

Allegato 1 – Modellazione idraulica monodimensionale HEC-RAS

Premessa

Nel caso della Diga di Penne, il Consorzio di Bonifica Centro gestore della diga di Penne, in ottemperanza della Circ. 1125, nel 1986 ha commissionato all'Università dell'Aquila lo studio dell'onda di piena a seguito di funzionamento degli organi di scarico. Lo studio è stato svolto utilizzando il modello DAMBRK, sviluppato presso il U.S. National Weather Service. Si tratta di uno dei primi strumenti che ha consentito di calcolare idrogrammi di piena in uscita da serbatoi, lo sviluppo di brecce e la propagazione dell'onda risolvendo le equazioni di De Saint Venant.

La mappatura dell'area esondata è stata ottenuta dall'interpolazione dei livelli di piena stimati nelle sezioni di calcolo, consentendo una visione di insieme della fenomenologia ma rimanendo di carattere puramente indicativo³⁶.

Per validare i risultati ottenuti mediante il processo di attualizzazione si è scelto di modellare nuovamente il sistema sfruttando software più recenti e con supporti topografici dotati di maggiore risoluzione in grado di mappare i risultati più dettagliatamente. Nel presente allegato si riporta la modellazione monodimensionale, nell'allegato 2 quella bidimensionale.

Inquadramento territoriale e breve descrizione dell'opera

L'estensione di alveo fluviale sottoposto a verifica si estende a circa 25km a valle della diga di Penne. Il fiume Tavo si sviluppa entro una valle stretta e incisa fino all'altezza del Ponte S. Pellegrino posto 4.67 Km a valle dell'invaso. Procedendo verso valle l'alveo progressivamente si allarga assumendo geometria delle sezioni caratterizzata dalla presenza di un alveo di magra, di un alveo ordinario e di un alveo di inondazione sviluppato su aree golenali sempre di maggiore estensione.

L'opera di sbarramento è a gravità, del tipo zonato costituita da un nucleo impermeabile interno composto da terre limo-argillose e da contronuclei in materiale permeabile. La descrizione dettagliata dell'opera di sbarramento è riportata negli studi storici. Nella tabella seguente se ne riportano le caratteristiche geometriche principali.

Quota di coronamento	259,5 m s.l.m.
Altezza massima	34,00 m
Lunghezza del coronamento	438,00 m

³⁶ Remedia.

Larghezza del coronamento	6,00 m
Sviluppo del coronamento	438.00 m
Franco	2,00 m
Quota massima di regolazione	256,00 m s.l.m.
Quota massima invaso	257,50 m s.l.m.
Quota massimo svaso	227,00 m s.l.m.
Capacità di regolazione	8,8 10 ⁶ m ³
Capacità di laminazione	1,3 10 ⁶ m ³
Volume corpo diga	520.00 m ³

Tabella 0.1 - Caratteristiche geometriche diga di Penne

Software utilizzati

Per l'area di studio sono disponibili dati geografici geo-referenziati (di coordinate note in un sistema di riferimento), che per essere visualizzati e analizzati necessitano di un sistema GIS (sistema informativo computerizzato). L'aspetto principale è la rappresentazione geometrica, codificata attraverso due tipologie principali di dati: i dati vettoriali e raster. Questi si adattano ad usi diversi, i primi sono particolarmente validi per rappresentare i dati che variano in modo discreto, i secondi alla rappresentazione di dati continui (ad esempio un modello digitale del terreno). Ai dati geometrici possono essere associati ulteriori valori (numerici, testuali) a formare il *geo-database*. Il software scelto per gestire e processare i dati geografici è QGIS, un software completamente gratuito in grado di gestire qualsiasi operazione GIS, inclusa la produzione cartografica, la gestione di dati, l'elaborazione dei dati e l'analisi geografica. La natura open source del programma consente di installare molti plugin in grado di automatizzare i processi di elaborazione riportati in seguito.

Per lo studio idraulico, si è scelto di utilizzare il codice di calcolo HEC-RAS (River Analysis System), sviluppato dall'United States Army Corps of Engineering (USACE), Hydrological Engineering Center (HEC) come software di modellazione numerica. Tale scelta è stata dettata dall'affidabilità del codice in quanto utilizzatissimo in tutto il mondo, dovuto essenzialmente alla sua natura freeware, e alla possibilità di utilizzare specifici plugin per la generazione della geometria.

La costruzione del modello è realizzata in più fasi:

- Immissione delle relative alla geometria delle sezioni idriche lungo l'asta fluviale;
- Caratterizzazione, secondo lo standard previsto dal software HEC-RAS delle sezioni 'singolari', ovvero caratterizzate da discontinuità o da presenza di pile in alveo o di possibili impalcati di ponti a campata unica;

- Caratterizzazione delle connessioni tra zone dell'alveo che si presentano a quote basse ma non sono necessariamente interessate dalla corrente prima del superamento delle sponde principali (ovvero definizione dei cosiddetti 'levees' o argini naturali)
- Eventuale inserimento di sezioni aggiuntive per meglio curare l'interpolazione geometrica proposta dal software
- Taratura idraulica e costruzione del profilo della corrente corrispondente al transito di un'assegnata portata.

Creazione della geometria del sistema

La geometria dello schema idraulico prevede l'utilizzo delle stesse sezioni presenti negli studi storici, in modo da poter confrontare anche i valori del tirante idrico per ogni valore di portata assegnato. La geometria delle opere interferenti con l'alveo (quali i ponti, per esempio) è stata mantenuta uguale a quella riportata nelle tavole grafiche dei citati studi³⁷³⁸.

Al fine di velocizzare il lavoro ed ottenere una rappresentazione fedele del sistema si è scelto di pre-processare la geometria in ambiente GIS, in particolare è stato utilizzato il software QGIS nella versione 3.2.0. Si tratta di un GIS open-source, utilizzabile senza licenza.

A seguire si riportano i passaggi effettuati durante questa prima fase:

- Definizione dell'asse fluviale;
- Inserimento delle sezioni riportate negli studi storici e implementazione di ulteriori sezioni di calcolo;
- Rappresentazione dei bank station (linee utilizzate dal software per definire le distanze fra le sezioni);
- Generazione ed esportazione della geometria in formato compatibile con il software di modellazione idraulica HEC-RAS.

Le possibilità offerte dal software per la definizione dell'asse fluviale sono diverse avendo a disposizione il tracciato planimetrico riportato sulle tavole grafiche georeferenziate degli studi degli anni '90, la mappa satellitare reperibile da diverse fonti (Google, Bing, ecc.), la carta tecnica regionale messa a disposizione dal geoportale della Regione Abruzzo e infine il modello digitale del terreno.

³⁷ Remedia Gianrenzo, «Indagine sulla propagazione dell'onda di piena a seguito di ipotetico collasso dello sbarramento di Penne sul fiume Tavo».

³⁸ Remedia, «Caratteristiche delle onde di piena a seguito di funzionamento degli organi di scarico».

Per garantire la congruenza geometrica ed idraulica si consiglia di definire il tracciato sfruttando il modello digitale del terreno. Il tool *Terrain Analysis* di SagaGIS, (eseguibile direttamente in QGIS) consente di generare il sistema di canali utilizzando come unico dato di input il modello del terreno DTM.

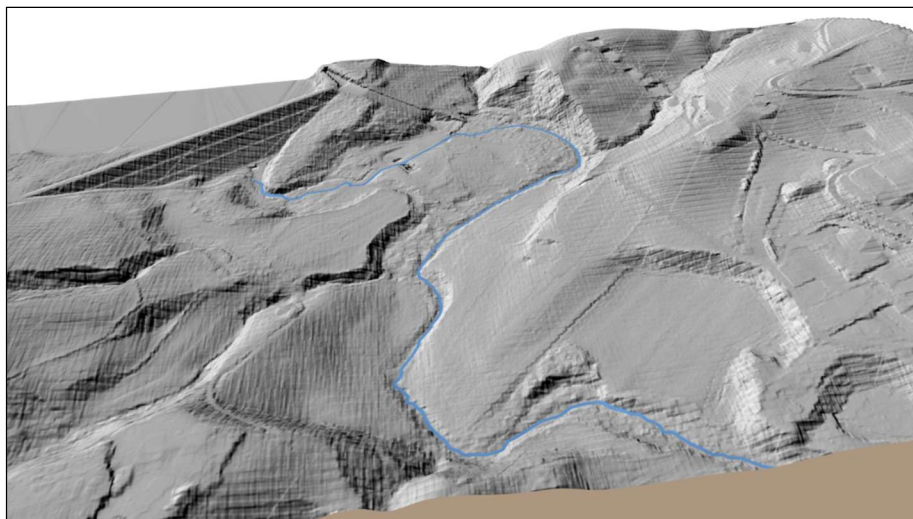


Figura 38 – Porzione di dtm utilizzato per definire l'asse fluviale (riportato in azzurro) a valle della diga di Penne.

Un ulteriore processo che può essere automatizzato sfruttando la potenzialità degli strumenti GIS è la generazione delle sezioni trasversali. Per questo scopo si è usato il tool *Cross Profiles*, definendo semplicemente l'asse fluviale, la lunghezza delle sezioni che si vogliono generare e la distanza massima fra due sezioni consecutive. Una volta generate è necessario controllare che non si verifichino intersezioni fra le linee appena definite (specialmente in corrispondenza delle anse fluviali), in quanto il software di calcolo non consente di gestire una tale eventualità. Alle sezioni così generate si sono aggiunte quelle georeferenziate riportate negli studi effettuati dal Prof. Remedia, in modo da confrontare, una volta terminata la simulazione, i livelli idrici ottenuti con quelli definiti negli studi storici.

La generazione della geometria del modello di calcolo è affidata a RiverGIS. Questo potente strumento consente di identificare le sezioni mediante un numero progressivo crescente da valle verso monte (dato usato dal codice di calcolo per il posizionamento delle sezioni lungo l'asta fluviale), proiettare le informazioni altimetriche del DTM sulle linee di sezione precedentemente definite ed esportare i dati in un formato gestibile dal software di calcolo HEC-RAS.

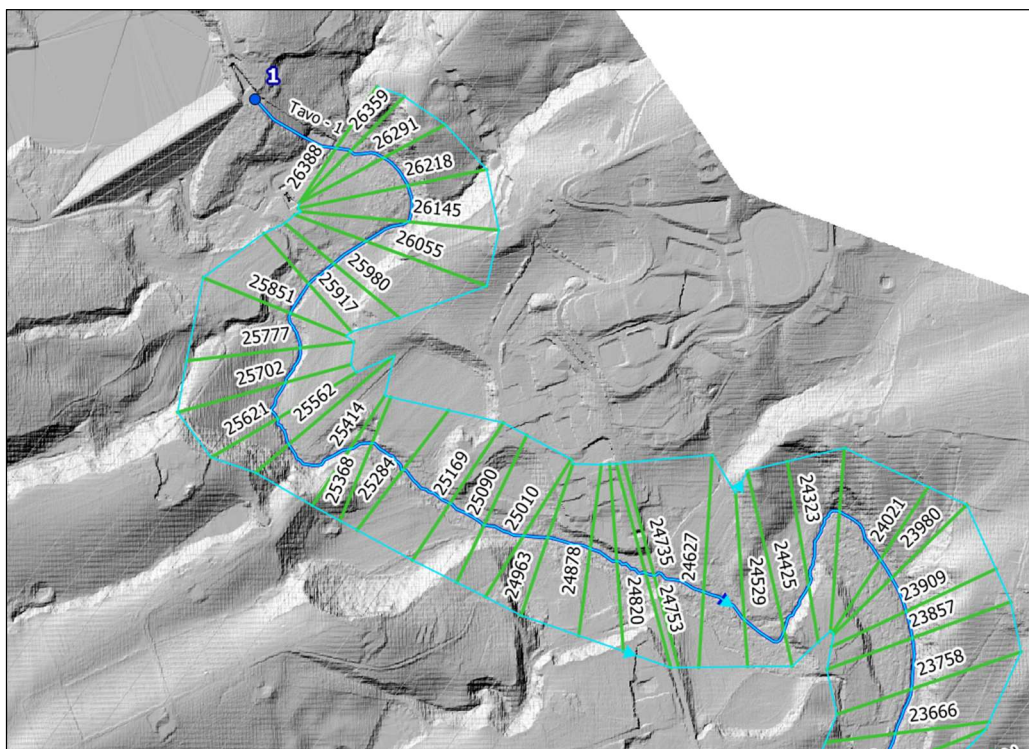


Figura 39 - Particolare geometria a valle della diga di Penne, definita e rappresentata in ambiente GIS

Una volta importata la geometria in HecRas è necessario definire, sezione per sezione, i limiti del canale principale e i punti caratterizzanti gli argini (levee) e inserire le geometrie delle opere trasversali presenti. Per la digitalizzazione dei ponti e delle briglie riportate nelle tavole storiche scansionate, ci si è avvalsi di un software (GetData - graph digitizer) di digitalizzazione in grado di restituire, una volta fissata opportunamente la scala grafica, le coordinate dei punti lungo una curva o una spezzata sia manualmente (cliccando con il puntatore del mouse) che automaticamente nel caso di file vettoriale.

La rappresentazione del terreno a matrice di punti nasconde molte insidie se non governata da un'adeguata supervisione, necessaria a riconoscere forme antropiche in un terreno normalmente naturale. In generale, in corrispondenza delle infrastrutture di attraversamento o di protezione spondale, è spesso necessario rivedere la congruenza e continuità delle quote, onde evitare innaturali oscillazioni di andamenti altrimenti rettilinei.

Tali premesse sono utili a comprendere la non immediatezza della costruzione della geometria idraulica nel momento in cui, per meglio seguire le variazioni planimetriche dell'alveo, si interpongono molte nuove sezioni a quelle inizialmente posizionate negli studi 1993 e 1996.



Figura 40 - Verifica congruenza DTM a fronte dell'incompatibilità riscontrata dalle immagini satellitari

Laddove si sono ritrovate incongruenze planimetriche si è anche ricontrollata la posizione effettiva dell'alveo attraverso riscontro con immagini d'epoca. È il caso della sezione n. 23 che, se osservata oggi vede la posizione dell'alveo spostata rispetto a quanto documentato dal DTM. Essendo però il rilievo LIDAR risalente al 2009, si è potuto riconfermarlo mediante confronto con l'immagine Google Earth datata 2009.

Altre incongruenze si sono notate anche tra analoghe sezioni utilizzate negli studi 1993 e 1996, alle quali si è ovviato confermando le rilevazioni del 1996. Infine, diversi controlli di congruenza altimetrica sono stati necessari per confermare la posizione degli impalcati di alcuni ponti.

Sollecitazione idraulica

La simulazione della propagazione dell'onda di piena in alveo necessita della definizione, oltre alla geometria del problema, delle opportune condizioni iniziali e al contorno. Nel presente studio si sono utilizzate le medesime sollecitazioni idrauliche definite dallo studio di propagazione delle onde di piena generate da manovre repentine sugli organi di scarico, riconducibili ai tre scenari seguenti:

- Livello del serbatoio coincidente con la quota massima di regolazione;
- Contemporanea apertura degli scarichi superficiali presidiati da paratoie e quelli profondi;
- Apertura dei soli scarichi profondi.

A cui sono associate le portate riportate in tabella, processate mediante una semplice modellazione in moto stazionario, senza quindi costruire l'idrogramma di piena.

Tabella 0.2 - Portate di calcolo

Livello idrico nell'invaso [m s.l.m.]		Organi di scarico	Portata massima [m ³ /s]
regolazione	256,00	Fondo	138,00
regolazione	256,00	Fondo + Superficie	186,00
massimo invasore	257,50	Fondo + Superficie	450,00

Lo scopo della modellazione idraulica è quello di confrontare i risultati storici ottenuti mediante il modello DMBRK riportati sulle tavole grafiche restituite, con i risultati ottenibili mediante l'uso di un supporto topografico di maggiore dettaglio. In modo da validare i risultati ottenuti dal processo di attualizzazione degli studi. Per questa ragione si è scelto di utilizzare lo stesso valore di scabrezza utilizzato negli studi, espresso mediante un coefficiente di Manning pari a 0.045 omogeneo per l'intera area di studio, benché l'uso di un coefficiente diversificato per il canale e le aree golenali opportunamente calibrato avrebbe condotto a risultati più fedeli.

Allegato 2 – Modello Hec 2D – Diga di Penne

Per la simulazione degli scenari di allagamento si è scelto di utilizzare un modello numerico puramente bidimensionale, sicuramente più indicato rispetto alla semplice modellazione monodimensionale. La differenza rispetto alla modellazione monodimensionale consiste nella schematizzazione del sistema; nel modello monodimensionale o quasi 2D il sistema è schematizzato (mediante canali e serbatoi legati fra loro da relazioni funzionali) e le equazioni utilizzate per la rappresentazione della propagazione dell'onda sono strettamente monodimensionali.

Come riportato nel Capitolo 1 la modellazione non necessita di particolari schematizzazioni, di conseguenza l'analisi è sicuramente meno soggettiva. La risoluzione prevede l'integrazione di equazioni bidimensionali per corrente a superficie libera in moto vario sfruttando l'informazione altimetrica distribuita, generalmente contenuta in un modello digitale del terreno.

In questo ambito si è scelto di utilizzare il codice di calcolo HecRas, un programma sviluppato dal Corpo degli ingegneri dell'esercito U.S.A. presso l'Hydrologic Engineering Centre (HEC) utilizzato per la modellazione mono e bidimensionale di reti di canali naturali e artificiali, River Analysis System (RAS). Il software è disponibile senza licenza e dalla versione 5.0.0. vi è anche la possibilità di effettuare simulazioni bidimensionali in moto vario (offre anche la possibilità di effettuare analisi combinate 1D-2D nello stesso modello in moto vario).

Il programma è in grado di risolvere **sia le equazioni di diffusione dell'onda 2D, che quelle complete di Saint Venant**, l'opzione è selezionabile dall'utente consentendo ampio controllo e flessibilità. Generalmente le equazioni di diffusione dell'onda sono più stabili e veloci da risolvere, mentre le equazioni di Saint Venant sono più corrette e applicabili in una più vasta gamma di casi.

L'algoritmo utilizzato dal solutore è **ai volumi finiti** (implicito). Attualmente è il metodo più utilizzato in quanto, rispetto alle tecniche differenziali ad elementi finiti fornisce una maggiore stabilità e robustezza.

Uno degli aspetti più importanti della modellazione bidimensionale è la discretizzazione spaziale. Il software è stato progettato per gestire **mesh strutturate** (ovvero triangolari) o **non strutturate** (poligonali); inoltre è in grado di gestire **maglie flessibili**, ovvero di dimensioni variabili, consentendo di aumentare la precisione in corrispondenza di singolarità geometriche riducendo la dimensione della maglia di calcolo, e anche di ridurre l'onere computazionale aumentando la dimensione in aree più regolari.

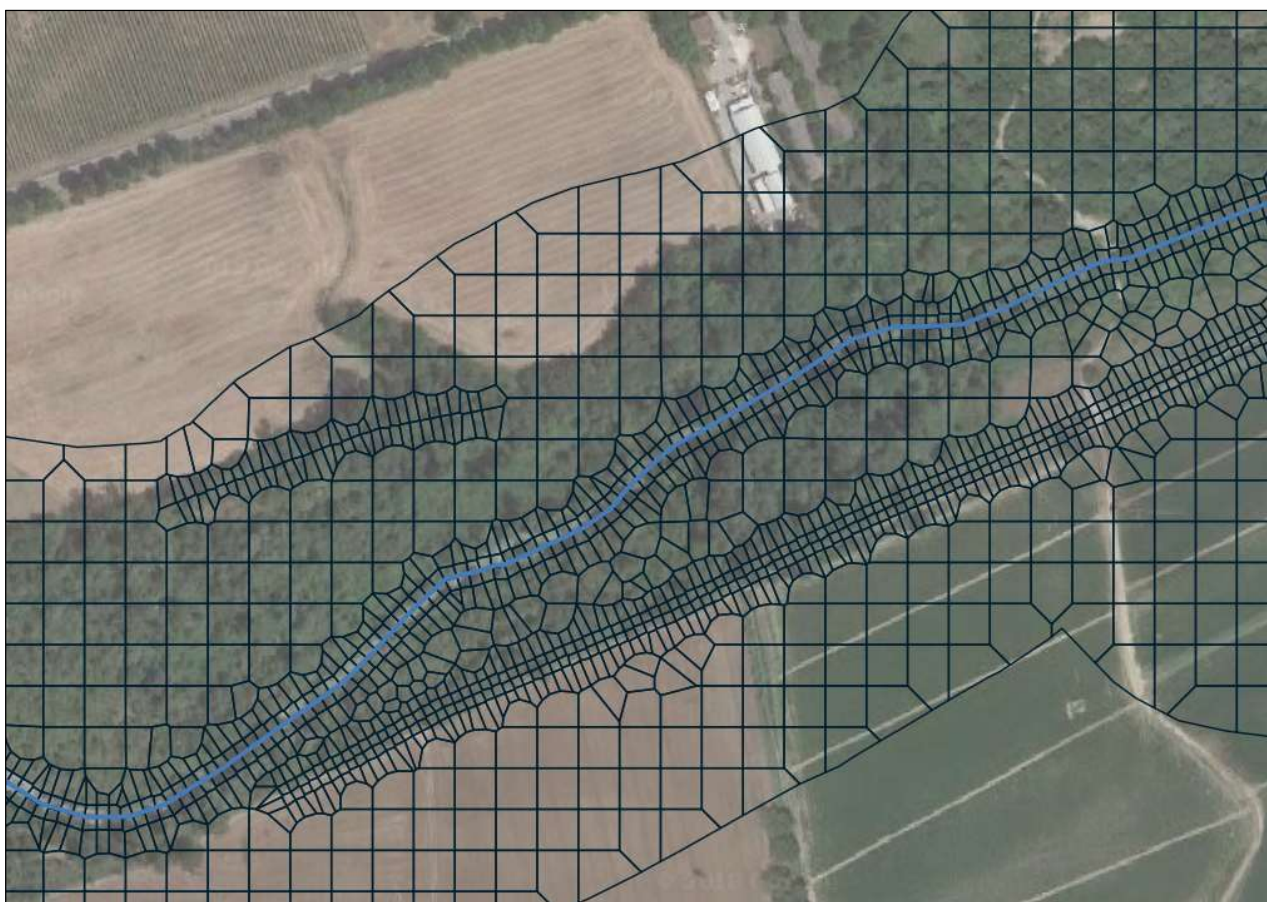


Figura 41 - Porzione di mesh non strutturata flessibile usata per la modellazione

Il modello è dotato di motori di calcolo a 64 e 32 bit programmati in modo da sfruttare l'architettura in parallelo e quindi risolvere più rapidamente il dominio in caso di sistemi multiprocessore³⁹.

Definizione del dominio di calcolo

Lo scopo primario del lavoro è quello di effettuare un confronto fra l'area allagata ottenibile con una modellazione puramente bidimensionale e le estensioni definite nei precedenti capitoli mediante una modellazione monodimensionale e i processi di attualizzazione.

Così come per la modellazione precedente si è scelto di pre-processare i dati in ambiente GIS e sfruttare un potente plugin denominato RiverGIS⁴⁰ per costruire ed esportare

³⁹ Gary W. Burner, CEIWR-HEC, «HEC-RAS 5.0 - 2D Modeling User's Manual» (US Army Corps of Engineers - Institute for Water Resources - Hydrologic Engineering Center (HEC), 2016).

⁴⁰ «RiverGIS 1.0 documentation».

la geometria in un formato compatibile con il software di modellazione idraulica HECRAS. In questa fase è necessario generare degli shapefile dotati di tutti gli attributi utili per definire la geometria del problema.

Per eseguire una modellazione bidimensionale è necessario definire il dominio di calcolo all'interno del quale può manifestarsi il deflusso idrico. Per ridurre i tempi di calcolo è consigliabile limitarne il più possibile l'estensione in modo da ottenere una mesh con una buona risoluzione ma senza eccessive celle di calcolo. La conoscenza dell'area potenzialmente esondabile riportata sulle tavole grafiche restituite fornisce un'ottima geometria di partenza; per definire il dominio di calcolo è sufficiente generare un buffer rispetto a questa (riportata in giallo nella figura seguente). Alla geometria definita si è assegnata una dimensione del lato della maglia computazionale estesa rispetto alla risoluzione del DTM, pari a 20m.

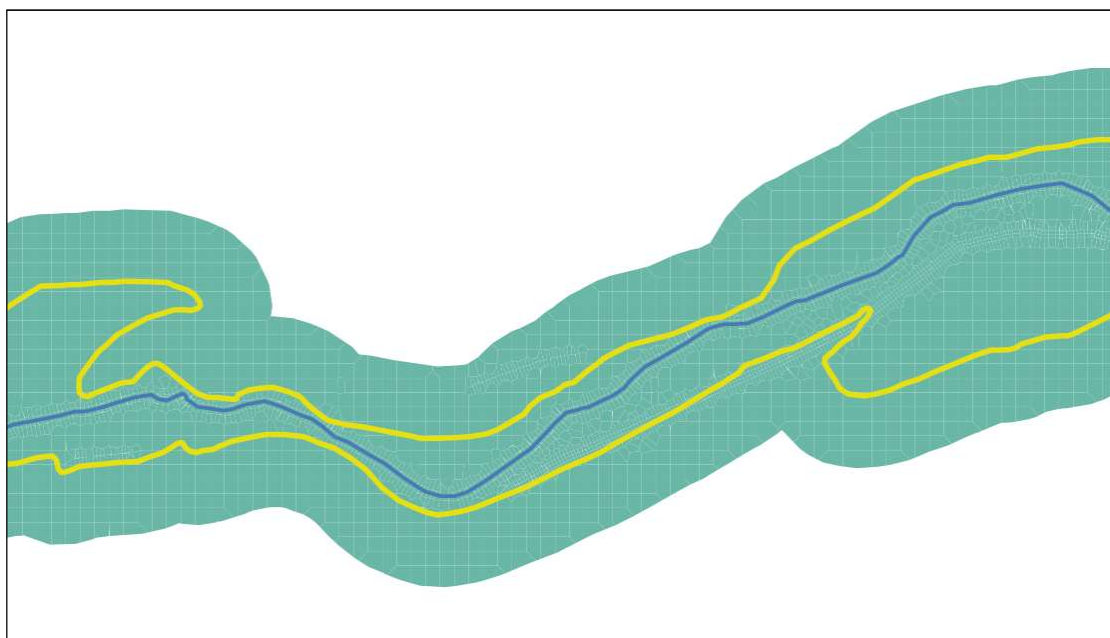


Figura 42 - Definizione dell'area computazionale a partire dall'area potenzialmente allagabile restituita

Per una migliore descrizione del fenomeno di propagazione è preferibile ridurre la maglia di calcolo in corrispondenza dell'alveo principale e delle opere di contenimento; per farlo si è scelto di utilizzare l'asse fluviale definito per la precedente modellazione e tracciare ulteriori linee in corrispondenza dei rilevati arginali (alle linee è stata assegnata una dimensione per il lato delle celle di calcolo pari a 5 m).

Il plugin RiverGIS utilizza le geometrie definite e i relativi attributi per costruire la maglia di calcolo. Il sistema di riferimento utilizzato in ambiente GIS deve coincidere con quello del modello del terreno caricato in RasMapper (strumento Gis di HecRas). In caso contrario le

geometrie generate sfruttando il plugin non saranno compatibili con i dati topografici caricati nel modello di calcolo. La maglia computazionale definita può facilmente essere salvata ed esportata in un formato compatibile con il software di calcolo HecRas. La griglia di calcolo finale è composta da circa 40.000 celle.

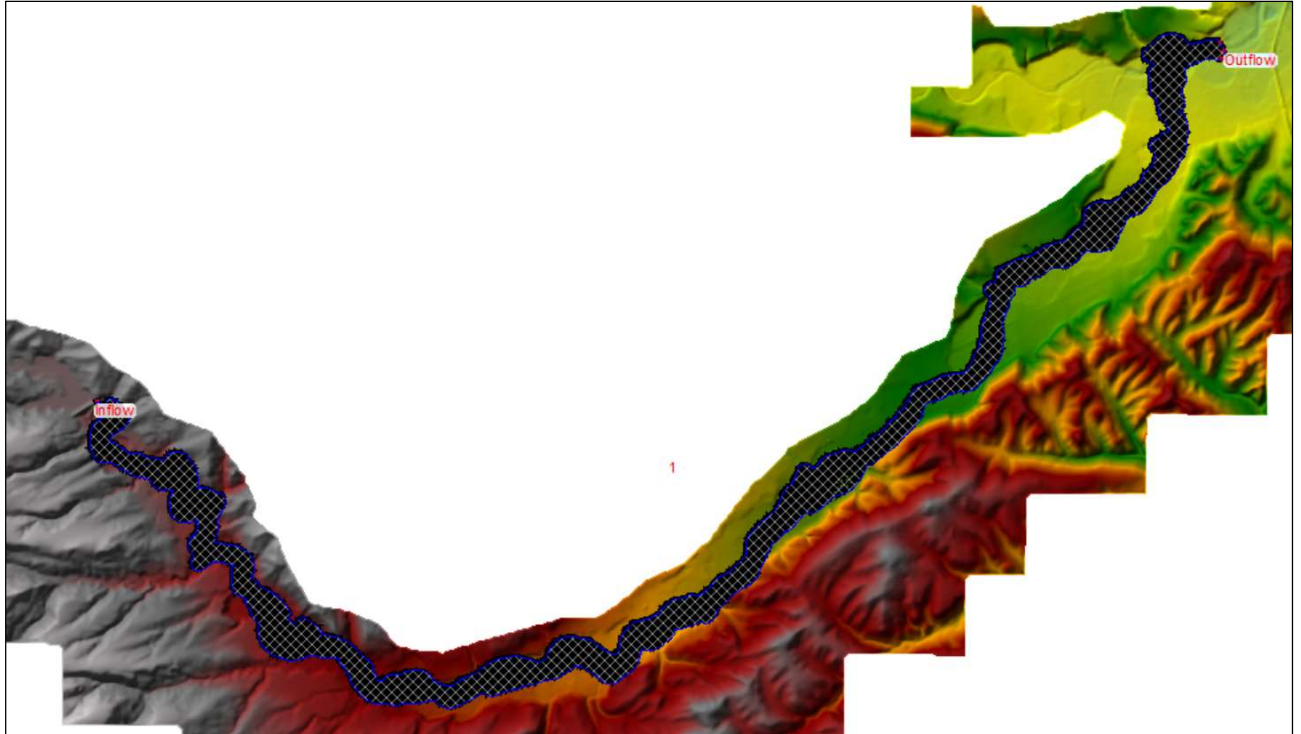


Figura 43 - Mesh di calcolo e modello digitale del terreno importati in HecRas

Ogni cella che compone l'area di deflusso bidimensionale è descritta dalle seguenti caratteristiche:

- *Cell Center*: è dove il pelo idrico è computato;
- *Cell Face*: sono le linee di contorno. Le facce sono generalmente segmenti lineari eccetto lungo il bordo dove possono essere spezzate;
- *Cell Face Point*: questi *face point* saranno il punto di collegamento tra le *lateral structures* e l'area 2D.

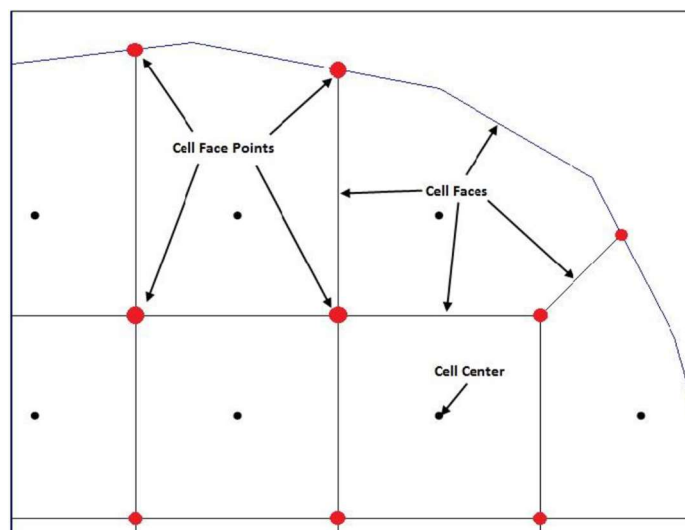


Figura 44 - Punti caratteristici delle celle di calcolo

La generazione della mesh può portare a criticità che vengono immediatamente segnalate dal software:

- Più di un “Cell Center” nella singola cella.
- Una cella non ha il “Cell Center”
- Il contorno della cella attraversa più celle

Queste devono essere manualmente corrette prima di poter passare alla computazione.

L'ultimo elemento necessario allo sviluppo della modellazione è la definizione della scabrezza, questa è rappresentata mediante il numero di Manning. Teoricamente la relazione empirica che lega questo coefficiente alle altre grandezze idrauliche vale solamente in caso di moto stazionario uniforme. L'utilizzo in moto vario deve prevedere correttivi che valutino la presenza delle accelerazioni e decelerazioni della corrente.

Nel caso di un alveo molto tortuoso o che presenta molti restringimenti e allargamenti della sezione di deflusso, è necessario incrementare il valore di Manning rispetto al valore indicativo riportato nei libri di riferimento⁴¹.

Lo scopo della modellazione eseguita è quello di *confrontare* i risultati ottenuti mediante il processo di attualizzazione. Così come per la modellazione monodimensionale, si è scelto di assumere *per congruenza* lo stesso coefficiente di scabrezza utilizzato nei modelli storici oggetto di studio⁴² (nonostante il software sarebbe in grado di gestire una variabilità spaziale del coefficiente). Si sottolinea che una condizione necessaria per ottenere risultati

⁴¹ Chow, *Open-Channel Hydraulics*.

⁴² Remedia, «Caratteristiche delle onde di piena a seguito di funzionamento degli organi di scarico».

idraulici attendibili è quella di far variare spazialmente il coefficiente di Manning; alcuni software⁴³ prevedono addirittura una correzione del coefficiente in funzione del tirante idrico presente.

Una volta terminata la modellazione è possibile visionare i risultati ottenuti in RasMapper, e se necessario, esportarli in formati compatibili con i maggiori software GIS. Di default sono generati i layer relativi alla profondità, estensione e velocità dell'onda sul terreno, ma sono molte le grandezze che possono essere rappresentate.

⁴³ «FLO-2D Software | Hydrologic and Hydraulic Modeling Software», s.d., <https://www.flo-2d.com/>.

Allegato 3 – Codici Matlab

Lettura delle geometrie e attributi contenuti negli shapefile

```
% Sezioni
sez=shaperead('Sezioni_Remedial.shp');
% Aree interessate dal deflusso nei tre casi di movimentazione degli organi di scarico
area450=shaperead('450_interp.shp');
poly1=polyshape([area450(:).X],[area450(:).Y]);
area186=shaperead('186_interp.shp');
poly2=polyshape([area186(:).X],[area186(:).Y]);
area138=shaperead('138_interp.shp');
poly3=polyshape([area138(:).X],[area138(:).Y]);
% Profili altimetrici definiti in corrispondenza delle sezioni
prof=shaperead('profiles_n.shp');
% Shapefile che consente di legare profili altimetrici e relative sezioni (line_fid)
line_fid=shaperead('line_fid');
```

Stampare i profili topografici ed i livelli idrici

```
for n=1:length([sez.fid])
c=find([sez.fid]==n);%individua la sezione corrispondente a fid=n
S=[[sez(c).X(1:2)]' [sez(c).Y(1:2)]']; %coordinate inizio e fine sezione

[in,out] = intersect(poly1,S); %intersezione sezione con area bagnata
din=sqrt(in(:,1).^2+in(:,2).^2); %calcola le distanze fra i punti di intersezione

[in2,out2] = intersect(poly2,S); %intersezione sezione con area bagnata
din2=sqrt(in2(:,1).^2+in2(:,2).^2); %calcola le distanze fra i punti di intersezione

[in3,out3] = intersect(poly3,S); %intersezione sezione con area bagnata
din3=sqrt(in3(:,1).^2+in3(:,2).^2); %calcola le distanze fra i punti di intersezione

Lid=[line_fid(find([line_fid.fid]==n)).LINE_ID]; %trova il LINE_ID corrispondente al fid
(legame sezione/profili)
q450=[line_fid(find([line_fid.fid]==n)).Q450].*ones(1,length(din)); %costruzione dei
vettori per i plot
q186=[line_fid(find([line_fid.fid]==n)).Q186].*ones(1,length(din2));
q138=[line_fid(find([line_fid.fid]==n)).Q138].*ones(1,length(din3));

% Determinazione del vettore per le quote del terreno (ordinata)
Z=([prof.LINE_ID]==Lid).*[prof.Z];
Z(Z==0)=[];
% Determinazione ascissa partendo da informazioni planimetriche
X1=([prof.LINE_ID]==Lid).*[prof.X1];
X1(X1==0)=[];
Y1=([prof.LINE_ID]==Lid).*[prof.Y1];
Y1(Y1==0)=[];
X=sqrt(X1.^2+Y1.^2); %ascissa
```



```

%Stampa figure
h=figure;
plot(X,Z,'k','Linewidth',1)
line(din,q450,'Linewidth',0.9)
line(din2,q186,'LineStyle','--','Linewidth',0.9)
line(din3,q138,'LineStyle','-','Linewidth',0.9)

title([line_fid(find([line_fid.LINE_ID]==Lid)).layer])
ylabel('Quota s.l.m [m]')
xlabel('Coordinate')
legend('Profilo da DTM','Livello Q=450 mc/s','Livello Q=186 mc/s','Livello Q=138 mc/s')
grid on
grid minor
%saveas(h,[line_fid(find([line_fid.LINE_ID]==Lid)).layer],'png');    %Salvare immagini

end

```

