

- per i tratti in interferenza con aree ad alta, media e bassa pericolosità idraulica, risultando gli stessi alquanto estesi, soprattutto nel tratto in cui il reticolo perimetrato procede pressoché parallelo alla strada su cui si prevede la posa del cavidotto, si procederà mediante scavo a cielo aperto, posa del cavidotto e ripristino dello stato dei luoghi, per lasciare invariato il regime idraulico a monte e a valle dell'area interessata. Per il rinterro della sezione di scavo dovrà essere utilizzato materiale non facilmente erodibile (ad esempio misto cementato o similare);
- per i tratti in interferenza con reticoli idrografici non perimetrati si procederà mediante la posa in opera del cavidotto adottando tecnologie no-dig, ovvero senza scavo, mediante TOC, al fine di non alterare in nessun modo lo stato dei luoghi durante la realizzazione degli interventi di progetto.

Infine, in fase di esecuzione delle opere, inoltre, soprattutto in corrispondenza delle aree a pericolosità idraulica, dovranno essere adottate particolari misure preventive di protezione per le maestranze, per garantire la loro sicurezza: in caso di eventi meteorici si procederà a sospendere temporaneamente i lavori che potranno riprendere al termine dell'evento piovoso ed eventualmente dopo l'aggettamento delle acque di pioggia presenti nella trincea di scavo.