



## REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA

### **STUDI, INDAGINI, ELABORAZIONI ATTINENTI ALL'INGEGNERIA INTEGRATA, NECESSARI ALLA REDAZIONE DELLO STUDIO DENOMINATO PROGETTO DI PIANO STRALCIO DELLE FASCE FLUVIALI (PSFF)**

## METODOLOGIE DI ANALISI

CODICE DOCUMENTO

ELABORATO

0 1 1 3

1.1

03	APR. 13	I.FRESIA	I.FRESIA	I.FRESIA	
02	LUG. 12	I.FRESIA	I.FRESIA	I.FRESIA	
01	GIU. 07	I.FRESIA	I.FRESIA	I.FRESIA	
REV.	DATA	REDAZIONE	VERIFICA	AUTORIZZAZIONE	MODIFICHE

#### DIREZIONE SCIENTIFICA DI PROGETTO

Prof. Ing. Marco Mancini

Dott. Geol. Giovanni Tilocca

#### SERVIZI DI INGEGNERIA

RAGGRUPPAMENTO TEMPORANEO DI IMPRESE



## INDICE

1.	ANALISI IDROLOGICA	1
1.1	Identificazione delle sezioni di calcolo delle portate	1
1.2	Caratterizzazione morfometrica e geomorfologica dei bacini elementari	1
1.3	Analisi quantitativa del reticolo di drenaggio	2
1.4	Metodo di stima delle portate al colmo	4
1.4.1	Criteri generali	4
1.4.2	Metodo razionale per la definizione delle portate al colmo	4
1.4.3	Modello TCEV per la definizione delle portate al colmo	15
1.4.4	Stima delle portate al colmo in sezioni influenzate dalla presenza di laghi artificiali	16
1.4.5	Stima delle portate al colmo sulle sezioni a valle di serbatoi artificiali.	18
1.4.6	Verifiche e confronti	19
2.	ANALISI IDRAULICA	20
2.1	Modello di calcolo ed approccio metodologico	20
2.2	Costruzione del modello numerico	21
2.2.1	Schematizzazione geometrica	21
2.2.2	Rappresentazione di attraversamenti e strutture	22
2.2.3	Coefficienti di scabrezza	23
2.2.3.1	Valutazione della scabrezza nei tratti di sezione maggiormente vegetati	26
2.2.4	Condizioni al contorno	30
2.2.5	Portate idrologiche in ingresso	32
2.3	Scenari di simulazione	32
2.4	Risultati delle simulazioni e analisi delle condizioni di deflusso	32
2.5	Attività di rilievo	33
2.5.1	Tipologia delle opere e loro identificazione	33
2.5.2	Codifica delle opere	34
2.5.3	Operazioni di rilievo	35
3.	ANALISI GEOMORFOLOGICA	36
3.1	Attività di rilievo	36
3.1.1	Documentazione di riferimento	36
3.1.2	Rilievo geomorfologico sulla base della ortofotocarta digitale	37
3.1.3	Rilievo geomorfologico sulla base della cartografia I.G.M. alla scala 1:25.000	38
3.1.4	Rilievo geomorfologico sulla base della carta tecnica regionale vettoriale	38
3.2	Metodologia di delimitazione della fascia C geomorfologica	39
3.2.1	Inviluppo delle forme fluviali rilevate sulla base della cartografia e delle ortofoto digitali	39
3.2.2	Individuazione del limite esterno della fascia C geomorfologica	40
3.2.2.1	Individuazione del limite della piana alluvionale	40
3.2.2.2	Valutazione preliminare degli effetti delle opere idrauliche e delle infrastrutture interferenti	41
3.2.3	Attività di sopralluogo	42

4.	ANALISI DELLA CAPACITÀ DI TRASPORTO SOLIDO	43
4.1	Valutazione del trasporto solido potenziale con il metodo idraulico	43
4.1.1	Formulazioni di Meyer-Peter e Muller, Engelund e Fredsoe, Smart e Jaeggi	43
4.1.2	Formulazione di Van Rijn	45
4.1.2.1	Calcolo del trasporto al fondo	45
4.1.2.2	Calcolo del trasporto in sospensione	46
4.2	Valutazione del trasporto solido potenziale con il metodo di Gavrilovic	47
4.2.1	Strato corazzato	49
5.	COSTRUZIONE DEI DATA BASE	51
5.1	Banca dati	51
5.1.1	Modello concettuale	51
5.1.2	Modello Logico - Fisico	52
5.1.2.1	Opere idrauliche	53
5.1.2.2	Vegetazione	54
5.1.2.3	Aree movimentazione inerti	54
5.1.3	Codifiche	54
5.1.4	Banca dati opere idrauliche: restituzione della scheda monografica, della cartografia ed interrogazioni	56
5.1.4.1	Atlante delle schede monografiche delle opere idrauliche	56
5.1.4.2	Cartografia scala 1:10.000 e tematismi delle opere idrauliche	56
5.1.4.3	Interrogazioni	56

## ALLEGATI

- ALLEGATO 1 - Definizione delle tabelle dei DB opere idrauliche, vegetazione e aree movimentazione inerti  
 ALLEGATO 2 - Schede di rilievo in sito delle caratteristiche della vegetazione in alveo e sulle sponde  
 ALLEGATO 3 - Schede di rilevamento in campagna delle opere idrauliche

## 1. ANALISI IDROLOGICA

### 1.1 Identificazione delle sezioni di calcolo delle portate

Le portate di piena caratteristiche vengono calcolate sulle sezioni dell'asta principale ubicate con il seguente criterio:

- sezione di testata;
- a monte e valle di ogni affluente con superficie  $\geq 10\%$  di quella del bacino principale delimitato dalla sezione a monte dell'affluente stesso;
- per ogni incremento del bacino residuo tra il 10% e il 20% del bacino principale delimitato dalla sezione posta immediatamente a monte.

Identificate le sezioni secondo i criteri sopradescritti, viene conseguentemente definita la schematizzazione dei sottobacini elementari.

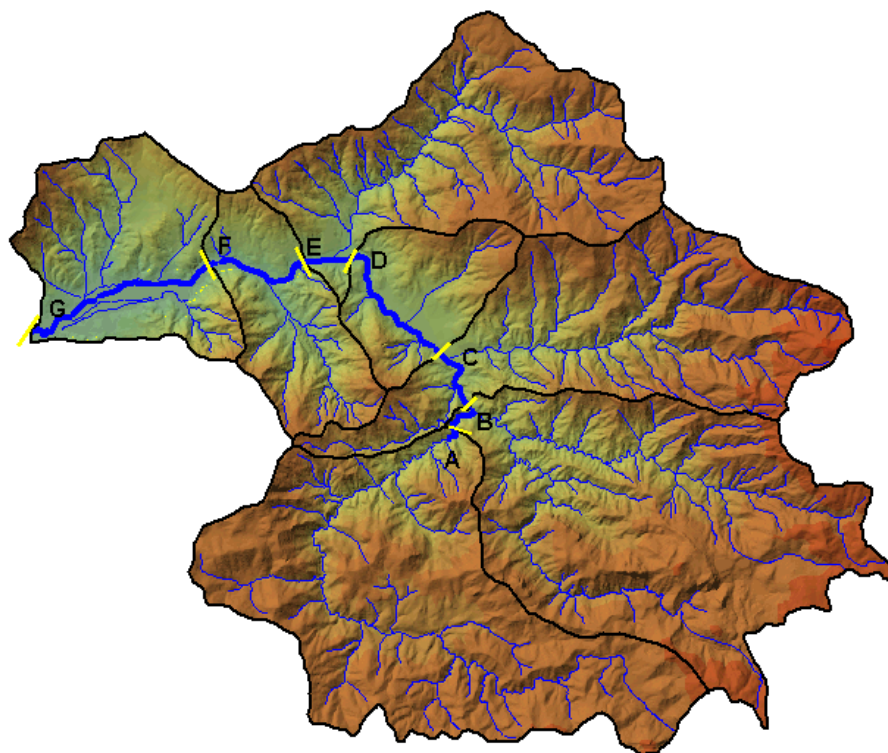


Figura 1– Esempio di schematizzazione dei sottobacini idrografici.

### 1.2 Caratterizzazione morfometrica e geomorfologica dei bacini elementari

La caratterizzazione fisiografica delle aste fluviali e dei bacini individuati viene eseguita con il supporto del sistema Temporal Analyst, operante in ambiente ArcGIS della ESRI, strumento per la valutazione dei dati geografici, fisiografici e morfometrici e per la gestione su GIS delle informazioni, orientato principalmente all'idrologia.

Le principali basi dati utilizzate sono le seguenti:

- DEM (maglia 10 x 10 m);
- CTR 1 : 10.000;
- Tavole I.G.M. alla scala 1 : 25.000 a colori con aggiornamento all'anno 1958;

- Carta uso suolo.

Nello specifico, per ciascun bacino individuato, vengono valutate le seguenti grandezze:

- Superficie del bacino (S - km<sup>2</sup>) → elaborazione GIS: la superficie è calcolata direttamente attraverso Temporal Analyst sulla base del DEM, in relazione al poligono chiuso che individua ciascun singolo bacino idrografico;
- Altitudine massima (Hmax - m s.m.), altitudine media (Hmedia - m s.m.), altitudine minima (altitudine sezione di chiusura - Hmin - m s.m.) → elaborazione GIS: direttamente dalla base del DEM, come risultato di un'analisi di tipo statistico (valore medio, minimo e massimo) delle quote altimetriche delle celle del DEM interne a ciascun poligono rappresentante un bacino idrografico;
- Pendenza media del bacino (i<sub>v</sub> - %) → elaborazione GIS: direttamente dalla base del DEM, come risultato dell'analisi delle pendenze medie delle celle del DEM interne a ciascun poligono rappresentante un bacino idrografico;
- Lunghezza dell'asta (L<sub>max</sub> - km) → calcolo automatico in GIS della lunghezza dei segmenti rappresentanti i corsi d'acqua digitalizzati;
- Pendenza media dell'asta (i - m/m) → elaborazione su foglio di calcolo Excel utilizzando il dato di lunghezza dell'asta precedentemente calcolato e le coordinate plano-altimetriche dei punti di inizio e fine dei segmenti digitalizzati rappresentanti le aste, derivati direttamente da GIS.

### 1.3 Analisi quantitativa del reticolo di drenaggio

L'analisi quantitativa, nota come metodo di Horton-Strahler segue il seguente criterio di classificazione gerarchica della struttura geomorfologia del reticolo idrografico:

- le sorgenti originano rami e canali di ordine 1;
- quando due rami di ordine *i*-esimo e *j*-esimo si congiungono, il ramo risultante assume l'ordine

$$k = \text{Max} \left[ i, j, \text{int} \left( 1 + \frac{i + j}{2} \right) \right],$$

e due o più rami in successione, aventi medesimo ordine, formano un canale del loro stesso ordine;

- l'ordine del bacino di drenaggio corrisponde a quello del canale di ordine massimo.

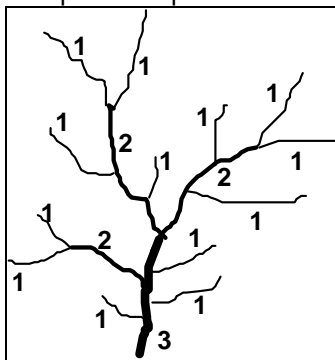


Figura 2– Ordinamento gerarchico di un reticolo di ordine 3.

Tale analisi gerarchica permette di valutare le leggi di Horton del numero, della lunghezza e della pendenza dei canali ordinati (*aste*) ed quella delle aree drenate (Shumm, 1956). Tali leggi mostrano come le reti di drenaggio presentino una organizzazione gerarchica di tipo sistematico, la cui validità è stata verificata per numerosi casi pratici in differenti situazioni geografiche e climatiche e che risultano correlati alla definizione dei tempi caratteristici della risposta di piena alla sollecitazione meteorica.

Operativamente l'analisi viene condotta utilizzando i seguenti supporti GIS: ArcGis 9.0, ArcHydro (applicativo di ArcGis specifico per analisi idrologiche) e ArcView 3.2. Per gestire in automatico l'intera procedura di calcolo è stato inoltre creato uno script, denominato "Horton", scritto in codice AVENUE, utilizzabile in ambiente ArcView, che permette la definizione e la determinazione dei rapporti di biforcazione (1° Legge di Horton), dei rapporti delle lunghezze d'asta (2° Legge di Horton) e dei rapporti delle aree drenate (3° Legge di Horton). Come base cartografica è utilizzato il DTM 10x10m reso disponibile dalla Regione Sardegna.

La *Prima Legge di Horton* (o del *numero dei canali*) individua nella successione  $\{N_1, N_2, \dots, N_{\Omega}=1\}$  del numero dei canali (decrescente con l'ordine  $[1, 2, \dots, \Omega]$  delle stesse) una serie geometrica inversa, in cui l'ultimo termine è unitario. Il rapporto  $R_B$ , detto *rapporto di biforcazione*, fornisce il numero dei canali di qualsivoglia ordine  $\omega$ , noto l'ordine  $\Omega$  del bacino

$$N_{\omega} = R_B^{\Omega-\omega}.$$

La *Seconda Legge di Horton* (o delle *lunghezze dei canali*) individua nella successione  $\{L_1, L_2, \dots, L_{\Omega}\}$  della lunghezza media dei canali (generalmente crescente con l'ordine delle stesse), una serie geometrica in cui il primo termine è pari alla lunghezza media dei canali di primo ordine, o rami esterni. Il rapporto  $R_L$ , detto *rapporto delle lunghezze*, fornisce la lunghezza media dei canali di qualsivoglia ordine  $\omega$ , nota la lunghezza dei rami esterni

$$L_{\omega} = L_1 R_L^{\omega-1}.$$

La *Terza Legge di Horton*, che riguarda la *pendenza media dei canali*, e la *Legge delle aree drenate*, dovuta al successivo lavoro di Strahler [1952], sono analoghe, rispettivamente, alla legge del numero dei canali e delle lunghezze, dove vengono considerate, rispettivamente, la pendenza media dei canali  $\{S_1, S_2, \dots, S_{\Omega}\}$  e l'area mediamente drenata dalle aste  $\{A_1, A_2, \dots, A_{\Omega}\}$ . Pertanto le *Leggi di Horton* si possono enunciare come

$$R_B = \frac{N_{\omega-1}}{N_{\omega}}, \quad \text{per } 2 \leq \omega \leq \Omega,$$

$$R_L = \frac{L_{\omega}}{L_{\omega-1}}, \quad \text{per } 2 \leq \omega \leq \Omega,$$

$$R_S = \frac{S_{\omega-1}}{S_{\omega}}, \quad \text{per } 2 \leq \omega \leq \Omega,$$

$$R_A = \frac{A_{\omega}}{A_{\omega-1}}, \quad \text{per } 2 \leq \omega \leq \Omega.$$

In quest'ultima il valore di  $A_{\omega}$ , che rappresenta il valore medio dell'area drenata da un canale di ordine  $\omega$ , comprende sia l'area  $a_{\omega}$ , direttamente drenata dall'asta di ordine  $\omega$ , che l'area drenata di monte,  $A_{\omega-1}$ , relativa alle aste tributarie di ordine inferiore a  $\omega$ .

## 1.4 Metodo di stima delle portate al colmo

### 1.4.1 Criteri generali

Sono valutate le portate al colmo per i tempi di ritorno di 2, 50, 100, 200 e 500 anni, sulla base di quanto indicato nelle "Linee guida per l'attività di individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idraulico e geomorfologico e delle relative misure di salvaguardia".

Viene fatto riferimento, per i bacini con superficie superiore ai 60 km<sup>2</sup>, al metodo diretto della regionalizzazione VAPI delle portate al colmo per la Sardegna secondo la distribuzione TCEV, riportato nelle sopracitate Linee guida e descritto in dettaglio nella "Valutazione delle piene in Sardegna" (Cao C., Piga E., Salis M., Sechi G.M. Rapporto Regionale Sardegna, CNR-GNDICI, LINEA 1, Istituto di Idraulica, Università di Cagliari, 1991). Per i bacini con superficie inferiore ai 60 km<sup>2</sup>, si procede con metodo indiretto mediante applicazione del metodo razionale.

Nel caso in cui nella schematizzazione di uno stesso bacino siano presenti sottobacini sia di superficie di poco superiore o inferiore a 60 km<sup>2</sup>, per questi ultimi si procede ponendo a confronto criticamente i risultati di entrambi i metodi citati, scegliendo i risultati più verosimili.

Inoltre, dove disponibili e significativi, vengono considerati anche i valori delle portate di piena caratteristiche direttamente valutati con analisi statistica delle serie cronologiche delle stazioni di misura.

Data la presenza di un numero elevato di serbatoi artificiali lungo il reticolo idrografico regionale è necessario valutare l'influenza degli invasi sui colmi di portata. Essendo la definizione dell'idrogramma di riferimento un'operazione assai complessa e un problema ancora in discussione dal punto di vista scientifico, la cui teoria va ricercata nella definizione di funzioni di frequenza di probabilità condizionata, si fa riferimento a tecniche di stima semplificate, che implicano l'ipotesi di isofrequenza tra portata al colmo e idrogramma di piena, come suggerito nelle "Integrazioni Metodologiche" delle Linee Guida per la Redazione del Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali, del 2006.

### 1.4.2 Metodo razionale per la definizione delle portate al colmo

Per la stima delle portate al colmo dei bacini di superficie inferiore a 60 km<sup>2</sup>, si fa riferimento alla Formula Razionale, secondo le indicazioni contenute nelle Linee guida sopra citate, che si richiama nel seguito.

La portata di piena è espressa come prodotto tra l'intensità di precipitazione ( $i$ ), di assegnata durata e periodo di ritorno ( $T_r$ ), il coefficiente di assorbimento ( $\Phi$ ), la superficie del bacino ( $A$ ), il coefficiente di laminazione  $\varepsilon(t)$ :

$$Q = i [\Theta, T_r, r(\Theta, A)] \cdot \Phi \cdot A \cdot \varepsilon(\Theta)$$

dove con  $\Theta$  si è indicato il valore di durata critica, mentre  $r(\Theta, A)$ , rappresenta il fattore di ragguaglio della precipitazione all'area del bacino, espresso in funzione della durata  $\Theta$  e della superficie del bacino  $A$ .

Vengono nel seguito descritte le ipotesi e le metodologie di stima dei suddetti parametri.

#### Durata critica: tempo di corrivazione e di formazione

La durata di pioggia critica ( $\Theta$ ) è assunta pari alla somma del tempo di formazione del deflusso superficiale ( $t_f$ ) e del tempo di corrivazione ( $t_c$ ).

Il tempo di corrivazione ( $t_c$ ) è ottenuto con la formula del Soil Conservation Service

$$t_c = \frac{100 L^{0.8}}{1900 s^{0.5}} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} \text{ [minuti]}$$

dove

s = pendenza media del bacino (di versante, non dell'asta fluviale) [%];

L = lunghezza dell'asta [ft] (piedi); [MEMO: 1 metro = 3.28084 x 1 ft]

La stessa formula è usualmente espressa come:

$$t_c = 1.67 * 2.587 \frac{L^{0.8}}{1900 s^{0.5}} \left( \frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7} \text{ [ore]}$$

dove

s = pendenza media del bacino (di versante, non dell'asta fluviale) [%];

L = lunghezza dell'asta [m]

Il tempo di formazione del deflusso ( $t_f$ ) esprime il tempo in cui si forma il deflusso superficiale prima che inizi a scorrere sul bacino e dipende dalla capacità di assorbimento del suolo e dall'intensità e durata della pioggia lorda. La sua determinazione avviene in modo iterativo. Per i bacini di piccole dimensioni esaminati si è verificato che tale tempo non sia mai superiore al 50% del tempo di corrivazione, valore che è stato assunto per la sua stima sistematica.

#### Altezze di pioggia: curve segnalatrici di possibilità pluviometrica in Sardegna

Per la definizione delle precipitazioni si segue l'analisi regionale sulle precipitazioni breve e intense riportate nel progetto "VAPI Sardegna". La procedura individuata definisce innanzitutto la sottozona omogenea SZO della Regione Sardegna di appartenenza del bacino in esame, secondo la divisione riportata in figura seguente.

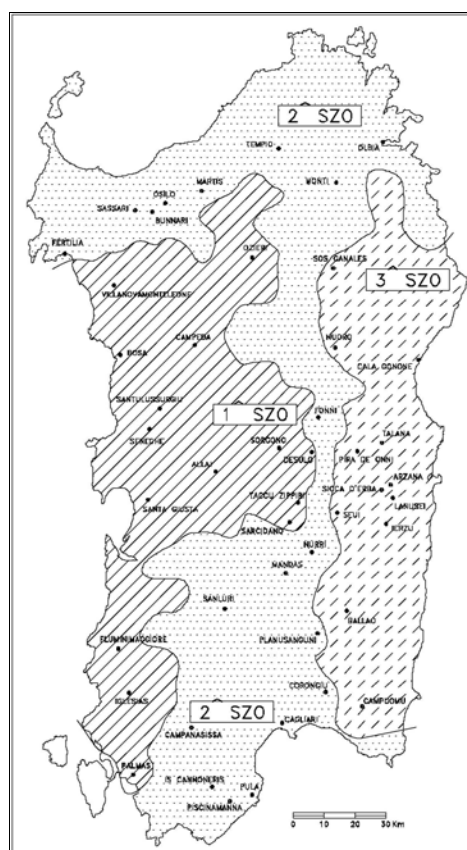


Figura 3- Divisione delle sottozone omogenee SZO della Regione Sardegna.



La pioggia indice  $\mu(t)$  di durata  $\tau$  (ovvero la media dei massimi annui delle piogge di durata  $\tau$ ) può essere espressa in forma monomia:

$$\mu(\tau) = a_1 \tau^{n_1}$$

dove i coefficienti  $a_1$  e  $n_1$  si possono determinare in funzione della pioggia indice giornaliera  $\mu_g$ ,

$$a_1 = \mu_g / (0,886 \cdot 24^{n_1})$$

$$n_1 = -0,493 + 0,476 \log_{10} \mu_g ,$$

La pioggia indice giornaliera  $\mu_g$  viene stimata sulla base della carta delle isoiete riportata in Figura 4.

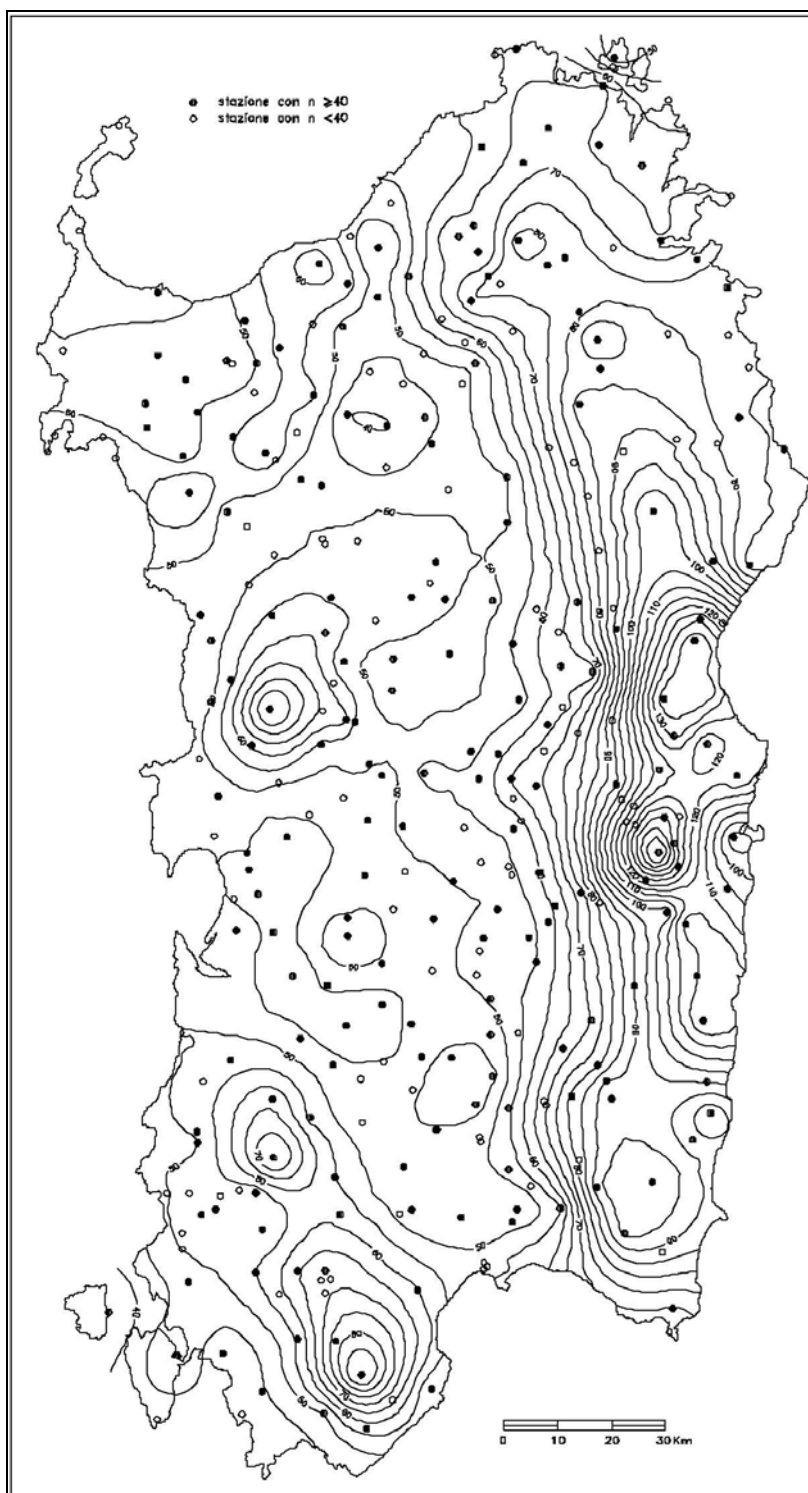


Figura 4- Carta delle isoiete per identificare la pioggia indice giornaliera  $\mu_g$  (espressa in mm).

L'altezza di pioggia  $hT(\tau)$  di durata generica  $\tau$  con assegnato tempo di ritorno  $T$  in anni si ottiene moltiplicando la pioggia indice  $\mu(\tau)$  per un coefficiente di crescita  $KT(\tau) = a_2 \tau^{n_2}$ :

$$hT(\tau) = \mu(\tau) KT(\tau) = (a_1 a_2) \tau^{(n_1+n_2)}$$

dove i coefficienti  $a_2$  e  $n_2$  si determinano con le seguenti relazioni, distinte per sottozona, per differenti  $T$  e  $\tau$ :

a) per tempi di ritorno  $T \leq 10$  ANNI

$$SZO 1 \quad a_2 = 0,66105 + 0,85994 \log_{10} T ;$$

$$n_2 = -1,3558 \cdot 10^{-4} - 1,3660 \cdot 10^{-2} \log_{10} T ;$$

$$SZO 2 \quad a_2 = 0,64767 + 0,89360 \log_{10} T ;$$

$$n_2 = -6,0189 \cdot 10^{-3} + 3,2950 \cdot 10^{-4} \log_{10} T ;$$

$$SZO 3 \quad a_2 = 0,62408 + 0,95234 \log_{10} T ;$$

$$n_2 = -2,5392 \cdot 10^{-2} + 4,7188 \cdot 10^{-2} \log_{10} T ;$$

b) per tempi di ritorno  $T > 10$  ANNI

$$SZO 1 \quad a_2 = 0,46378 + 1,0386 \log_{10} T$$

$$n_2 = -0,18449 + 0,23032 \log_{10} T - 3,3330 \cdot 10^{-2} (\log_{10} T)^2 \quad (\text{per } \tau \leq 1 \text{ ora})$$

$$n_2 = -1,0563 \cdot 10^{-2} - 7,9034 \cdot 10^{-3} \log_{10} T \quad (\text{per } \tau \geq 1 \text{ ora})$$

$$SZO 2 \quad a_2 = 0,44182 + 1,0817 \log_{10} T$$

$$n_2 = -0,18676 + 0,24310 \log_{10} T - 3,5453 \cdot 10^{-2} (\log_{10} T)^2 \quad (\text{per } \tau \leq 1 \text{ ora})$$

$$n_2 = -5,6593 \cdot 10^{-3} - 4,0872 \cdot 10^{-3} \log_{10} T \quad (\text{per } \tau \geq 1 \text{ ora})$$

$$SZO 3 \quad a_2 = 0,41273 + 1,1370 \log_{10} T$$

$$n_2 = -0,19055 + 0,25937 \log_{10} T - 3,8160 \cdot 10^{-2} (\log_{10} T)^2 \quad (\text{per } \tau \leq 1 \text{ ora})$$

$$n_2 = 1,5878 \cdot 10^{-2} + 7,6250 \cdot 10^{-3} \log_{10} T \quad (\text{per } \tau \geq 1 \text{ ora})$$

Nota la durata critica, le formule permettono di calcolare l'altezza di pioggia lorda.

Altezze di pioggia ragguagliata ( $h_r$ ):

La pioggia ottenuta calcolata per la durata critica  $\Theta$  di ogni bacino viene quindi ragguagliata all'area tramite il parametro  $r$ , secondo la formulazione utilizzata nel VAPI, che fa riferimento al Flood Studies Report:

$$r = 1 - (0,0394 A^{0,354}) \Theta^{(-0,40+0,0208 \ln(4,6-\ln(A)))} \quad \text{per } A < 20 \text{ km}^2$$

$$r = 1 - (0,0394 A^{0,354}) \Theta^{(-0,40+0,003832 (4,6-\ln(A)))} \quad \text{per } A > 20 \text{ km}^2$$

dove:

$\Theta$  è la durata critica della precipitazione;

$A$  è la superficie del bacino (espressa in  $\text{km}^2$ ).

Altezze di pioggia nette ( $h_N$ ):

Il valore del coefficiente di afflusso si può calcolare con il metodo SCS-Curve Number che permette di ricavare la pioggia netta  $h_N$  in base all'espressione:

$$h_N = (h_r(\Theta) - 0,2 S)^2 / (h_r(\Theta) + 0,8 S) \quad (\text{mm})$$

dove:

$h_r$  = precipitazione meteorica ragguagliata (mm);

$S$  = massima capacità di assorbimento del bacino per infiltrazione (mm).

Il valore  $S$  è calcolato dall'equazione:

$$S = 254 ((100/CN)-1) \quad (\text{mm})$$

I valori del parametro di assorbimento CN sono stati ricavati secondo la metodologia elaborata dal CIMA (Centro di Ricerca Interuniversitario in Monitoraggio Ambientale, Savona) per conto e in coordinamento della Protezione Civile Nazionale; tale attività è peraltro estesa su tutto il territorio nazionale.

La carta CN è costruita sulla base delle informazioni sull'uso suolo, la litologia e la permeabilità a disposizione.

La procedura prevede inizialmente l'associazione ad ogni tipologia di copertura del territorio di un valore di CN secondo la classificazione riportata in Tabella 1.

Tabella 1 - Assegnazione dei valori di Curve Number alle diverse tipologie di uso del suolo

Descrizione	CN
1111 - TESSUTO RESIDENZIALE COMPATTO E DENSO	95
1112 - TESSUTO RESIDENZIALE RADO	95
1121 - TESSUTO RESIDENZIALE RADO E NUCLEIFORME	95
1122 - FABBRICATI RURALI	95
1211 - INSEDIAMENTO INDUSTRIALI/ARTIG. E COMM. E SPAZI ANNESSI	95
1212 - INSEDIAMENTO DI GRANDI IMPIANTI DI SERVIZI	95
1221 - RETI STRADALI E SPAZI ACCESSORI	95
1222 - RETI FERROVIARIE E SPAZI ANNESSI	95
1223 - GRANDI IMPIANTI DI CONCENTRAMENTO E SMISTAMENTO MERCI	99
1224 - IMPIANTI A SERVIZIO DELLE RETI DI DISTRIBUZIONE	95
123 - AREE PORTUALI	95
124 - AREE AEROPORTUALI ED ELIPORTI	95
131 - AREE ESTRATTIVE	75
1321 - DISCARICHE	75
1322 - DEPOSITI DI ROTTAMI A CIELO APERTO, CIMITERI DI AUTOVEICOLI	75
133 - CANTIERI	95
141 - AREE VERDI URBANE	70
1421 - AREE RICREATIVE E SPORTIVE	95
1422 - AREE ARCHEOLOGICHE	75
143 - CIMITERI	95
2111 - SEMINATIVI IN AREE NON IRRIGUE	60
2112 - PRATI ARTIFICIALI	75
2121 - SEMINATIVI SEMPLICI E COLTURE ORTICOLE A PIENO CAMPO	60
2122 - RISAIE	99
2123 - VIVAI	70
2124 - COLTURE IN SERRA	75
221 - VIGNETI	60
222 - FRUTTETI E FRUTTI MINORI	60
223 - OLIVETI	60
231 - PRATI STABILI	75
2411 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE ALL'OLIVO	60
2412 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE AL VIGNETO	99
2413 - COLTURE TEMPORANEE ASSOCIATE AD ALTRE COLTURE PERMANENTI	60
242 - SISTEMI CULTURALI E PARTICELLARI COMPLESSI	60
243 - AREE PREV. OCCUPATE DA COLTURE AGRARIE CON PRESENZA DI SPAZI NATURALI IMPORTANTI	70
244 - AREE AGROFORESTALI	70
3111 - BOSCHI DI LATIFOGIE	50
31121 - PIOPPETI SALICETI EUCALITTETI	50
31122 - SUGHERETE	65
31123 - CASTAGNETI DA FRUTTO	50
31124 - ALTRO	50
3121 - BOSCHI DI CONIFERE	70
3122 - CONIFERE A RAPIDO ACCRESCIMENTO	70
313 - BOSCHI MISTI DI CONIFERE E LATIFOGIE	60
321 - AREE A PASCOLO NATURALE	75
3221 - CESPUGLIETI ED ARBUSTETI	65
3222 - FORMAZIONI DI RIPA NON ARBOREE	65
3231 - MACCHIA MEDITERRANEA	65
3232 - GARIGA	65

Descrizione	CN
3241 - AREE A RICOLONIZZAZIONE NATURALE	70
3242 - AREE A RICOLONIZZAZIONE ARTIFICIALE	70
3311 - SPIAGGE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3312 - AREE DUNALI NON COPERTE DA VEGETAZIONE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3313 - AREE DUNALI COPERTE DA VEGETAZIONE DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	40
3315 - LETTI DI TORRENTI DI AMPIEZZA SUPERIORE A 25M	99
332 - PARETI ROCCIOSE E FALESIE	75
333 - AREE CON VEGETAZIONE RADA > 5% E< 40%	75
411 - PALUDI INTERNE	99
421 - PALUDI SALMASTRE	99
422 - SALINE	75
423 - ZONE INTERTIDALI	99
5111 - FIUMI, TORRENTI E FOSSI	99
5112 - CANALI E IDROVIE	99
5121 - BACINI NATURALI	99
5122 - BACINI ARTIFICIALI	99
5211 - LAGUNE, LAGHI E STAGNI COSTIERI A PRODUZIONE ITTICA NATURALE	99
5212 - ACQUACOLTURE IN LAGUNE, LAGHI E STAGNI COSTIERI	99
522 - ESTUARI E DELTA	99
5231 - AREE MARINE A PRODUZ. ITTICA NATURALE	99
5232 - ACQUACOLTURE IN MARE LIBERO	99

La carta tematica costruita utilizzando questo tipo di informazione restituisce una visione d'insieme delle diverse risposte del suolo secondo l'immagine di Figura 5.

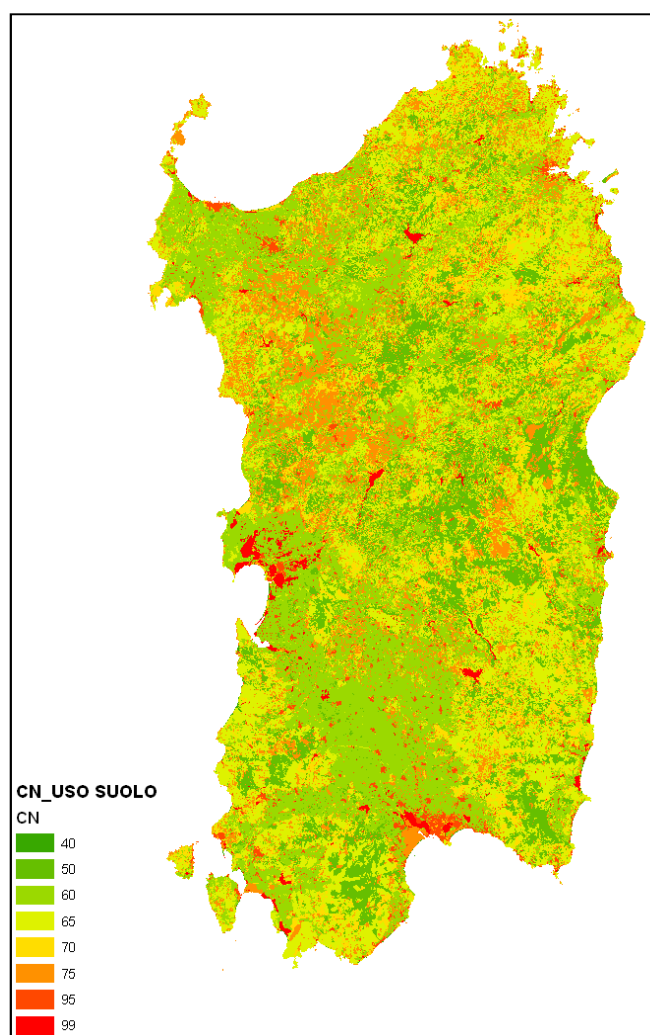


Figura 5 - Carta del CN in funzione del solo Uso Suolo, sulla base dei dati Carta CORINE.

Successivamente, così come indicato dalla metodologia CIMA-Protezione Civile Nazionale, si è proceduto all'analisi delle informazioni presenti nella Carta geologica resa disponibile dalla Regione Sardegna, al fine di ottenere fattori correttivi per il calcolo definitivo dei valori di CN a scala regionale. Lo strato cartografico presenta più di sessanta diverse classi geologiche, come riportato in Figura 6:

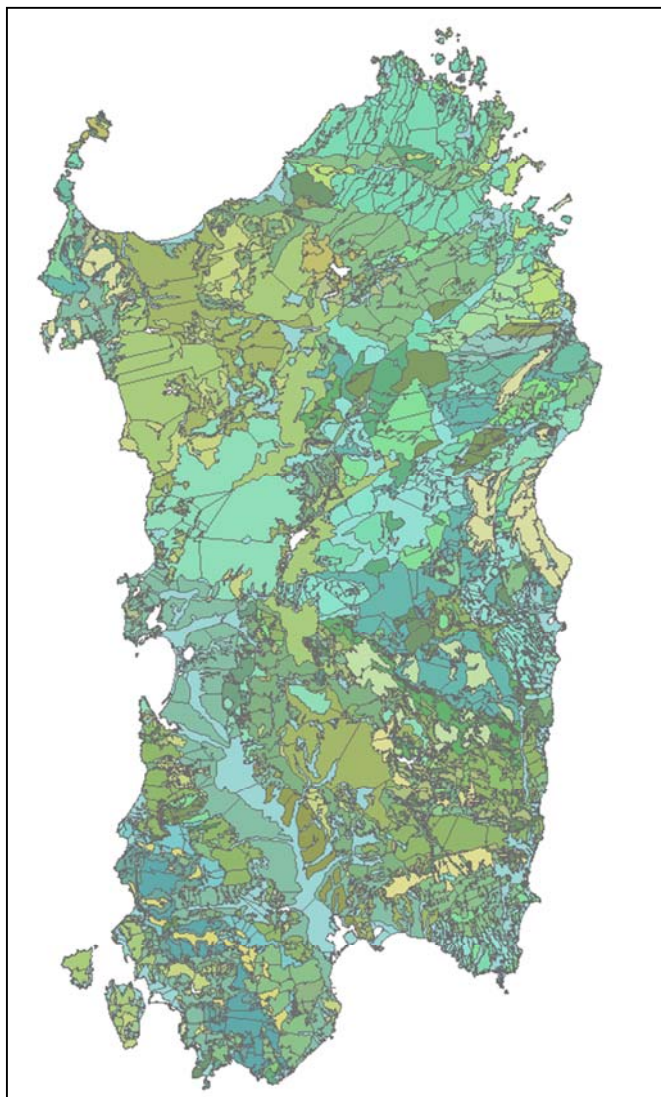


Figura 6 - Carta geologica della Sardegna.

Ogni classe è stata indagata e, in considerazione degli aspetti geologici preminenti e delle caratteristiche di permeabilità proprie, sono stati stimati i coefficienti di variazione del CN da attribuire ad ogni tipo litologico.

I coefficienti di variazione del Curve Number vengono assunti nell'intervallo di valori (- 5, +15); un coefficiente di variazione pari a -5 è tipico dei terreni incoerenti ad elevata capacità di infiltrazione: ne sono un esempio i depositi detritici, come il tipo "Ghiaie, sabbie, limi ed argille sabbiose di origine alluvionale, eolica e litorale"; al contrario un valore del coefficiente di variazione pari a +15 è proprio delle rocce con strutture cristalline compatte e poco permeabili, come il tipo "Metarioliti e Metariodaciti con fenocristalli da millimetrici a decimetrici di kfs; quarziti, metarenarie, metaconglomerati poligenici con elementi di metavulcaniti, metaepiclastiti, metagrovacche. (Ordoviciano medio)".

La tavola dei fattori correttivi al Curve Number che si è infine desunta secondo la metodologia CIMA-Protezione Civile Nazionale, è riportata in forma completa in Tabella 2.

Tabella 2 - Assegnazione dei fattori correttivi al Curve Number per caratteristiche geologiche da attribuire, per sovrapposizione, ad ogni tipo litologico.

descrizione	ΔCN
Alternanza di metarenarie, quarziti e filladi (47b). Metarenarie e filladi a bt (47a). Successioni terrigene prevalentemente attribuite al Cambriano-Ordoviciano inf. e subordinatamente all'Ordoviciano sup. e al Devoniano-Carbonifero inf.)	5
Alternanza di quarziti, metarenarie, metapeliti e metasiltiti, metaconglomerati e breccie; olistoliti e olistostromi della successione siluro-devoniana. (Carbonifero inf.)	10
Andesiti, andesiti basaltiche e rari basalti ad affinità tholeiitica e calcalcalina, talora brecciati in colate, cupole di ristagno; lave andesitiche e dacitiche in cupole e filoni; andesiti, basalti andesitici e latiti ad affinità da calcalcalina a	10
Anfiboliti con relitti di paragenesi eclogitiche. (Precambriano)	15
Anfiboliti e anfiboliti ultramafiche con relitti di paragenesi granulitiche. (Precambriano)	15
Arenarie di San Vito e Formazione di Solanas: metarenarie micacee e quarziti alternate a metapeliti e rari metaconglomerati, con piste ed impronte di Meduse e Acritarchi; nella parte alta metapeliti viola, nere e verdastre, quarziti e metaconglomerati	10
Arenarie eoliche wurmiane (2c); Conglomerati, arenarie e biocalcareni di spiaggia (2b); Conglomerati, sabbie, argille più meno cementate (2a).	0
Arenarie marnose, siltiti, calcareniti sublitorali (9d). (Serravalliano med.- sup.) Marne e marne arenacee epibatiali (9c). (Langhiano med. -sup.-Serravalliano inf.) Marne arenacee e siltose, arenarie, conglomerati, calcareniti e sabbie silicee sublitorali	10
Argille rosso violacee, arenarie quarzoso-micacee e conglomerati di piana alluvionale, con intercalazioni di calcari silicizzati. (Permiano sup.-Trias medio p.p.) Conglomerati, arenarie, breccie vulcaniche, calcari con selci lacustri e lenti di antra	10
Basalti alcalini e transizionali, trachibasalti, andesiti basaltiche e basalti subalcalini, intercalati, alla base, da depositi di tipo fluvio lacustri (5b). (Pliocene-Pleistocene) Trachiti, trachiti fonolitiche, fonoliti, fonoliti tefritiche e tefriti	10
Conglomerati a matrice argillosa e arenarie di derivazione alluvionale (8d). Calcarivacuolari e brecciati sopratidali e intertidali; calcari microcristallini di ambiente evaporitico, marne e calcari organogeni sublitorali (8c). (Messiniano) Calcari e ar	0
Conglomerati e arenarie continentali con banchi di selce, tufiti, tufi pomicei (10f). (Burdigagliano) Arenarie, conglomerati, tufiti più o meno arenacee, calcari sublitorali (10e) Calcari selciosi, siltiti, arenarie e conglomerati fluviali con interca	0
Conglomerati, arenarie ed argille derivanti dallo smantellamento di sedimenti miocenici (Formazione di Samassi) (3b); Sabbie carbonatiche e siltiti argillose (3a).	0
Conglomerati, arenarie marnose, marne e calcareniti sublitorali (Plioc. inf.)	0
Dolomie, dolomie marnose e marne con gessi e argille. (Trias sup) Depositi carbonatici di piattaforma: calcari dolomitici e dolomie arenacee, calcari e calcari marnosi con rare intercalazioni gessose, circolatori e transizionali. (Trias medio)	10
Filoni a composizione prevalentemente basaltica e comenditica. (Oligocene sup.- Miocene inf. medio)	10
Filoni a composizione trachibasaltica, alcalibasaltica e hawaitica. (Pliocene-Pleistocene)	10
Filoni principali di porfidi granitici e ammassi di micrograniti, principali filoni aplitici e pegmatitiche. (Carbonifero sup.- Permiano)	10
Filoni principali di quarzo. (Carbonifero sup. Permiano)	10
Formazione di Cabitza: argilloscisti, metarenarie, metacalcari nodulari, metasiltiti con rare lenti calcaree. (Cambriano inf.- Ordoviciano)	10
Formazione di Dorgali: dolomie, dolomie arenacee, calcari dolomitici, da litorali a circa litorali; conglomerati, arenarie quarzose, siltiti ed argille fluvio-deltizi con livelli lignitiferi (Dogger-Malm)	5
Formazione di Gonnese (Metallifero Auct.): metacalcari e metadolomie; metadolomie e metacalcari stromatolitici. (Cambriano inf.)	5
Formazione di Nebida (Formazione delle Arenarie Auct.): metarenarie a cemento carbonatico, metadolomie, metacalcari oolitici e micritici; arenarie siltose con rare intercalazioni di calcari (63c). (Cambriano inf.) Filladi e metarenarie, talvolta con i	10
Formazione di Serra Tonnai: metavulcaniti intermedie o raramente basiche, metagrovacche vulcaniche; Formazione di Manixeddu: metaepiclastiti, metaconglomerati a prevalenti elementi di vulcaniti acide. Formazione di M.te Corte Cerbos: metarioliti, metac	5
Ghiaie, sabbie, limi ed argille sabbiose di origine alluvionale, eolica e litorale.	-5
Granitoidi a crd. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Granitoidi foliati, principalmente granodioriti tonalitiche fino a tonaliti. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Granodioriti tonalitiche. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Granodioriti, monzogranitiche equigranulari. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Granodioriti, monzogranitiche inequigranulari. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Leucograniti a grt. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Leucograniti equigranulari. (Carbonifero sup.-Permiano)	10

descrizione	ΔCN
Marmi grigi, raramente dolomitici, con alternanze filladiche, localmente fossiliferi. (Devoniano)	5
Metacalcari nodulari. (Devoniano) Metacalcari a graptoliti. (Siluriano-Devoniano inf.)	10
Metacalcari nodulari; sottili alternanze di metacalcari e metasiltiti (49b). (Devoniano inf. medio-Tournaisiano inf.) Marmi talvolta dolomitici e calcescisti (49a). (Devoniano- Carbonifero inf.)	10
Metaconglomerati, metarcosi, metesiltiti, metagrovacche, con intercalazioni di metabasiti alcaline;metacalcareniti e metacalcari fossiliferi spesso silicizzati. (Caradoc-Ashgill)	10
Metagabbri alcalini (45b). (Carbonifero inf.)Filladi scure carboniose, metasiltiti, quarziti nere con rare e sottili intercalazioni di marmi (45a). (Devoniano)	10
Metapeliti scure carboniose, nella parte inferiore livelli di quarziti nere a graptoliti; nelle partesuperiore metacalcari nodulari. (Siluriano inf.-Devoniano inf.)	5
Metapeliti scure carboniose; nella parte inferiore quarziti nere a graptoliti. (Siluriano inf.)	15
Metarenarie , quarziti, filladi, metaconglomerati ad elementi di liditi, olistoliti e olistostromi della successione siluro-devoniana e ordoviciana, e metavulcaniti basiche alcaline, talora a pillow.(Carbonifero inf.)	10
Metarioliti e metariodaciti con fenocristalli da millimetrici a decimetrici di kfs; alla base sono presentiquarziti, metarenarie, metaconglomerati poligenici con elementi di metavulcaniti, metaepiclastiti,metagrovacche. (Ordoviciano medio)	15
Metasiltiti e metarenarie con intercalazioni di metavulcaniti basiche e metatufi; metaconglomeraticon olistoliti di calcari e dolomie cambriani, metasiltiti e metarenarie rosso-violacee di piana daalluvionale a costiera. (Caradoc-Ashgill)	10
Metavulcaniti acide, intermedie e basiche e metaepiclastiti. (Ordoviciano medio)	10
Micascisti e paragneiss a grt+/-oligoclasio. (Paleozoico)	10
Migmatiti leucocratiche, nebuliti, magmatiti, gneiss, talora con lenti a silcati di calcio. ( Precambriano)	10
Monzograniti equigranulari (28b). Monzograniti inequigranulari (28a). (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Ortogneiss granodioritici e granitici. ( Ordoviciano medio)	10
Ortogneiss granodioritici e monzogranitici. ( Precambriano)	10
Ortogneiss granodioritici. (Ordoviciano medio)	15
Paragneiss, micascisti a grt+/-st+/-ky e quarziti in facies anfibolitica di pressione intermedia, miloniti di variabile grado metamorfico tra la facies anfibolitica e quella degli scisti verdi. (Paleo-zoico)	10
Paragneiss, micascisti e quarziti in facies anfibolitica di pressione intermedia con sovrainprontadi alta temperatura. (Paleozoico)	10
Porfidi grigi: metariodaciti e metadaciti massive, spesso porfiriche, metatufi e metatufiti; metavulcanitiriolitiche metatufiti e metaepiclastiti; metaconglomerati poligenici grossolani, con clasti di metarioliti. (Ordoviciano medio)	15
Principali corpi filoniani a composizione prevalentemente basaltica ad affinita calcalcalina e subordinatamente shoshonitica. (Carbonifero sup.- Permiano)	10
Rioliti e riodaciti in espandimenti ignimbritici e colate, porfidi in ammassi subvulcanici, lave, brecceandesitiche, subordinati espandimenti dacitici; rioliti alcaline in espandimenti ignimbritici.(Carbonifero sup.-Permiano sup.- Trias inf.)	10
Rioliti e riodaciti, daciti porfiriche vetrose e bollose. (Pliocene)	15
Rioliti, riodaciti, daciti e subordinatamente comenditi, in espandimenti ignimbritici, cupole diristagno e rare colate a cui si associano prodotti freatomagmatici; talora livelli epiclastici intercalati. (Oligocene sup.-Miocene inf. medio)	10
Sardegna occidentale: depositi carbonatici di piattaforma: calcari, calcari dolomitici,calcarioolitici e calcari bioclastici, sublitorali; alla base marne e calcari marnosi paralici (17b). (Berriasiano-Albiano inf.)Sardegna orientale: depositi carbo	5
Sardegna occidentale: depositi carbonatici di piattaforma: calcari, marne e calcareniti glauconitiche sublitorali e localmente calcari lacustri (16b). (Cenomaniano-Campaniano)Sardegna orientale: depositi carbonatici di piattaforma: calcari marnosi e	10
Sardegna occidentale: depositi carbonatici di piattaforma: dolomie e calcari dolomitici, calcarioolitici, calcari ad oncoidi, calcari selciferi, calcari micritici, calcari marnosi e marne; alla sommitadolomie e calcari dolomitici scuri lacustri (18b	5
Sardegna orientale: calcari, calcari maenosi e marne argillose sublitorali (14b).Arenarie e conglomerati poligenici piu o meno quarzosi fluvio-deltizi (14a). (Ypresiano-Luteziano inf.)	10
Sieniti sodiche. (Carbonifero sup.-Permiano)	10
Sulcis e Trexenta: calcari litorali e transizionali, calcari marnosi, marne e argille continentali e paralico-transizionali con depositi di carbone; alla base sono presenti, arenarie e conglomerati di piana alluvionale. (Paleocene sup.-Eocene inf. m	0
Tonaliti (33b). Gabbri e masse gabbro-tonalitiche (33a). (Carbonifero sup.-Permiano)	10

Utilizzando la tabella correttiva sopra riportata è stata realizzata una carta tematica che restituisce visivamente la distribuzione dei fattori correttivi  $\Delta CN$  ( Figura 7).

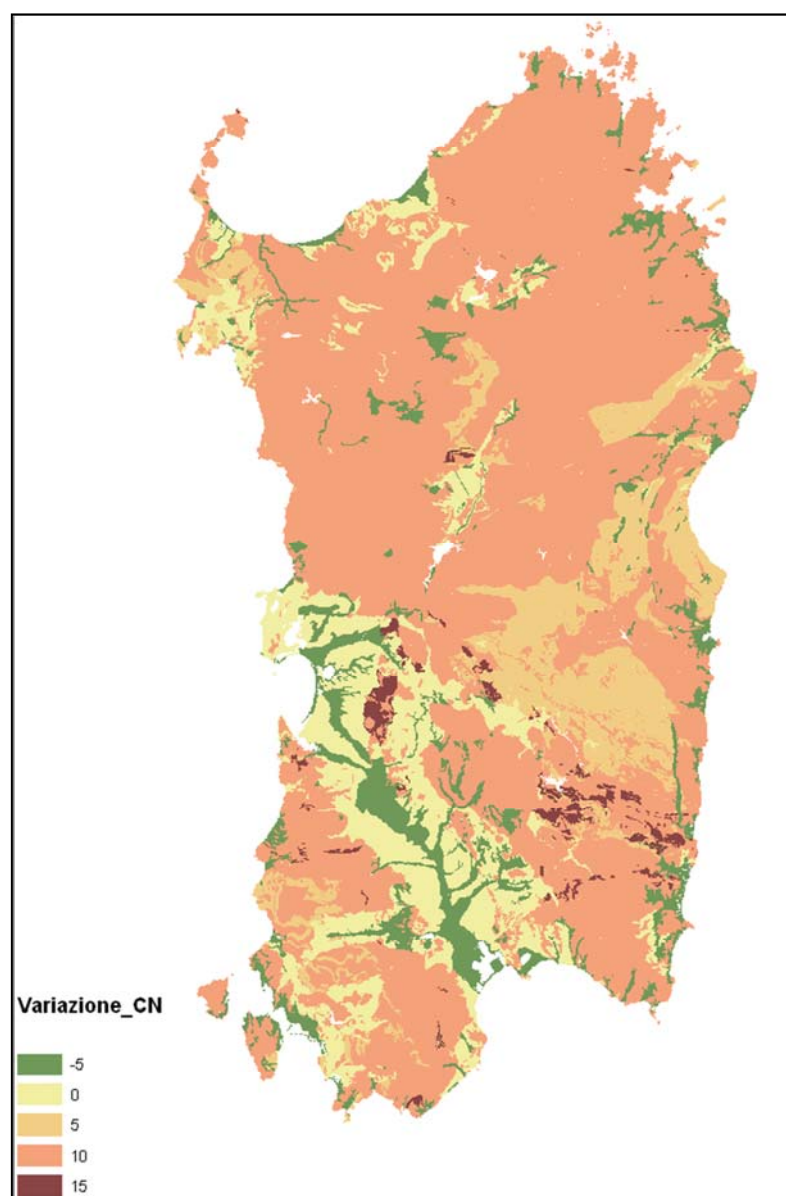


Figura 7 - Carta di variazione del CN derivante dalla stima di permeabilità del terreno desunto dalla carta geologica.

In ultima istanza i valori di Curve Number associati attraverso le caratteristiche dell'uso del suolo (CORINE) sono stati corretti considerando i fattori di variazione derivanti dall'analisi delle informazioni geologiche.

Nel procedimento di calcolo GIS è stata imposta la somma algebrica tra i codici di CN elaborati per il solo uso suolo e i termini correttivi  $\Delta CN$ .

Il prodotto finale è la "Carta del Curve Number per la Regione Sardegna" in formato raster con maglia 10 X 10 metri visibile nella successiva Figura 8.

Dalle analisi svolte, l'informazione fornita dalla carta di permeabilità risulta essere coerente con l'interpretazione delle classi geologiche.



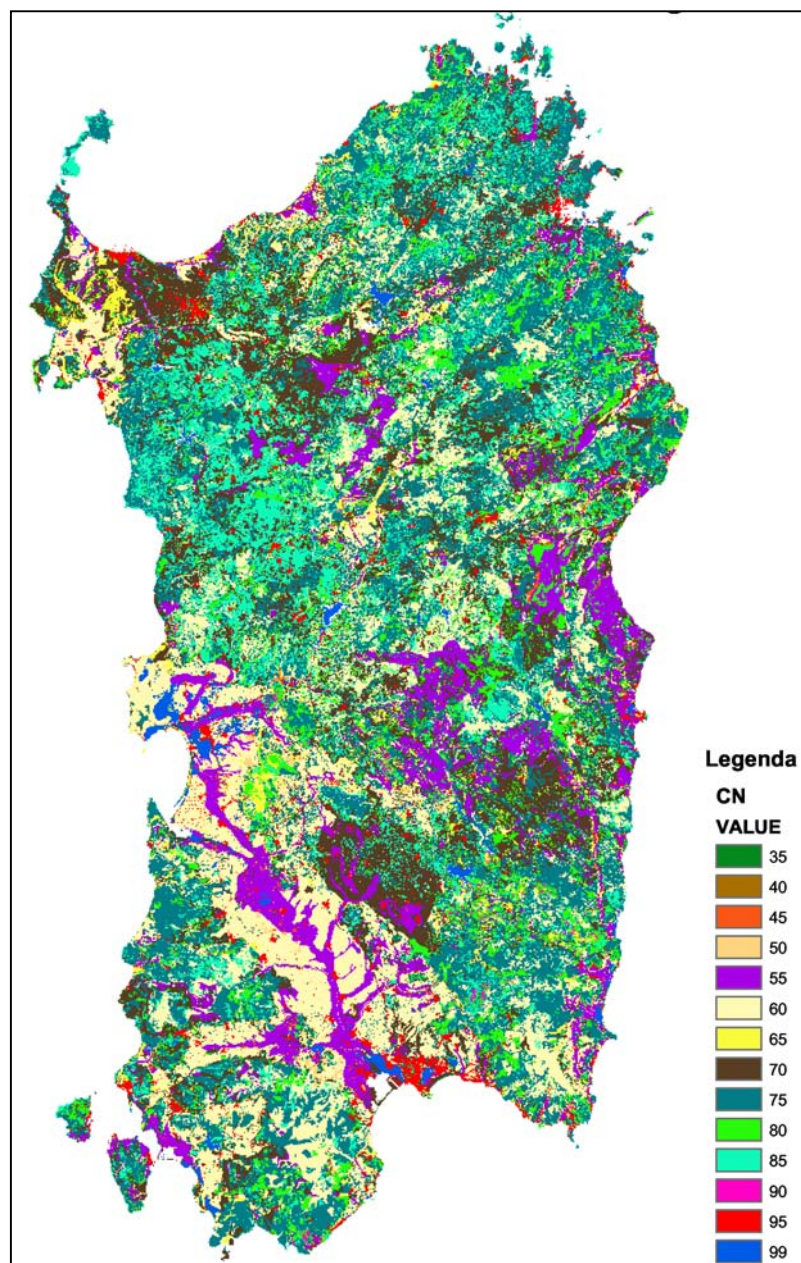


Figura 8– Carta del parametro CN.

Per ogni sottobacino viene quindi incrociato in ambiente GIS il tematismo della carta dei CN con quello della perimetrazione dell'area in esame e definito il valore di CN da utilizzare.

Ulteriore incremento del CN (che così definito nella procedura rappresenta condizioni medie di umidità del suolo antecedenti all'inizio dell'evento, AMCII) avviene per ogni sottobacino nel valutare elevate le condizioni di umidità antecedenti l'evento (condizione AMCIII).

### 1.4.3 Modello TCEV per la definizione delle portate al colmo

Per la stima delle portate al colmo dei bacini di dimensioni superiori a 60 km<sup>2</sup>, si fa riferimento al metodo diretto della regionalizzazione VAPI delle portate al colmo per la Sardegna secondo la distribuzione TCEV.

Si ricorda che le analisi svolte nell'ambito del GNDCI hanno preso in considerazione la modellazione probabilistica delle portate al colmo in Sardegna aggiornando il modello basato sulla distribuzione Lognormale, già da tempo disponibile per la Regione, predisponendo il modello basato sulla distribuzione Two Component Extreme Values TCEV ed effettuando un confronto fra le loro capacità interpretative.

Rimandando alle Linee Guida per una descrizione completa, si riportano i passaggi significativi e gli elementi fondamentali per la definizione delle portate al colmo secondo l'applicazione del metodo regionale TCEV.

Per quanto concerne il primo livello di analisi regionale sono state ottenute le seguenti stime dei parametri  $\Lambda^*$  e  $\theta^*$  di modello:

$$\Lambda^* = 0,3938 ; \theta^* = 5,887$$

che caratterizzano l'intero territorio dell'isola.

Al secondo livello di regionalizzazione, le stazioni a disposizione sono state differenziate in relazione al versante di appartenenza, orientale od occidentale, e alle indicazioni ottenute dalle stime preliminari di  $\Lambda_1$  per ciascuna stazione. Le stime dei valori di massima verosimiglianza del parametro per i due versanti risultano:

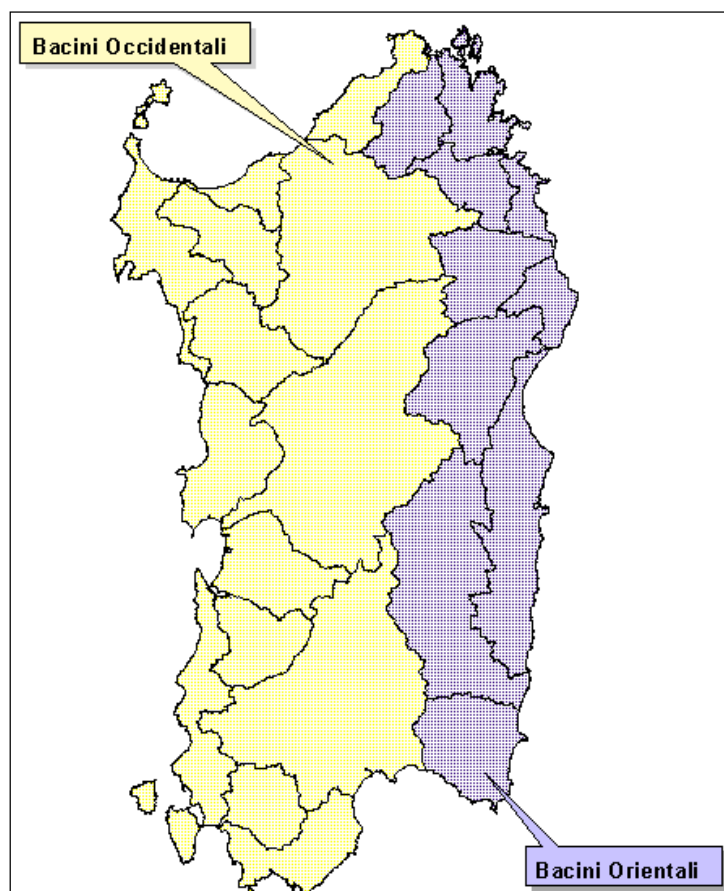


Figura 9– Suddivisione della Regione Sardegna nei due versanti: occidentale e orientale (Fonte Progetto VAPI).

Bacini occidentali  $\Lambda_1 = 6,286$

Bacini orientali  $\Lambda_1 = 4,571$

Pertanto i parametri della distribuzione di probabilità dei massimi annuali delle portate in Sardegna risultano:

$\theta^* = 5,8866$       Bacini occidentali  $\Lambda_1 = 6,286$      $\eta = 4,377$

$\Lambda^* = 0,3938$       Bacini orientali     $\Lambda_1 = 4,571$      $\eta = 4,058$

Nella tabella seguente vengono riportati i valori teorici del coefficiente probabilistico di crescita  $K_T$  per le portate in Sardegna limitatamente ai tempi di ritorno definiti per il Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali.

Tabella 3- Valori teorici di  $K_T$ , coefficiente probabilistico di crescita.

T (anni)	$K_T$ (bacini occidentali)	$K_T$ (bacini orientali)
2	0,65	0,63
50	4,41	4,68
100	5,35	5,70
200	6,29	6,71
500	7,52	8,04

Per quanto riguarda infine il terzo livello di analisi delle piene, nella struttura gerarchica del modello TCEV, si è fatto riferimento all'analisi del parametro modale  $\varepsilon_1$  della distribuzione TCEV. Il legame teorico tra questo parametro e la piena media annua  $\mu_x$  è:

$$\mu_x = \frac{\varepsilon_1}{\ln(\Lambda_1)} \eta$$

I valori stimati nelle singole stazioni idrometriche sono stati regolarizzati in funzione della superficie del bacino  $S$  in modo analogo a quanto fatto per le medie nel modello lognormale ottenendo le seguenti relazioni:

Bacini occidentali     $\ln \varepsilon_1 = -1,1954 + 0,9235 \ln S$

Bacini orientali       $\ln \varepsilon_1 = 0,9882 + 0,6452 \ln S$

#### 1.4.4      Stima delle portate al colmo in sezioni influenzate dalla presenza di laghi artificiali

La presenza lungo il reticolo principale di numerosi invasi, significativi rispetto al volume dello specifico idrogramma di piena, ha necessariamente imposto una procedura che fosse in grado seppur in maniera semplificata, ma allo stesso tempo robusta, di considerare l'effetto dell'invaso sulle portate di piena ad assegnato tempo di ritorno a valle dello sbarramento.

La procedura considerata calcola la portata a valle di uno sbarramento tramite il rapporto di attenuazione del picco ottenuto secondo la formula di Marone (1971)<sup>1</sup>, che come noto esprime il rapporto tra portata indisturbata e laminata in funzione del rapporto tra il volume dell'onda indisturbata e quello del volume di laminazione di uno schema in linea al corso d'acqua, situazione questa assimilabile in tutti gli sbarramenti esaminati. Il rapporto tra i picchi è quindi dato da:

<sup>1</sup> Marone, V., L'Energia Elettrica, n9, 561-567, 1971;

Mancini ed al, La modellistica distribuita nella valutazione degli effetti di laminazione di un sistema di invasi artificiali nel bacino del Fiume Toce; L'Acqua, v4., 31-42, 2000

$$\frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = 1 - \frac{W}{W_i}$$

Dove:

$W_i$ = volume indisturbato dell'onda di piena alla sezione di interesse;

$W$ = volume di laminazione, che nel caso specifico corrisponde o al volume di laminazione della diga se previsto o al volume di invaso in condizioni di sfioro per il massimo invaso;

$Q_{\max i}$ = portata al colmo dell'onda di piena indisturbata alla sezione di interesse a valle della diga;

$Q_{\max u}$ = portata al colmo dell'onda di piena laminata. Dalla presenza dell'invaso  $W$ .

Il volume  $W$ , ossia quello che si invasa durante una piena è stato calcolato pari alla somma del volume di laminazione, se previsto nel foglio condizioni della diga, più quello che si invasa per il livello di massimo invaso allorché funzionano gli organi di sfioro e di scarico, così come ottenuto dalla simulazione dell'equazione di continuità applicata alla geometria della diga e del lago.

Tale volume è calcolato in modo che non sia mai superato il livello di massimo invaso previsto dal "foglio condizioni"; nel caso ipotetico *eccezionale* di potenziale superamento, (e in mancanza di conoscenza della effettiva procedura di manovra sugli eventuali scarichi mobili) si è imposto nell'applicazione dell'equazione dei laghi l'aumento in modo fittizio delle lunghezze degli scarichi di superficie.

La stima dell'idrogramma di piena per portata al colmo assegnata viene condotta in ipotesi di forma triangolare dell'idrogramma e volume pari alla precipitazione di durata pari a quella critica e di assegnato tempo di ritorno (US SCS, indicato da Integrazioni Metodologiche alle Linee Guida, par. 4.2.1, redatte dalla Direzione Scientifica del Progetto su commissione della Regione Autonoma Sardegna).

Si assume un idrogramma di forma triangolare, ipotizzando che il tempo di base,  $T_b$ , sia dato da:  $T_b = \frac{2W}{Q_{\max}}$ ,

dove  $W$  è il volume di pioggia netta calcolato dalla linea segnalatrice di possibilità pluviometrica e  $Q_{\max}$  la portata al colmo stimata.

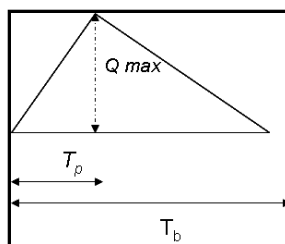


Figura 10– Schema idrogramma triangolare.

Una volta stimato il volume di pioggia netta è quindi possibile calcolare i tempi caratteristici dell'idrogramma note le relazioni:

$$T_p = T_b / 2,67, \quad T_b - T_p = 1,67 T_p$$

### Calcolo del Volume di pioggia netta $W$

Al fine di definire i volumi di pioggia netta  $W$  per i differenti tempi di ritorno, si fa riferimento alle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica determinate con la distribuzione probabilistica TCEV, come descritto in precedenza.

### Calcolo della durata di pioggia critica

Per la determinazione del valore della durata critica della precipitazione si fa riferimento al calcolo del tempo di corruzione e del tempo di formazione del deflusso descritto nel capitolo 1.4.2 - Metodo razionale per la definizione delle portate al colmo.

### Calcolo della pioggia efficace

Per un evento meteorico con altezza cumulativa di pioggia  $P$  (e pertanto ottenuta per durata critica  $\Theta$ ), l'altezza cumulativa di pioggia efficace  $P_e$  è data dalla relazione:

$$P_e = (P - I_a)^2 / ((P - I_a) + S),$$

dove

$I_a = c S$  è l'altezza di pioggia sottratta inizialmente ai processi di ritenzione e di formazione delle piogge efficaci (con  $c$  comunemente assunto pari a 0,2);

$S = 25((1000/CN) - 10)$  è la massima altezza di pioggia che può essere ritenuta.

### 1.4.5 Stima delle portate al colmo sulle sezioni a valle di serbatoi artificiali.

Al bacino chiuso in corrispondenza dello sbarramento vengono quindi attribuite le nuove portate laminate che risultano dall'applicazione dell'equazione dei laghi (esempio figura seguente).

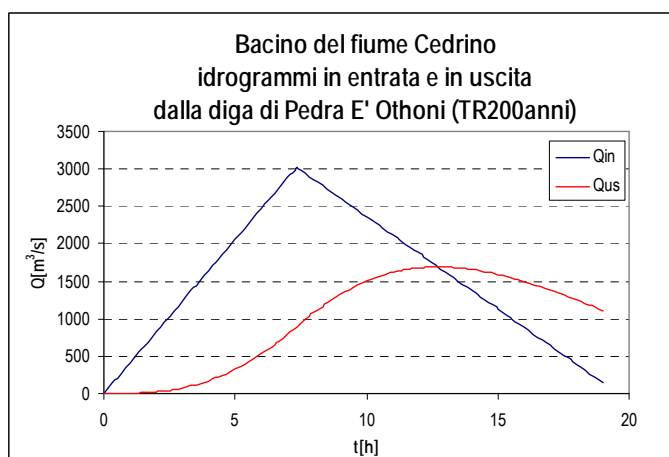


Figura 11 – Idrogrammi in entrata e uscita dalla diga di Pedra E' Othoni, bacino del fiume Cadrino, TR200anni.

Per le sezioni a valle della diga l'effetto di laminazione viene valutato secondo la formulazione empirica di Marone<sup>2</sup> calcolata per ciascuna sezione:

$$\frac{Q_{\max u}}{Q_{\max i}} = 1 - \frac{W}{W_i}$$

dove

$W_i$  = volume dell'onda di piena indisturbata alla sezione di calcolo;

$W$  = volume utile di laminazione della diga;

$Q_{\max i}$  = portata al colmo dell'onda di piena indisturbata del bacino;

$Q_{\max u}$  = portata al colmo dell'onda di piena laminata.

<sup>2</sup> Calcolo di massima di un serbatoio di laminazione "Marone, L'Energia Elettrica n°9, 1971"

## 1.4.6 Verifiche e confronti

Le portate calcolate in ogni bacino vengono confrontate con la curva di inviluppo rispetto alla superficie della macroarea di appartenenza e con eventuali dati storici di stazioni di misura presenti sull'asta con relative analisi statistiche locali.

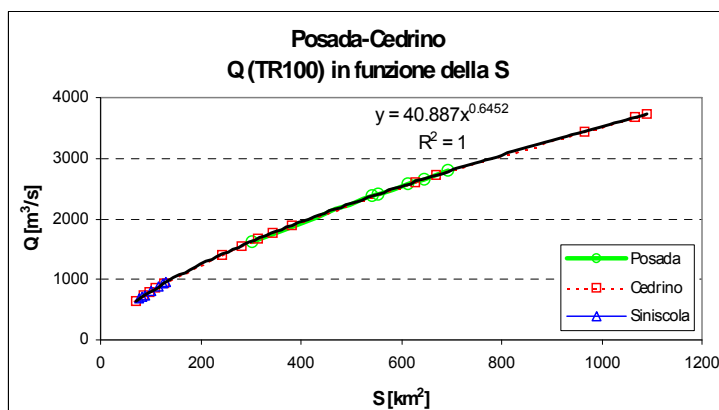


Figura 12 – Esempio di confronto delle portate del singolo bacino con la curva di inviluppo relativa a tutti i bacini appartenenti alla medesima macroarea (es. Posada-Cedrino, TR = 100anni).

I contributi unitari di piena,  $q$ , vengono confrontati con i valori indice maggioranti  $q_s$  (Sirchia-Fassò) e  $q_{100}$  (Contributo unitario T= 100 anni secondo Gherardelli Marchetti), le cui espressioni sono riportate di seguito:

$$q = \frac{Q}{S} \quad (m^3/s \text{ km}^2)$$

$q_s$  (Sirchia-Fassò, curva inviluppo dei massimi di piena valida solo per la Regione Sardegna):

$$q_s = 207 A^{-0,6} \quad (m^3/s \text{ km}^2)$$

$$\text{per } 21 \text{ km}^2 < A < 1.000 \text{ km}^2$$

$$q_s = 45,8 A^{-0,106} \quad (m^3/s \text{ km}^2)$$

$$\text{per } A < 21 \text{ km}^2$$

$q_{100}$  (Gherardelli e Marchetti):

$$q_{100} = q \cdot \left(\frac{S}{100}\right)^n \quad (m^3/s \text{ km}^2)$$

dove:

$Q$  = portata al colmo ( $m^3/s$ );

$S$  = superficie del bacino ( $km^2$ ).

$n$  = esponente che è stato assunto pari a:

2/3 per  $S$  maggiore di 10  $km^2$ ;

1/2 per  $S$  compreso tra 5 e 10  $km^2$ ;

1/3 per  $S$  minore di 5  $km^2$ .

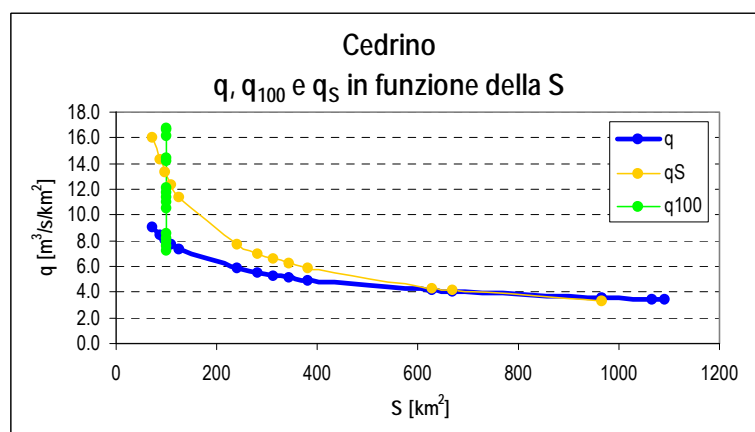


Figura 13 – Esempio di confronto dei contributi specifici calcolati nel bacino del Posada ( $q$ ), con la formulazione di Gherardelli-Marchetti ( $q_{100}$ ) e con la formulazione di Sirchia - Fassò ( $q_s$ ).

## 2. ANALISI IDRAULICA

### 2.1 Modello di calcolo ed approccio metodologico

L'analisi idraulica viene condotta, in moto permanente, utilizzando il modello numerico HEC-RAS che consente il calcolo dell'andamento dei profili di corrente in moto permanente gradualmente variato od in moto vario in alvei naturali o canali artificiali includendo anche la valutazione degli effetti sulla corrente dovuti all'interazione con ponti, tombinature, briglie, stramazzi, aree golenali ecc.

La determinazione del profilo teorico è ottenuta tramite l'applicazione del cosiddetto *Standard step method* che si basa sulla semplice equazione monodimensionale del contenuto energetico della corrente:

$$H_1 - H_2 = h_f + h_e$$

dove  $H_1$  [m] ed  $H_2$  [m] sono i carichi totali della corrente nelle sezioni di monte e di valle del tratto d'alveo considerato,  $h_f$  [m] sono le perdite di carico dovute all'attrito del fondo e delle sponde mentre  $h_e$  [m] è un termine che tiene conto degli effetti dovuti alla non cilindricità della corrente. In particolare  $h_f$  dipende principalmente dalla scabrezza del tratto d'alveo considerato ed è esprimibile come:

$$h_f = j_f \cdot L$$

con  $j_f$  pendenza motrice nel tratto di lunghezza  $L$  [m].

La pendenza  $j_f$  può essere calcolata con diverse formulazioni in funzione della pendenza motrice  $J$  in corrispondenza delle sezioni di inizio e fine di ciascun tratto. Il calcolo del termine  $J$  nella singola sezione si ottiene mediante la:

$$J = \left[ \frac{Q}{K} \right]^2$$

dove  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] è la portata di calcolo e  $K$  (denominato conveyance) è ricavabile attraverso la seguente espressione:

$$K = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R^{\frac{2}{3}}$$

dove  $A$  [m<sup>2</sup>] l'area della sezione liquida,  $R$  [m] il raggio idraulico e  $n$  [m<sup>-1/3</sup>s] è il parametro rappresentativo della scabrezza del fondo e delle sponde di Manning.

Il termine  $h_e$  dipende invece dalla variazione del carico cinetico della corrente tra le sezioni 1 e 2 dovuta al cambio di geometria delle sezioni stesse ed è a sua volta esprimibile come:

$$h_e = \beta \cdot \left| \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2 \cdot g} - \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2 \cdot g} \right|$$

dove  $\beta$  è un coefficiente di contrazione o espansione dipendente dalle condizioni geometriche del tratto considerato,  $V_1$  e  $V_2$  [m/s] sono i valori delle velocità medie agli estremi del tronco e  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  sono i coefficienti correttivi dell'energia cinetica.

Il modello consente di suddividere la sezione in più zone in cui assegnare un valore diverso del parametro  $n$  di scabrezza; in particolare è possibile individuare tre zone principali: quella centrale dell'alveo inciso (denominata *main channel*) e due zone laterali golenali (denominate *right and left overbanks*).

Per ciascuna di tali zone, oltre che per l'intera sezione di deflusso, il programma calcola il valore delle grandezze idrauliche (portata, velocità, numero di Froude, tensioni tangenziali ecc.) che caratterizzano il moto; esso consente pertanto di individuare la quota parte di portata che defluisce all'interno dell'alveo inciso e quella che compete invece alle aree golenali.

Il programma è in grado di simulare il deflusso attraverso i ponti mediante la loro schematizzazione geometrica (impalcato, pile, setti, ecc.). La procedura di calcolo utilizzata consente la simulazione del deflusso a pelo libero al di sotto dell'impalcato, del deflusso in pressione al di sotto dell'impalcato e la combinazione del deflusso in pressione e del deflusso con scavalco dell'impalcato stesso (funzionamento a stramazzo).

Per il calcolo del profilo di corrente in corrispondenza delle strutture, tra le diverse opzioni offerte dal codice di calcolo, sono state selezionate le equazioni di bilancio dell'energia ed il metodo dei momenti, tra le quali il programma seleziona in automatico la formulazione caratterizzata dalla maggiore dissipazione energetica, per il deflusso al di sotto dell'impalcato (*low flow*); viene invece assunta la schematizzazione con deflusso in pressione e stramazzo al di sopra dell'impalcato (*pressure and weir*) per le situazioni con livello della corrente tale da interessare l'intradosso del ponte (*high flow*).

Le condizioni limite per il deflusso in pressione sono definite dal programma in base al livello di corrente a monte, come richiesto dalla Direzione scientifica di progetto.

Gli input di portata sono definiti sulla base delle risultanze della precedente analisi idrologica. In particolare, ogni tratto viene suddiviso in tronchi per i quali sono assunti valori al colmo costanti, limitati da sezioni a cui è associata una variazione di portata. Cautelativamente, per ogni tronco, viene assunto il valore di portata costante definito nella sezione di valle dello stesso.

Complessivamente vengono condotte 5 simulazioni relative ai tempi di ritorno 2, 50, 100, 200 e 500 anni.

La geometria dei corsi d'acqua, in termini di sezioni trasversali e caratteristiche delle strutture, viene definita sulla base del rilievo topografico appositamente realizzato.

I valori di scabrezza sono invece calcolati utilizzando una metodologia di dettaglio in modo da differenziare le caratteristiche delle singole porzioni di ogni sezione trasversale, sulla base dei risultati delle attività di caratterizzazione granulometrica e di rilievo della vegetazione.

## 2.2 Costruzione del modello numerico

### 2.2.1 Schematizzazione geometrica

La geometria dei corsi d'acqua, in termini di sezioni trasversali e caratteristiche delle strutture, viene definita sulla base del rilievo topografico appositamente realizzato. Alcune sezioni vengono replicate in corrispondenza di attraversamenti o salti di fondo per una più corretta schematizzazione modellistica, come presentato nel paragrafo successivo.

Per i tratti delimitati a valle dallo sbocco a mare, viene aggiunta una sezione identificata con il numero "0" posta in mare aperto, in cui è imposta la condizione al contorno di valle.

Ove richiesto da esigenze di modellazione, alcune sezioni di rilievo sono state estese ai piani golenali, in base alle fonti di riferimento disponibili, quali il modello digitale del terreno a maglia 10 metri della Regione Sardegna e la CTR in formato vettoriale.



I valori dei coefficienti di contrazione ed espansione richiesti dal modello numerico sono stati assunti rispettivamente pari a 0,1 e 0,3 come suggerito dal manuale tecnico in presenza di variazioni graduali.

Le barre di foce non sono inserite nell'assetto geometrico dei tratti terminali di asta modellizzati; la geometria del tratto terminale viene pertanto in generale rappresentata nel modello utilizzando la sagoma dell'ultima sezione utile a monte del tratto intasato dalla barra di foce, traslata in orizzontale fino al termine dell'asta fluviale.

### 2.2.2 Rappresentazione di attraversamenti e strutture

Tutti gli attraversamenti sono schematizzati utilizzando 4 sezioni trasversali (cfr. Integrazioni Linee Guida), la cui distanza dalla struttura è definita in modo da rappresentare correttamente il restringimento indotto dalla struttura stessa, secondo l'approccio suggerito nel manuale d'uso del modello numerico utilizzato:

- sezione 1, a valle della struttura, alla distanza a cui termina l'effetto indotto dal restringimento;
- sezione 2, immediatamente a valle della struttura;
- sezione 3, immediatamente a monte della struttura;
- sezione 4, a monte della struttura, posta alla distanza a cui inizia a risentirsi dell'effetto di restringimento.

Le distanze delle sezioni 1 e 4 dalla struttura sono quindi definite singolarmente in base all'ingombro del ponte rispetto alla sezione utile di deflusso, adottando il criterio per cui la distanza tra la sezione 4 ed il ponte è pari a metà della distanza tra la sezione 1 ed il ponte stesso.

Per il calcolo del profilo di corrente in corrispondenza delle strutture, tra le diverse opzioni offerte dal codice di calcolo, sono state selezionate le equazioni di bilancio dell'energia ed il metodo dei momenti, tra le quali il programma seleziona in automatico la formulazione caratterizzata dalla maggiore dissipazione energetica, per il deflusso al di sotto dell'impalcato (*low flow*); viene invece assunta la schematizzazione con deflusso in pressione e stramazzo al di sopra dell'impalcato (*pressure and weir*) per le situazioni con livello della corrente tale da interessare l'intradosso del ponte (*high flow*).

Le condizioni limite per il deflusso in pressione sono definite dal programma in base al livello di corrente a monte, rapportato dal modello alla quota dell'intradosso.

Per la rappresentazione dei salti di fondo, concordemente con le indicazioni della Direzione scientifica di progetto, viene assunta la schematizzazione attraverso le sole sezioni trasversali, alternativa all'inserimento delle apposite strutture previste dal codice di calcolo utilizzato. In corrispondenza di ogni traversa o salto di fondo, sono quindi inserite 2 sezioni a breve distanza poste immediatamente a monte ed a valle del salto.

Sempre su indicazione della Direzione scientifica di progetto, non sono state inserite nel modello le *ineffective flow area*, mentre l'opzione *levee* è stata attivata limitatamente alle arginature ed agli elementi di discontinuità significativi caratterizzati da una lunghezza longitudinale compatibile con l'interasse tra le sezioni di calcolo.

Complessivamente il modello numerico è quindi costruito con un numero di sezioni trasversali superiore a quello di rilievo. Per una più semplice identificazione delle sezioni replicate in presenza delle strutture, al numero identificativo caratterizzante ciascuna sezione di rilievo, viene quindi associato un secondo numero a seguire, sempre crescente da valle verso monte.

### 2.2.3 Coefficienti di scabrezza

La determinazione dei parametri di scabrezza da associare alle sezioni di calcolo presenta non poche criticità data la significativa influenza di tali valori sui livelli di corrente e la contestuale assenza di una regola di calcolo univoca. Nel caso dei corsi d'acqua oggetto di studio non è peraltro possibile sopperire a tale mancanza facendo affidamento ad adeguati dati di calibrazione poiché, sebbene durante le indagini in campo siano state acquisite informazioni puntuali sui livelli di piena storici, non è possibile associare a questi valori di portata sufficientemente affidabili per la taratura del modello.

Stanti queste premesse, la scelta dei parametri di scabrezza è stata condotta sulla base di un criterio per quanto possibile deterministico nella caratterizzazione della singola sezione o porzione di territorio, definendo quindi una metodologia tale da poter essere adottata in modo standardizzato su tutti i corsi d'acqua della Regione Sardegna oggetto del Piano Stralcio Fasce Fluviali.

In generale, la scabrezza caratteristica di un tratto di corso d'acqua è data dalla somma di molteplici fattori tra loro indipendenti, quali:

- la morfologia e lo sviluppo planimetrico dell'alveo;
- il materiale costituente il fondo ed i piani golenali;
- l'irregolarità delle sezioni trasversali;
- la presenza di ostruzioni;
- la presenza di vegetazione.

A questi elementi si aggiunge poi, con peso spesso superiore rispetto agli altri fattori, ed in particolare durante gli eventi intensi quali quelli oggetto della presente analisi, l'effetto del materiale trasportato dalla corrente.

Ognuno dei fattori sopra elencati è in grado di esercitare, in particolari condizioni, un effetto elevato sulle condizioni di deflusso della corrente. Tale effetto può, per ogni elemento, essere analizzato e tenuto in considerazione a diverso livello di dettaglio; è però necessario adottare un approccio coerente con la determinazione degli altri fattori nonché con il grado di incertezza associato allo studio.

In base alle considerazioni sopra esposte risulta quindi adeguato alle finalità e dettaglio dello studio, nonché alla tipologia di informazioni disponibili, utilizzare un metodo globale di calcolo dei valori di scabrezza, applicato alla singola porzione di sezione.

In particolare, si è ritenuto di procedere proponendo una divisione di ciascuna sezione trasversale in tratti caratterizzati da scabrezza omogenea secondo quanto illustrato nella tabella seguente.

Tabella 4 – Suddivisione dei tratti di sezione trasversale caratterizzati da scabrezza omogenea.

Codice identificativo del tratto	Ubicazione
1	Parte incisa dell'alveo, in cui defluiscono le basse portate
2	Tratto vegetato in sponda sinistra
3	Tratto vegetato in sponda destra
4	Tratto golenale in sponda sinistra esterno al tratto vegetato rispetto alla parte incisa dell'alveo
5	Tratto golenale in sponda destra esterno al tratto vegetato rispetto alla parte incisa dell'alveo

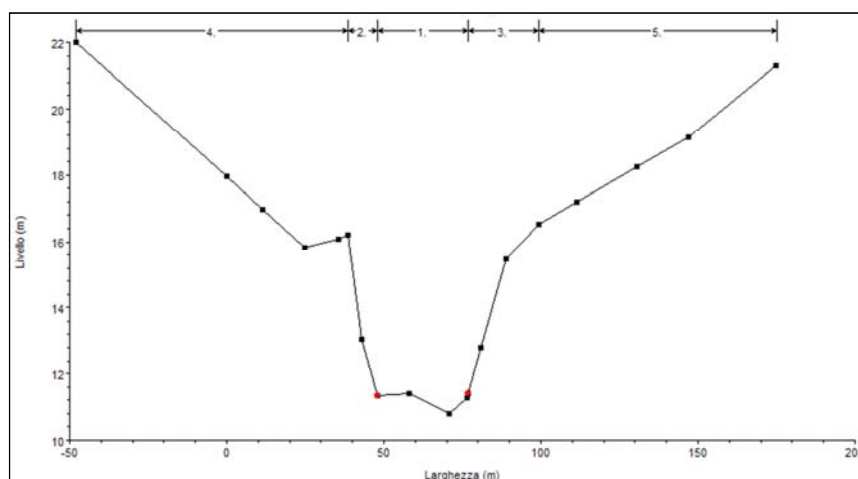


Figura 14 – Esempio di suddivisione in tratti di sezione trasversale caratterizzati da scabrezza omogenea. In alto vengono riportati i codici identificativi dei singoli tratti descritti in Tabella 4.

La suddivisione trasversale di ogni sezione è stata definita sulla base dell'indagine di campo, dell'analisi vegetazionale e delle foto aeree, limitando la zona centrale (tratto 1) al solo alveo inciso caratterizzato da minore vegetazione, definendo quindi il limite di tale porzione di sezione non necessariamente in base alla topografia o morfologia dell'alveo bensì alla variazione nella presenza di arbusti od altri elementi in grado di ostacolare il deflusso della corrente.

L'effetto dovuto alla presenza di vegetazione in alveo e nelle golene risulta essere particolarmente rilevante per i corsi d'acqua della Regione Sardegna. Proprio per l'importanza che assume la determinazione della resistenza al moto esercitata dalla vegetazione i tratti di sezione trasversale maggiormente vegetati (identificati come tratto 2 e 3 secondo la classificazione illustrata in tabella 1) sono stati oggetto di analisi separata riportata nel paragrafo successivo.

La scabrezza caratterizzante la zona centrale è stata definita prevalentemente sulla base della granulometria dell'alveo, mediante la formula:

$$K_s = 26 / (d_{90}^{1/6})$$

correggendone il risultato qualora si sia registrata la significativa presenza di vegetazione nell'alveo inciso.

La scabrezza relativa ai tratti identificati secondo la suddivisione sopra riportata come tratto 4 e tratto 5, caratterizzante pertanto i due tratti golenali, in sinistra ed in destra, se presenti, esterni al tratto maggiormente vegetato in genere corrispondente ai settori sponale e perifluviale di pertinenza demaniale, è stata valutata facendo riferimento alla formulazione proposta dal manuale "Open channel hydraulics", Ven te Chow, richiamata dalla "Direttiva contenente in criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno delle fasce A e B" approvata dall'Autorità di Bacino del Po con delibera n.10 del 5.4.06, secondo cui il valore del parametro di Manning è dato dalla combinazione del peso dei singoli fattori sopra elencati secondo la formulazione:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5,$$

in cui ogni singolo parametro è definito sulla base di quanto riportato nella Tabella 5.

La definizione dei singoli parametri presenti nella formula di calcolo è stata condotta applicando un criterio per quanto possibile oggettivo, attribuendo maggiore peso ai fattori più rilevanti per il tratto oggetto di analisi, quali la granulometria e la presenza di vegetazione; i valori dei singoli parametri sono stati attribuiti sulla base criteri

riportati a seguire, avendo definito un approccio tale da garantire la coerenza tra i valori risultanti dalla formula di calcolo con quanto generalmente riscontrabile in letteratura.

- $n_0$ , *materiale costituente il fondo*: si è fatto riferimento alle evidenze di sopralluogo. Complessivamente, ai tratti classificati con sedimenti fini è stato attribuito un valore di  $n_0$  pari a 0,024, ai tratti con sedimenti più grossolani un valore di 0,028, in presenza di letto roccioso ma con blocchi si è invece assunto il valore di 0,026.
- $n_1$ , *irregolarità della superficie della sezione*: il parametro è stato assunto variabile tra 0,005 e 0,02, in funzione della effettiva irregolarità della gola individuata sulla base delle informazioni tratte durante i sopralluoghi in campo, dal materiale fotografico e dalle ortofoto.
- $n_2$ , *variazione della forma e della dimensione della sezione trasversale*: ricordando che le perdite di carico dovute a contrazione ed espansione del flusso sono già tenute in conto dal codice di calcolo mediante gli appositi coefficienti e riscontrando comunque una maggiore irregolarità delle sezioni nelle porzioni più esterne, il parametro  $n_2$  è stato assunto pari a 0,005. Tale valore è stato mantenuto costante per tutte le sezioni di calcolo.
- $n_3$ , *effetto relativo di ostruzioni*: l'effetto dovuto alla vegetazione è già considerato nello specifico parametro  $n_4$  mentre l'influenza dovuta a strutture o altri elementi puntuali è considerata nel modello numerico a scala locale; pertanto il valore del parametro  $n_3$  è stato assunto pari a 0 per tutte le sezioni di calcolo.

Tabella 5 – Valori dei singoli parametri per il calcolo del coefficiente di scabrezza globale.

Condizioni dell'alveo		Valori	
Materiale costituente l'alveo	Terra	$n_0$	0.020
	Roccia		0.025
	Alluvione grossolana		0.028
	Alluvione fine		0.024
Irregolarità della superficie della sezione	Trascurabile	$n_1$	0.000
	Bassa		0.005
	Moderata		0.010
	Elevata		0.020
Variazione della forma e della dimensione della sezione trasversale	Graduale	$n_2$	0.000
	Variazione occasionalmente		0.005
	Variazione frequente		0.010-0.015
Effetto relativo di ostruzioni	Trascurabile	$n_3$	0.000
	Modesto		0.010-0.015
	Apprezzabile		0.020-0.030
	Elevato		0.040-0.060
Effetto della vegetazione	Basso	$n_4$	0.005-0.010
	Medio		0.010-0.025
	Alto		0.025-0.050
	Molto alto		0.050-0.100
Grado di sinuosità dell'alveo	Modesto	$m_5$	1.000
	Apprezzabile		1.150
	Elevato		1.300

- *n4, effetto della vegetazione*: è stato attribuito un parametro *n4* variabile da un valore minimo di 0,01 (effetto della vegetazione “medio-basso”) ad un valore massimo di 0,025 (effetto della vegetazione “medio-alto”).
- *m5, grado di sinuosità*: il valore del parametro *m5* è stato assunto pari ad 1 nei tratti con sviluppo prevalentemente rettilineo o con curve ad ampio raggio, pari ad 1,15 nei tratti interessati da curve più strette e pari a 1,3 nei casi di andamento fortemente meandriforme.

I valori attribuiti ai parametri di calcolo secondo la metodologia adottata consentono un'adeguata caratterizzazione delle diverse porzioni di sezione e di tronco fluviale, mantenendo peraltro i valori di scabrezza complessiva negli intervalli definiti in letteratura in base alle caratteristiche globali dell'alveo.

Si osservi che la metodologia descritta è stata attuata in tutti i tratti fluviali oggetto di campionamenti granulometrici e analisi delle caratteristiche vegetazionali, in linea di massima individuabili come gli ultimi 10-15 km dei corpi idrici in esame; nei tratti di monte il minor dettaglio delle analisi in campo condotte ha portato a modificare i criteri di stima della scabrezza lungo le sezioni trasversali ed in particolare:

- la scabrezza dell'alveo attivo (tratto 1), non essendo disponibili dati granulometrici, è stata determinata applicando la formulazione proposta dal Ven te Chow in base alle evidenze raccolte nei sopralluoghi in campo; rispetto ai criteri descritti per le fasce golenali è opportuno precisare:
  - *n1*: l'alveo inciso è caratterizzato da una maggiore facilità di deflusso rispetto alle fasce golenali e pertanto il parametro *n1* è stato assunto pari a 0;
  - *n2*: poiché le perdite di carico sono già considerate dal codice di calcolo mediante gli appositi coefficienti il parametro è stato assunto pari a 0 nella parte centrale dell'alveo;
  - *m5*: il valore di sinuosità è stato assunto pari a 1 per la parte incisa dell'alveo, il cui sviluppo fa riferimento a distanze progressive che già tengono conto dell'eventuale andamento meandriforme del corso d'acqua.
- la definizione delle scabrezze dei tratti 2 e 3 è stata definita in base ai criteri descritti precedentemente per le fasce golenali (tratti 4 e 5), sulla base delle informazioni raccolte durante i sopralluoghi in campo.

#### 2.2.3.1 Valutazione della scabrezza nei tratti di sezione maggiormente vegetati

Come già ricordato, l'effetto dovuto alla presenza di vegetazione in alveo e nelle golene risulta essere particolarmente rilevante per i corsi d'acqua della Regione Sardegna. L'analisi della resistenza offerta dalla vegetazione è stata quindi condotta in modo dettagliato sulla base delle informazioni tratte durante i sopralluoghi in campo, del materiale fotografico, delle ortofoto e di quanto definito nelle schede di rilevamento della vegetazione. In particolare, per ogni tratto identificato come omogeneo, le schede classificano la densità *arborea e/o arbustiva* in *assente*, *sporadica*, *rada* o *prevalente* distinguendo le tre porzioni di alveo sinistra, centrale e destra.

È stato quindi possibile definire delle classi-tipo funzionali alla presenza-assenza, tipologia, densità di vegetazione sulla base delle risultanze dei rilievi vegetazionali. Nella tabella seguente vengono riportate le classi identificate:

Tabella 6 - Classi per la definizione del valore di scabrezza.

Densità	Tipo vegetazione				
	Arbustiva	Arborea 1	Arborea 2	Arborea e Arbustiva	½ Arbustiva e ½ Arborea
Sporadica	C1	C2	C3	C4	C5
Rada	C6	C7	C8	C9	C10
Prevalente	C11	C12	C13	C14	C15

Le classi si distinguono per tipo di vegetazione in 5, a seconda che vi sia la presenza di arbusti (arbustiva), alberi con fusto di diametro inferiore a 20 cm (arborea1), alberi con fusto di diametro superiore a 20 cm (arborea2), la compresenza di arbusti e alberi con effetto congiunto ai fini della definizione del valore di scabrezza (arborea tipo 1 e arbustiva) oppure vegetazione in parte arbustiva e in parte arborea tipo 1 (½ Arbustiva e ½ Arborea).

Per definire i valori di scabrezza associabili alle sopracitate classi, si è fatto riferimento ad alcuni siti campione individuati nel *bacino pilota* del fiume Padrogiano e alle metodologie indicate nel documento "Integrazioni metodologiche alle Linee Guida per la redazione del progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali", (luglio 2006).

Per la vegetazione di carattere erboso-arbustivo è stato utilizzato il criterio di Kouven (Kouven, 1988, Kouven e Unny, 1969) che tiene conto, nella definizione della scabrezza equivalente, della flessibilità della vegetazione;  $k_v$  viene fatta dipendere dalla rigidezza della vegetazione stessa, attraverso il parametro  $M_v$ , che tiene conto implicitamente anche della densità spaziale della vegetazione:

$$k_v = 0.14 h_{veg} \left( \frac{\left( \frac{M_v}{\tau_0} \right)^{0.25}}{h_{veg}} \right)^{1.59}$$

dove:

$h_{veg}$  rappresenta l'altezza media delle piante e  $\tau_0$  lo sforzo tangenziale al fondo calcolato in ipotesi di scabrezza di riferimento,  $K_{s0}$ . Il valore della rigidezza  $M_v$  è distinto a seconda che la vegetazione sia solo verde o solo dormiente o verde e dormiente, ed è espresso rispettivamente dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} M_v &= 319 h_{veg}^{3.3} & [M_v] &= [N/m^2] ; [h_{veg}] = [m] \text{ (vegetazione verde)} \\ M_v &= 254 h_{veg}^{2.26} & [M_v] &= [N/m^2] ; [h_{veg}] = [m] \text{ (vegetazione dormiente)} \\ M_v &= 223 h_{veg}^{3.125} & [M_v] &= [N/m^2] ; [h_{veg}] = [m] \text{ (vegetazione verde o dormiente)} \end{aligned}$$

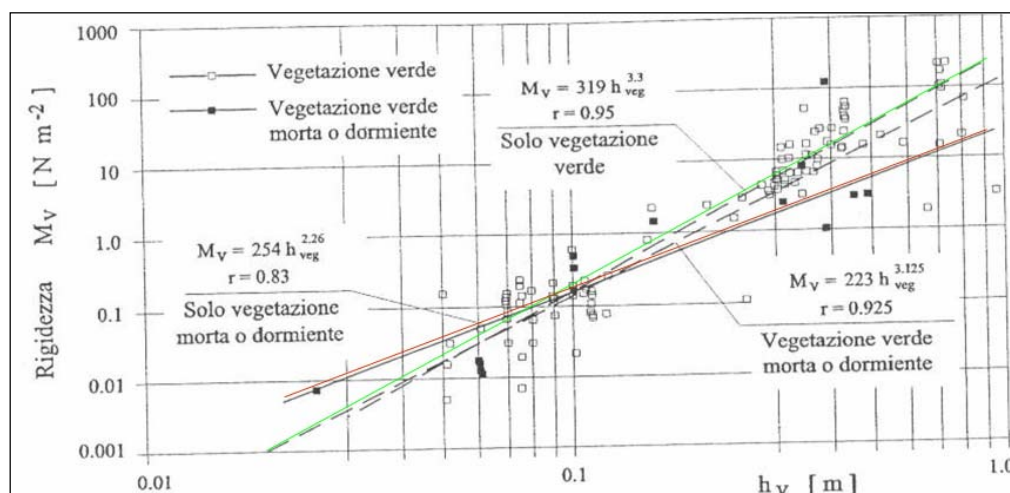


Figura 15 - Rigidezza della vegetazione flessibile in alveo a seconda dello stato di attività (Kouven, 1999).

Preso come riferimento il sito campione costituito dal tratto omogeneo 12 del corso d'acqua Padrogiano, e nello specifico la sezione PA002, che presenta in sponda sinistra una prevalenza di vegetazione di tipo arbustivo rispetto a quello arborea, si è utilizzato il criterio di Kouven per il calcolo della scabrezza.

Si è considerato cautelativamente un'altezza media delle piante pari a 1m, uno sforzo tangenziale al fondo pari a 2,8 kg/m<sup>2</sup> e un valore di rigidezza pari a 223 N/m<sup>2</sup>, calcolato in ipotesi di vegetazione verde o dormiente:

- $h_{veg} = 1,00$  m,
- $\tau_0 = 2,80$  kg/m<sup>2</sup>;
- $M_v = 223,0$  N/m<sup>2</sup>.

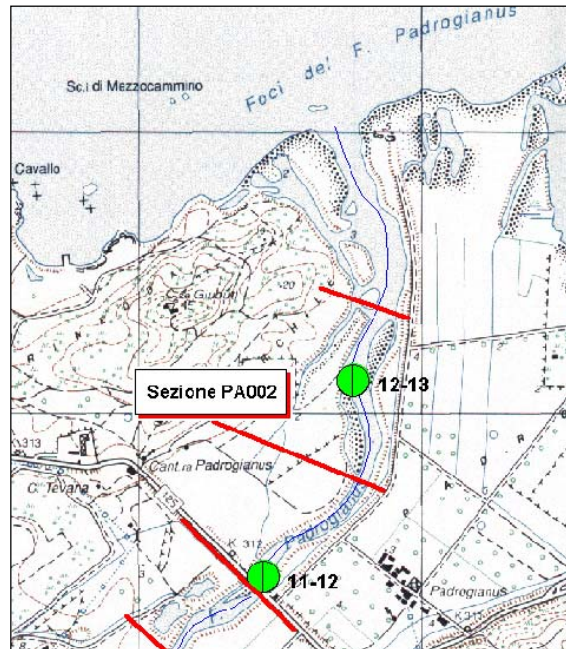


Figura 16 - Tratto omogeneo n. 12 con sezione PA002, presa ad esempio per la definizione della scabrezza della vegetazione di tipo arbustivo.

Sulla base dei suddetti dati si sono ottenuti i seguenti valori di scabrezza:  $n = 0,32$  m<sup>-1/3</sup> s ovvero un  $K_s = 3,11$  m<sup>1/3</sup> / s.

Da qui la definizione delle seguenti classi:

- C11 = vegetazione prevalente di tipo arbustivo, valutato pari al 100% del valore trovato  $K_s = 3$  m<sup>1/3</sup>/s  $n = 0,33$  m<sup>-1/3</sup> s;
- C6 = vegetazione rada di tipo arbustivo, valutato pari al 80% del valore per la densità prevalente, ovvero  $K_s = 4$  m<sup>1/3</sup>/s e  $n = 0,25$  m<sup>-1/3</sup> s;
- C1 = vegetazione sporadica di tipo arbustivo, valutato pari al 60% del valore per la densità prevalente, ovvero  $K_s = 5$  m<sup>1/3</sup>/s e  $n = 0,2$  m<sup>-1/3</sup> s.

Per la vegetazione di carattere arboreo la resistenza è stata calcolata analizzando la resistenza offerta dalle singole piante considerando come caso esempio il tratto omogeneo n.1, nello specifico la sezione PA029, (limitando l'analisi alla tipologia "arborea 1" in quanto lungo il reticolo in esame non sono stati rilevati siti caratterizzabili con la tipologia "arborea 2"), secondo la formula di Petrysk e Bosmajian, (1975):

$$k_{s-veg} = \frac{k_{s0}}{\sqrt{1 + \frac{\Lambda_v}{2g} k_{s0}^2 R_h^{1/3}}}$$

dove:

$$\Lambda_v = C_R \frac{A_{pj}}{a_x a_y}$$



con  $A_{pj}$  sezione orizzontale di ingombro di una pianta,  $C_R$  coefficiente di resistenza,  $a_x$  distanza tra le piante nella direzione della corrente,  $a_y$  distanza tra le piante nella direzione perpendicolare alla corrente,  $R_h$  raggio idraulico dell'area interessata,  $k_{s0}$  coefficiente di Strickler del terreno.

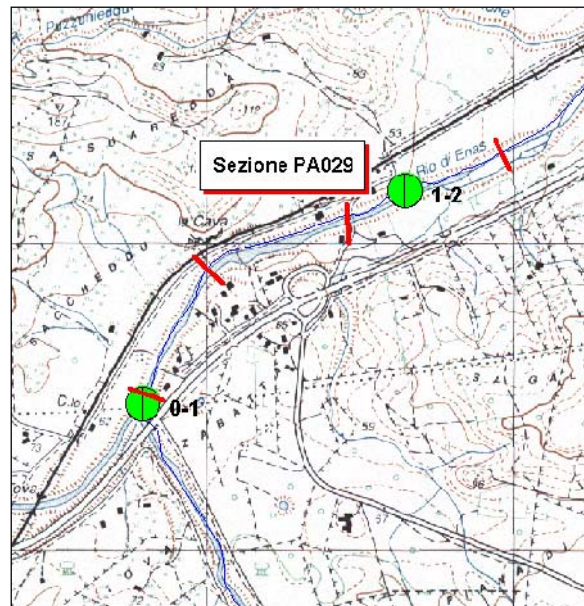


Figura 17 - Tratto omogeneo n. 1, preso ad esempio per la definizione della scabrezza della vegetazione di tipo arboreo.

Sono stati definiti:

- un valore di  $C_R$  pari a 1,1, valutato in funzione del raggio idraulico;
- un valore di  $A_{pj}$  pari a 0.2 m<sup>2</sup>, considerando la tipologia di vegetazione presente nel tratto omogeneo in esame, prevalentemente salici tamerici e ontani;
- $a_x$  e  $a_y$  assunte pari a 2 m sulla base dei valori riportati in tabella VI "parametri geometrici tipici della vegetazione in funzione delle diverse tipologie" tratti dalle Integrazioni Metodologiche delle Linee Guida per la redazione del Progetto di Piano Stralcio delle Fasce Fluviali;
- $R_h$  raggio idraulico e  $k_{s0}$  coefficiente di Strickler del terreno, relativi alla sezione 29.

Sulla base dei suddetti dati si sono ottenuti:  $n = 0,07 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$  ovvero un  $K_s = 14,8 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ .

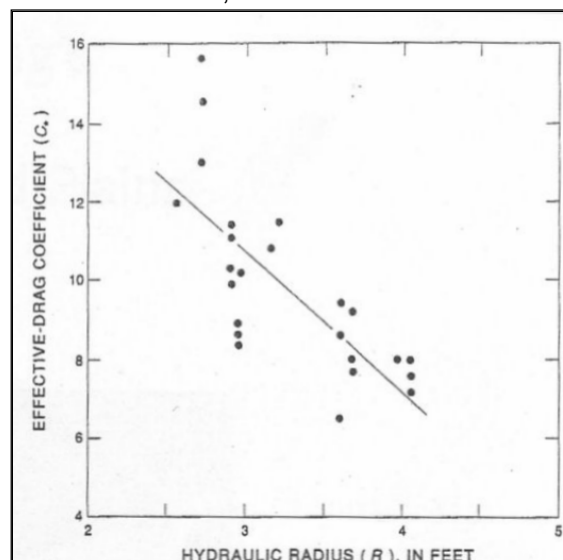


Figura 18 - Coefficiente di resistenza  $C_R$  in funzione del Raggio idraulico  $R$ .



Analogamente a quanto fatto per la vegetazione arbustiva, sono state definite le seguenti classi:

C12 = vegetazione prevalente di tipo arboreo, valutato pari al 100% del valore trovato  $K_s = 15 \text{ m}^{1/3} / \text{s}$ ,  $n = 0,07 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$

C7 = vegetazione rada di tipo arboreo, valutato pari al 80% del valore per la densità prevalente, ovvero  $K_s = 18,0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  e  $n = 0,06 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$

C2 = vegetazione sporadica di tipo arboreo, valutato pari al 60% del valore per la densità prevalente, ovvero  $K_s = 24,0 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  e  $n = 0,04 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$

Al fine di definire un criterio quanto più deterministico possibile, con le considerazioni compiute nei due casi pilota (riportate in tabella nelle colonne di sinistra), e valutando i valori di scabrezza delle classi con vegetazione mista pari al 60% della sommatoria degli effetti per la classe "Arbustiva e Arborea" e alla media matematica per la classe "½ Arbustiva e ½ Arborea", sono stati ricostruiti dei valori di riferimento per i valori dei  $K_{veg}$  di tutte le classi identificate in tabella 5.

Tabella 7 – Valori di scabrezza definiti per le classi individuate.

Classe	$K_s$ [ $\text{m}^{1/3} / \text{s}$ ]	$n$ [ $\text{m}^{-1/3} \text{ s}$ ]
C1	5	0.20
C2	24	0.04
C3		
C4	17	0.06
C5	15	0.07
C6	4	0.27
C7	18	0.06
C8		
C9	13	0.08
C10	11	0.09
C11	3	0.33
C12	15	0.07
C13		
C14	11	0.09
C15	9	0.11

Si specifica che la presenza di vegetazione arborea in stato di precaria stabilità è stata messa in conto nella schematizzazione delle strutture inserite nei modelli e in particolare nel coefficiente di perdite in ingresso, tenendo in conto la possibile parziale ostruzione delle luci libere.

#### 2.2.4 Condizioni al contorno

Un modello numerico necessita di una condizione al contorno per ogni estremo aperto del dominio di calcolo. Nello specifico caso di studio, in cui è adottato uno schema monodimensionale, è necessario definire una condizione al contorno agli estremi di monte e di valle del tratto.

Come condizione al contorno di monte è imposta, per ogni simulazione, la relativa portata per assegnato tempo di ritorno.

Per i tratti in cui l'estremo di valle è rappresentato dallo sbocco diretto a mare, la condizione al contorno è definita in termini di livello, sulla base dell'analisi del potenziale innalzamento del medio mare durante un evento meteomarinico intenso, di seguito descritta.

Nei casi in cui lo sbocco a mare è indiretto, quali ad esempio gli sbocchi in laguna, la condizione al contorno è stata assunta pari al livello idrico corrispondente al massimo innalzamento stimato in funzione delle specifiche condizioni del corpo ricettore.

L'effetto di sovrizzo del livello del medio mare è generalmente dato dalla somma dei 3 seguenti fenomeni:

- la marea astronomica;
- la variazione del livello dovuta alle condizioni di tempesta (*storm surge*), suddivisa tra la componente di *wind setup* e di *barometro inverso*;
- il sovrалzo dovuto al frangimento (*wave setup*).

La marea astronomica può essere definita facendo riferimento ai valori registrati dalla stazione della rete mareografica nazionale (RMN) più prossima al corso d'acqua oggetto di studio. Le stazioni della rete forniscono con cadenza oraria i dati relativi a direzione e velocità del vento, livello del medio mare, temperatura dell'acqua, temperatura dell'aria e pressione atmosferica.

Con il termine *storm surge* si indicano tutte le variazioni del livello medio del mare dovute al passaggio di una perturbazione atmosferica. La valutazione dello *storm surge* coinvolge sia l'interazione tra vento e mare (*wind setup*), sia la risposta di quest'ultimo alle variazioni di pressione atmosferica (*barometro inverso*).

Nell'ambito del presente studio si conducono valutazioni semplificate dei due termini che concorrono a determinare il sovrалzo complessivo dovuto allo *storm surge*.

Nell'ambito della pubblicazione "Tavole di marea 2006" dell'Istituto Idrografico della Marina è presente una tabella nella quale viene indicata la "correzione da applicare alle altezze di marea per la variazione della pressione atmosferica", per determinati step di valori di pressione. La disponibilità dei dati barometrici registrati dalle stazioni della rete RMN permette di valutare i minimi di pressione barometrica che si sono registrati nel periodo di misurazioni.

Il sovrалzo dovuto al termine di *wind setup* risulta generalmente più limitato; normalmente si assume un valore, ragionevolmente cautelativo, pari a 0,10 m.

Il *wave set-up* è la variazione del livello di medio mare dovuta al frangimento delle onde.

Diversamente dagli altri fenomeni di cui ai paragrafi precedenti, per i quali è possibile fare riferimento ad un unico valore cautelativo indipendentemente dalla direzione di provenienza delle onde e dal tempo di ritorno associato, il *wave-setup* risulta invece variabile in funzione dell'onda in ingresso.

Tale effetto risulta inoltre funzione della pendenza del fondale, della eventuale struttura in corrispondenza della quale si vuole calcolare il relativo sovrалzo, della presenza a foce di barriere frangiflutti, dalla presenza a foce di lagune o stagni.

Nel caso di *foce aperta*, note le caratteristiche del profilo trasversale e dell'onda in ingresso è possibile calcolare il valore del *wave-setup* mediante l'utilizzo di appositi codici di calcolo che tengono conto della reale morfologia del sito o, in alternativa, di formule semplificate.

Date le finalità del presente studio si ritiene che la definizione della condizione al contorno di valle del modello fluviale possa prescindere da tale calcolo che richiederebbe peraltro la definizione del clima ondoso caratteristico per tutti i siti di foce dei corsi d'acqua oggetto dello studio nonché l'analisi statistica relativa alla probabilità di accadimento contemporaneo di un evento meteomarinico intenso con la piena fluviale.

In base a queste considerazioni si ritiene quindi sufficientemente cautelativo assumere nella configurazione di *foce aperta* un valore di riferimento comune per il *wave-setup* pari a 1,00 m, da sommare agli altri fattori di sovrалzo già definiti in precedenza e sempre sulla base di un criterio conservativo.

Nel caso di *foce chiusa o parzialmente chiusa* per effetto di lagune, stagni o dighe/barriere frangiflutti, il termine *wave set-up* è stato contestualizzato (ed eventualmente ridotto) mediante specifiche valutazioni.

Complessivamente, il livello relativo alla condizione al contorno di valle è rappresentato dalla somma dei 4 termini definiti in precedenza: marea astronomica + wind-setup + barometro inverso + wave setup.

### 2.2.5 Portate idrologiche in ingresso

In aggiunta alla portata in ingresso alla sezione di monte, lungo il tratto in analisi sono stati introdotti ulteriori punti di variazione della portata in corrispondenza delle sezioni di calcolo idrologico. L'alveo è quindi stato suddiviso in tronchi omogenei, assumendo cautelativamente per ogni tratto e tempo di ritorno il valore definito nell'ambito dello studio idrologico a valle dello stesso.

## 2.3 Scenari di simulazione

Nell'applicazione del modello di simulazione idraulica descritto, funzionante in condizioni di moto stazionario, si pone il problema di come analizzare il comportamento idraulico in piena nei tratti di asta fluviale arginati e nei casi in cui la portata defluente comporti livelli idrici che superano la quota di sommità delle arginature.

Il problema riveste particolare importanza in quanto, per il tracciamento delle fasce fluviali per le portate che superano la quota delle arginature, occorre fare riferimento, per l'aspetto idraulico, a un profilo idrico che deve tener conto che parte del deflusso viene ad occupare il piano campagna retrostante i rilevati arginali.

Tenendo conto che lo schema di calcolo è quello relativo al moto stazionario, che non consente quindi di simulare i fenomeni transitori che si manifestano al momento della tracimazione ed, eventualmente, della rotta del rilevato, è parso adeguato alle finalità delle analisi impiegare i seguenti due scenari di assetto idraulico dei tratti arginati:

- **assenza di tracimazione:** si ipotizza che l'altezza degli argini sia comunque adeguata al contenimento dei livelli idrici, indipendentemente dal valore reale delle quote di sommità arginale; secondo tale schema le portate defluenti sono comunque contenute all'interno della sezione arginata del corso d'acqua; la differenza in quota (franco) tra il profilo di corrente per le diverse portate e quello della sommità arginale evidenzia la capacità di contenimento in quota di ciascuna sezione del corso d'acqua e, nel caso risulti negativa, il rialzo arginale necessario;
- **presenza di tracimazione:** lo schema di riferimento considera le condizioni di moto che si possono instaurare dopo che sia avvenuta la tracimazione degli argini e quindi in assenza della funzione di contenimento dei rilevati arginali; la sezione interessata al deflusso è quindi estesa all'intera porzione di piano campagna allagata, fino al limite morfologico naturale o artificiale che può contenere l'inondazione; lo schema indicato viene applicato solo alla portate che, nello schema di calcolo precedente, comportano livelli superiori a quelli delle sommità arginali e i livelli idrici ottenuti con tale schema di simulazione sono utilizzati per il tracciamento delle fasce fluviali relative alle portate che comportano tracimazione.

Si osservi che in generale, nei corpi idrici esaminati, i tratti focivi sono stati oggetto di interventi di regimazione, principalmente a scopo di bonifica, e pertanto sovente si presentano arginati lungo entrambe le sponde; interventi funzionali al contenimento dei livelli lungo i tratti vallivi dei corsi d'acqua sono invece poco frequenti e comunque presentano carattere locale in corrispondenza di centri abitati e/o infrastrutture.

## 2.4 Risultati delle simulazioni e analisi delle condizioni di deflusso

I risultati delle simulazioni numeriche, nelle due schematizzazioni descritte nel paragrafo precedente, sono presentati nella relativa sezione degli elaborati di relazione idraulica di ciascun corso d'acqua in forma grafica, in termini di profili di corrente, e tabellare.

In particolare, i risultati in forma tabellare presentano le grandezze idrauliche relative ad ogni sezione di calcolo in termini di:

- identificativo della sezione;
- valore della portata al colmo;
- quota di fondo alveo;
- livello della corrente;
- profondità della corrente;
- livello energetico;
- area della sezione bagnata;
- larghezza della sezione;
- numero di Froude.

Negli allegati alla relazione idraulica di ciascun corso d'acqua sono poi riportate le singole sezioni trasversali con i relativi livelli di piena; le stesse sezioni sono quindi presentate insieme al solido delle velocità per TR 50 anni e TR 200 anni, così come calcolato dal modello numerico.

I valori delle grandezze idrauliche così definiti rappresentano il dato di partenza per l'analisi della capacità del trasporto solido potenziale di cui allo specifico elaborato. Gli stessi livelli di corrente per assegnato periodo di ritorno sono inoltre alla base della successiva definizione delle fasce fluviali.

## 2.5 Attività di rilievo

### 2.5.1 Tipologia delle opere e loro identificazione

Le opere da rilevare, come previsto nelle specifiche tecniche delle attività, sono state suddivise in opere di tipo puntuale ed opere di tipo lineare (Tabella 8 e Tabella 9).

Tabella 8 - Opere puntuali.

Opere puntuali	
Tipologia	Funzione
Sfioratori laterali	Opere di scarico laterale di parte della portata di piena
Chiaviche	Regolazione delle immissioni idriche
Opere di immissione non regolate ( $\Phi_{\min} = 100$ cm)	Convogliamento di apporti idrici di tributari artificiali

Tabella 9 - Opere lineari.

Opere lineari	
Tipologia	Funzione
Traverse fluviali	Regolazione dei livelli idrici (in genere tramite dispositivi regolabili) per derivazioni d'acqua
Briglie e soglie	Controllo dell'erosione di fondo e del trasporto solido
Difese di sponda longitudinali	Protezione della sponda da fenomeni erosivi; stabilizzazione planimetrica dell'alveo
Canalizzazioni artificiali e tombini	Protezione della sponda, stabilizzazione planimetrica dell'alveo e/o Contenimento dei livelli idrici mediante realizzazione di alveo artificiale, rivestito su almeno tre lati
Difese di sponda trasversali (pennelli o repellenti)	Funzione di allontanamento dalla sponda del flusso principale della corrente favorendo la stabilizzazione delle stesse
Muri o argini spondali	Contenimento dei livelli idrici e protezione della sponda da fenomeni erosivi
Argini	Contenimento dei livelli idrici

Per quanto riguarda le opere lineari queste possono essere ulteriormente suddivise a secondo che l'opera sia trasversale al corso d'acqua (briglie, soglie e traverse) oppure sia di sponda (tutte le altre). Le opere di sponda

possono a loro volta suddividersi secondo la funzione principale alla quale sono destinate (difesa di sponda o contenimento delle piene):

- la funzione di difesa si ha quando l'opera è stata realizzata con l'obiettivo di garantire la stabilità planimetrica del corso d'acqua all'interno di un alveo ben definito, evitando fenomeni di erosione spondale, divagazione ecc.;
- la funzione di contenimento è invece quella per cui l'opera assolve al compito di aumentare la capacità di contenimento dei livelli idrici rispetto a quella offerta dal piano di campagna circostante.

Il discriminante tra le due funzioni è stato definito in una altezza di almeno ottanta centimetri della struttura di contenimento rispetto al piano di campagna a tergo dell'opera stessa.

Alla funzione di difesa assolvono le difese di sponda longitudinali e trasversali (pennelli o repellenti); argini e muri arginali assolvono, invece, alla funzione di contenimento delle piene.

Per quanto riguarda le canalizzazioni artificiali, queste sono state classificate come opere di difesa, piuttosto che come opere di contenimento, a seconda che l'altezza dei muri sul lato di campagna sia risultata minore o maggiore di ottanta centimetri.

Le informazioni inserite nelle schede, raccolte nella banca dati, sono finalizzate a rappresentare lo stato di consistenza delle opere esistenti, a fornire elementi utili a valutare la funzionalità dei sistemi difensivi ed a definire il fabbisogno di manutenzione. I sopralluoghi svolti hanno, inoltre, consentito di adeguare e calibrare le informazioni contenute nelle schede alle caratteristiche dell'asta in studio e alle diverse tipologie di opere.

La generica scheda contiene pertanto dei campi comuni a tutte le tipologie di opere, quali quelli relativi a localizzazione, dimensioni e caratteristiche, quello dei materiali e quello sullo stato dell'opera; le singole tipologie sono state integrate con ulteriori campi, nell'intento di descriverle nel modo più accurato.

Un aspetto di cui si è tenuto conto nella organizzazione delle schede è il collegamento strutturale e/o funzionale tra opere diverse: a tal proposito, è stato previsto nelle schede di ciascuna opera uno specifico campo, ove può essere inserito il codice dell'opera che ad essa sia eventualmente collegata funzionalmente o strutturalmente.

Per tutte le opere lineari, infine, è stato inserito un campo relativo alla presenza o meno di edifici sull'opera, o adiacenti ad essa, ed alla lunghezza del tratto interessato da tale presenza (nell'attraversamento di molti centri abitati i corsi d'acqua, per alcuni tratti, sono delimitati lateralmente da edifici, le cui pareti possono rappresentare una sorta di muri di sponda del corso d'acqua stesso); si ritiene tale informazione importante dal momento che edifici molto vicini al corso d'acqua possono interferire nei confronti di interventi futuri sul corpo idrico. Quando è l'edificio stesso a fare da muro di sponda, l'altezza misurata (e quindi indicata nelle schede) è relativa al livello idrico che può produrre allagamenti all'interno dell'edificio.

### 2.5.2 Codifica delle opere

Le opere idrauliche da inserire nel catasto sono identificate da un codice alfanumerico, caratteristico di ciascuna opera, costituito da 8 caratteri (NNTTPPPP).

I primi due caratteri (NN) esprimono il codice del corso d'acqua sul quale l'opera insiste. Nel presente bacino il codice AL identifica l'asta del riu Sos Alinos ed il codice SS identifica l'asta del riu Siniscola. Il terzo e il quarto carattere (TT) si riferiscono alla tipologia di opera, che è stata codificata secondo quanto riportato nella Tabella 10.

Tabella 10 - Codice della tipologia dell'opera.

Tipologia di opera	Codifica
Traverse fluviali	TR
Briglie e soglie	BR
Sfioratori laterali	SF
Chiaviche	CH
Opere di immissione non regolate ( $\Phi_{\min}= 100$ cm)	OI
Difese di sponda longitudinali	DL
Canalizzazioni artificiali e tombini	CA
Difese di sponda trasversali (pennelli o repellenti)	DT
Muri o argini spondali	MU
Argini	AR

Gli ultimi quattro caratteri (PPPP) rappresentano il progressivo (variabile da 0001 a 9999) che è stato assegnato alle opere lungo il corso d'acqua procedendo da monte verso valle.

Il codice dell'opera, così attribuito, identifica l'opera stessa tanto nella cartografia quanto nella relativa scheda, e costituisce l'elemento di collegamento delle informazioni riportate nelle schede alla rappresentazione cartografica dell'opera stessa.

### 2.5.3 Operazioni di rilievo

Le operazioni di rilievo delle caratteristiche e della tipologia delle opere idrauliche sono state basate sull'osservazione delle ortofoto digitali in bianco e nero (2003), della carta tecnica regionale (C.T.R. scala 10.000) e, soprattutto, sui rilievi in campo.

Il lavoro di censimento delle opere è schematicamente consistito nelle seguenti attività, elencate nell'ordine cronologico con cui sono state svolte:

- individuazione preliminare e tracciamento delle opere idrauliche sulla base dell'analisi e dell'interpretazione delle ortofoto al momento disponibili (ortofoto b/n 2003);
- verifica dell'ubicazione delle opere nel corso dei sopralluoghi, compilazione delle schede di campagna (gli elaborati tipologici delle schede di campagna delle opere idrauliche sono presentate nel report dell'attività di ricognizione delle opere idrauliche relativo al *bacino pilota* del fiume Padrogiano, validato dalla Direzione scientifica di progetto, a cui si rimanda) e realizzazione della documentazione fotografica (almeno una foto per opera, ove possibile due – una vista verso monte e una vista verso valle);
- creazione della cartografia provvisoria in ambiente GIS con ubicazione delle opere su ortofoto b/n 2003;
- creazione e implementazione della banca dati opportunamente collegata con i tematismi grafici in ambiente GIS rappresentanti l'ubicazione delle opere;
- georeferenziazione finale delle opere idrauliche;
- stesura del rapporto di analisi.

### 3. ANALISI GEOMORFOLOGICA

Nel presente capitolo vengono descritte le modalità di organizzazione delle attività di rilievo e di analisi necessarie per la definizione delle fasce inondabili sulle aste principali e sugli affluenti.

Sono distinte in particolare due sezioni dedicate rispettivamente alle attività di rilievo geomorfologico e alla interpretazione dei dati disponibili ai fini del tracciamento della fascia C geomorfologica.

#### 3.1 Attività di rilievo

##### 3.1.1 Documentazione di riferimento

Gli elementi cartografici messi a disposizione dall'Amministrazione committente a copertura dell'intero ambito di studio sono costituiti da:

- Ortofoto digitale in bianco e nero, anno 1997 con pixel pari a 1 metro;
- Ortofoto digitale in bianco e nero, anno 2003 con pixel pari a 1 metro;
- Carta tecnica regionale in formato vettoriale 3D;
- Tavole I.G.M. alla scala 1:25.000 a colori con aggiornamento all'anno 1958;
- Modello digitale del terreno con passo 40 metri;
- Modello digitale del terreno con passo 10 metri.

Nel corso delle attività di reperimento delle informazioni presso i Geni Civili e gli Enti di bonifica sono inoltre state ricercate le cartografie storiche e quelle descrittive dei principali interventi effettuati sui corsi d'acqua ai fini della loro regimazione e della realizzazione delle opere di bonifica e di irrigazione, nonché le riprese aerofotografiche utilizzabili per la visione stereoscopica.

Validi riferimenti cartografici sono stati inoltre forniti dallo strumento di consultazione via web dell'ortofoto digitale IT 2000 Terraitaly presente sul sito della Regione Sardegna, e quello delle immagini da satellite pubblicate dal portale di Google Earth. Pur non essendo integrabili negli strumenti GIS di supporto alle attività di rilievo, essi forniscono la rappresentazione a colori dell'area di studio in due momenti successivi, contribuendo a risolvere, in alcuni casi, i dubbi interpretativi.



Figura 19 - Rappresentazione della ortofotocarta a colori IT-2000 Terraitaly disponibile presso il portale Sardegna Territorio.

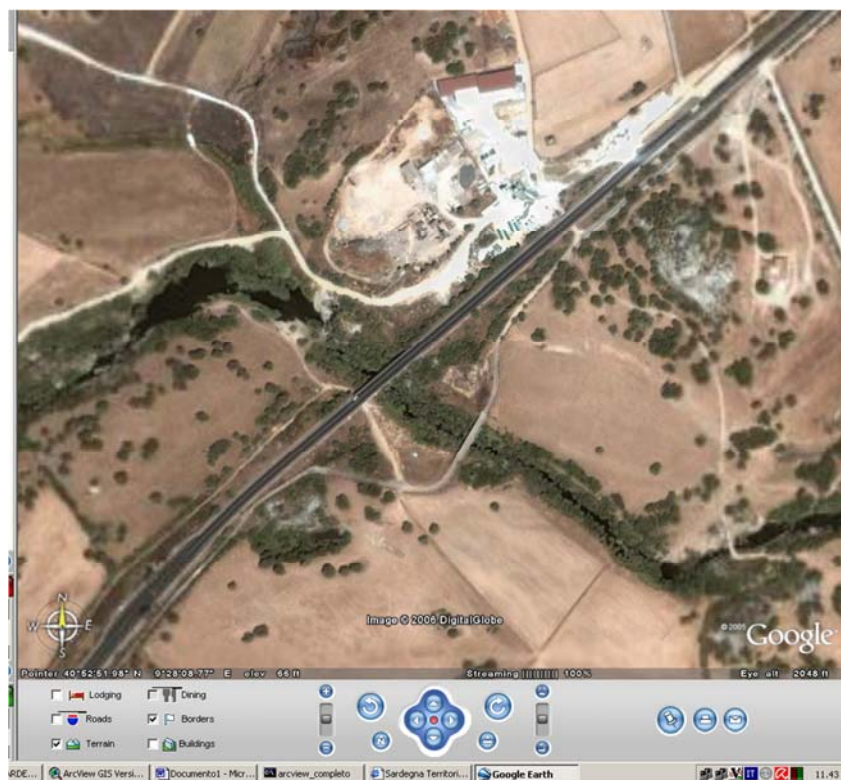


Figura 20 - Riprese da satellite disponibili sul portale di Google Earth.

### 3.1.2 Rilievo geomorfologico sulla base della ortofotocarta digitale

Attraverso l'impiego delle funzionalità del software GIS utilizzato sono state individuate e digitalizzate, con diretto riferimento alla ortofoto, le geometrie planimetriche riferibili a:

- alveo attivo, inteso come insieme delle forme costituite dall' alveo bagnato al momento della ripresa e dalle forme deposizionali come le barre e le isole non vegetate o non stabilmente vegetate;
- sponde dell'alveo attivo intese come tracce lineari indicanti il limite esterno dell'alveo attivo, classificate in funzione della tendenza alla divagazione planimetrica (in erosione, stabile, in accrescimento);
- alveo a piene rive inteso come porzione di territorio sede del transito della piena ordinaria;
- sponde dell'alveo a piene rive classificate in funzione della tendenza alla divagazione planimetrica (in erosione, stabile, in accrescimento);
- tracce di paleoalvei e di alvei abbandonati definendo, qualora possibile, se il processo avvenuto sia da attribuire a cause artificiali o naturali;
- scarpate di delimitazione dei ripiani alluvionali;
- tracce del passaggio delle piene sulla piana alluvionale sia di natura erosiva che deposizionale;
- opere idrauliche di difesa sia longitudinali che trasversali;
- opere idrauliche di contenimento dei livelli (argini, muri);
- opere di attraversamento e relativi rilevati di accesso;
- infrastrutture o elementi in rilevato paralleli o interferenti con il corso d'acqua;
- aree di sistemazione fluviale con estrazione di inerti (aste principali).





Figura 21 - Rappresentazione della ortofoto digitale (in bianco e nero) e della carta tecnica regionale (sovrapposta in giallo).

### 3.1.3 Rilievo geomorfologico sulla base della cartografia I.G.M. alla scala 1:25.000

Attraverso l'impiego del software GIS, sulla base della carta topografica I.G.M. 1:25.000 nella versione a 5 colori con aggiornamento al 1958, sono individuate e digitalizzate nel sistema di riferimento prescritto le geometrie di descrizione dei seguenti elementi cartografici planimetrici descrittivi della geomorfologia fluviale:

- sponde dell'alveo di magra;
- sponde dell'alveo a piene rive;
- scarpate di delimitazione dei ripiani alluvionali;
- paleoalvei ed alvei abbandonati;
- opere di difesa longitudinali e trasversali;
- opere di contenimento dei livelli;
- opere di attraversamento.

### 3.1.4 Rilievo geomorfologico sulla base della carta tecnica regionale vettoriale

Ad integrazione degli elementi rilevati sulla base delle ortofoto digitali e della carta I.G.M. sono derivati dalla carta tecnica regionale vettoriale gli elementi utilizzati per descrivere le forme caratterizzanti la regione fluviale costituiti da:

- linee di sponda;
- scarpate di delimitazione dell'alveo di piena ordinaria;
- scarpate di delimitazione della piana alluvionale;
- forme in rilievo nella piana alluvionale;
- depressioni e cave nella piana alluvionale;
- opere idrauliche longitudinali e trasversali;
- opere di attraversamento;
- infrastrutture lineari nel tratto interferente con la piana alluvionale.

### 3.2 Metodologia di delimitazione della fascia C geomorfologica

La metodologia descritta nei seguenti paragrafi è finalizzata all'individuazione della regione fluviale potenzialmente oggetto di inondazione nel corso delle piene caratterizzate da un elevato tempo di ritorno (500 anni) e comunque di eccezionale gravità.

Essa è basata sulle caratteristiche degli elementi ricavabili dall'analisi dei supporti cartografici e fotografici messi a disposizione dall'Amministrazione regionale e rappresenta lo standard di analisi applicabile all'intera rete oggetto di studio. Maggiori approfondimenti di analisi vengono condotti sulla base dell'ulteriore documentazione fornita dagli enti gestori dei corsi d'acqua naturali e della rete artificiale competenti sul territorio (Enti di Bonifica, Geni Civili ecc.).

Massima rilevanza ai fini della definizione della fascia inondabile hanno avuto le informazioni relative alle trasformazioni subite dal reticolo idrografico per cause naturali ed artificiali e la delimitazione delle aree inondate nel corso degli eventi di piena più gravosi.

#### 3.2.1 Inviluppo delle forme fluviali rilevate sulla base della cartografia e delle ortofoto digitali

L'insieme degli elementi rilevati sulla base dei differenti supporti viene criticamente utilizzato per definire una unica fascia di inviluppo di tutte le forme fluviali riferibili all'alveo di piena. Tale fascia, comprensiva delle forme attuali e di quelle caratteristiche della regione fluviale legate all'evoluzione planimetrica subita dal fiume nel corso dell'ultimo quarantennio (le tavolette I.G.M. sono aggiornate al 1958) si configura come fascia di deflusso della piena, definendo la porzione della sezione bagnata in cui la corrente di piena transita con elevata velocità.

Il passaggio successivo riguarda la connessione alla fascia di inviluppo, delle forme individuate sulla piana alluvionale riconducibili a passati eventi di piena, sia di natura erosiva che deposizionale. Analogamente vengono riconnessi alla fascia di inviluppo anche tutti i paleoalvei e gli alvei abbandonati estendendo, qualora necessario, la loro traccia planimetrica fino ai nodi di interconnessione individuati sulla base delle informazioni morfologiche disponibili.

A tale scopo particolare importanza ha rivestito l'attività di ricerca delle informazioni presso gli enti gestori dei corsi d'acqua naturali e della rete artificiale relative ai progetti degli interventi di bonifica e di irrigazione e di quelle, non meno importanti, di sistemazione idraulica.

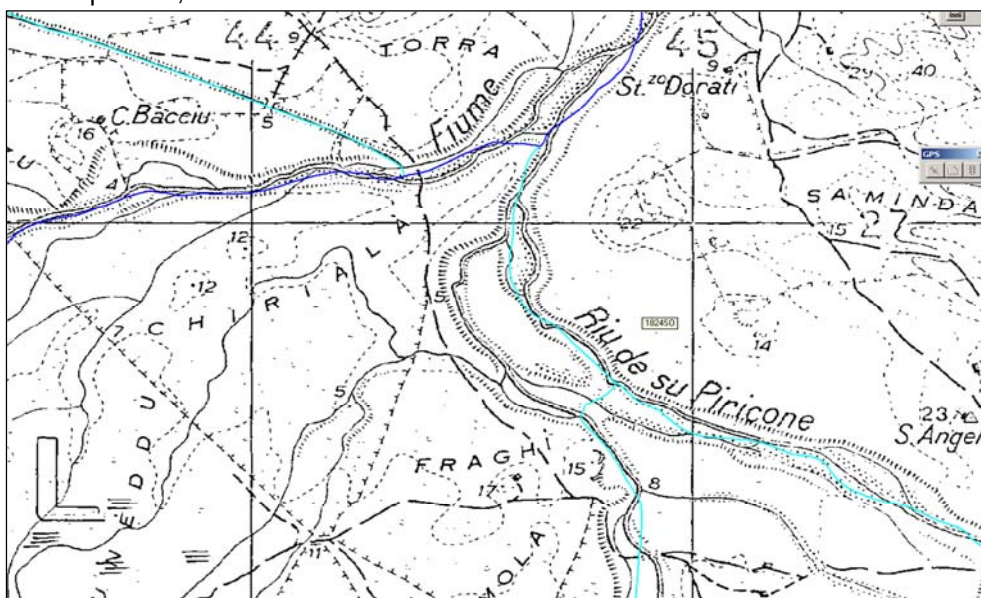


Figura 22 - Tratto in cui la rappresentazione planimetrica dell'alveo fornita dalla cartografia I.G.M. differisce in maniera sostanziale rispetto a quella offerta dalla carta tecnica regionale e dalle ortofoto.



### 3.2.2 Individuazione del limite esterno della fascia C geomorfologica

L'involuppo delle forme fluviali e di quelle legate alla propagazione delle piene sulla piana alluvionale non sono sufficienti a definire l'esatta estensione della fascia inondabile al verificarsi della piena eccezionale.

Il procedimento descritto nel seguito si basa pertanto sull'integrazione delle informazioni geomorfologiche riassunte dalla fascia di involuppo con la rappresentazione altimetrica del territorio fornita dalle cartografie e dal modello digitale del terreno e con l'insieme degli elementi interferenti ed in particolare con le infrastrutture e con le opere di difesa idraulica.

In funzione delle caratteristiche del contesto morfologico in cui i differenti tratti dei corsi d'acqua ricadono, i criteri di analisi e le modalità operative sono stati modificati o differenziati allo scopo di ottimizzare l'impiego degli elementi conoscitivi disponibili.

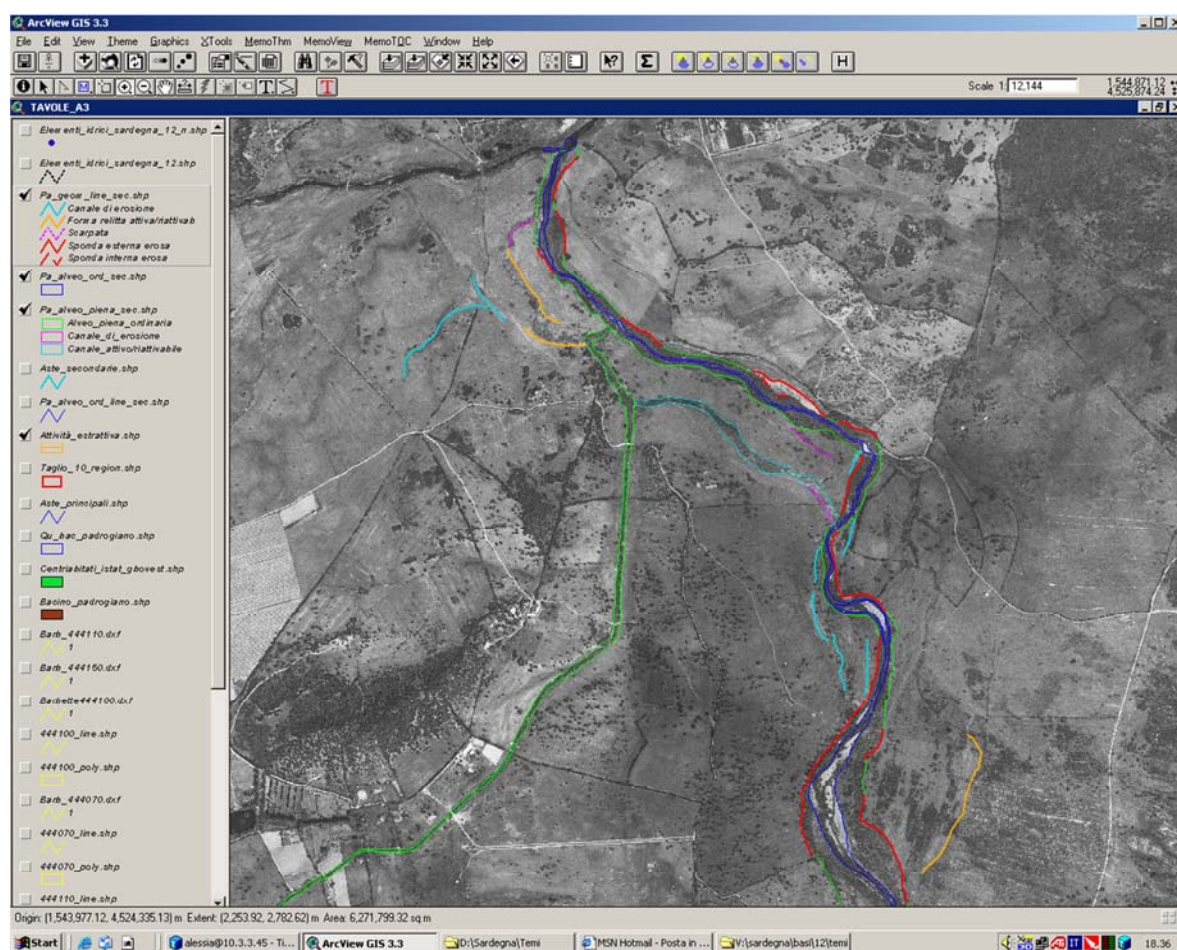


Figura 23 - Rappresentazione dei risultati dell'attività di rilievo delle caratteristiche geomorfologiche della piana alluvionale.

#### 3.2.2.1 Individuazione del limite della piana alluvionale

Il limite esterno della piana alluvionale olocenica viene individuato, ovunque possibile, con riferimento alle scarpate di delimitazione dei ripiani alluvionali, correlando i valori di quota corrispondenti sui due fianchi vallivi e interpolando le informazioni nei tratti di raccordo e in tutti i casi in cui i versanti degradano senza rotture di pendenza verso l'asse vallivo.

L'individuazione degli elementi morfologici di riferimento viene eseguita sia sulla cartografia tecnica regionale sia con riferimento ai dati di quota riportati dal modello digitale del terreno con passo 10 metri fornito dall'amministrazione.



Figura 24 - Impiego del DTM a passo 10 metri per la definizione di sezioni interpolate.

### 3.2.2.2 Valutazione preliminare degli effetti delle opere idrauliche e delle infrastrutture interferenti

Le analisi preliminari condotte hanno evidenziato la notevole influenza delle infrastrutture lineari sulla piana alluvionale.

In primo luogo è stato verificato come le opere in rilevato parallele al corso d'acqua esercitino un forte condizionamento sulle possibilità di espansione delle piene, limitando fortemente la sezione di deflusso del fiume.

Forti effetti sulla propagazione delle piene manifestano inoltre le opere di attraversamento e i rilevati di accesso, soprattutto sui corsi d'acqua sviluppati in contesti a forte gradiente morfologico.

Le verifiche condotte hanno permesso di individuare ampie zone a valle di ponti caratterizzate dagli effetti erosivi di tracimazioni avvenute oltre il rilevato che testimoniano nella zona a monte del ponte il raggiungimento da parte dell'onda di piena di una quota pari a quella dell'estradosso del ponte stesso.



Figura 25 - Forme deposizionali ed erosive legate alla tracimazione di un rilevato stradale in corrispondenza di un ponte.

In questi contesti ed in tutti i casi in cui si è ritenuto che la luce del ponte non fosse sufficiente a garantire il deflusso, il limite dell'area inondabile viene individuato comprendendo al suo interno l'area a quota inferiore a quella del ponte e del rilevato di accesso.

A valle del tratto tracimabile saranno ricomprese nell'area inondabile i percorsi seguiti dalle acque per raggiungere l'alveo principale.

### 3.2.3 Attività di sopralluogo

In corrispondenza dei tratti di asta principale l'attività di sopralluogo permette di risolvere i dubbi interpretativi soprattutto laddove l'artificializzazione del corso d'acqua e l'influenza delle infrastrutture agiscono in maniera determinante nel condizionamento dei deflussi in piena.

L'osservazione in dettaglio delle caratteristiche delle opere di regolazione e di difesa, nonché l'individuazione di eventuali discontinuità o condizioni di dissesto permette di superare i limiti dell'interpretazione planimetrica della fascia C geomorfologica.

In corrispondenza dei tratti di corso d'acqua facenti parte della rete degli affluenti le attività di sopralluogo sono state limitate alle situazioni in cui il corso d'acqua attraversa contesti urbanizzati e dove la rappresentazione delle caratteristiche offerta dalla carta tecnica regionale appare difforme da quella rilevabile sulle ortofoto digitali.

## 4. ANALISI DELLA CAPACITÀ DI TRASPORTO SOLIDO

### 4.1 Valutazione del trasporto solido potenziale con il metodo idraulico

L'analisi della capacità di trasporto solido viene condotta a partire dai risultati dello studio idraulico, svolto sulla base del modello numerico HEC-RAS, implementato su tutti i tratti classificati come *asta principale*.

Il modello idrodinamico, infatti, consente di calcolare i valori delle grandezze idrauliche caratteristiche per tutte le sezioni trasversali per i diversi tempi di ritorno oggetto di analisi (2, 50, 100, 200, 500 anni).

Per ogni sezione di calcolo del modello numerico, noti i valori dei diametri caratteristici e della tensione fisica al fondo, fornita direttamente dal codice di calcolo per ogni periodo di ritorno, si è quindi proceduto a calcolare nell'ordine:

- il numero di Reynolds della particella;
- il valore della tensione critica attraverso la formula di Brownlie;
- il valore della tensione di Shields in base alla tensione fisica fornita dal modello;
- i valori della capacità di portata solida adimensionale;
- i valori della capacità di portata solida.

Sulla base di tali grandezze idrauliche è quindi possibile determinare la capacità di trasporto solido teorica di ogni sezione trasversale d'alveo inserita nel modello e successivamente individuare tratti di corso d'acqua omogenei, caratterizzati da valori di capacità di trasporto solido che si mantengono mediamente uniformi.

In letteratura esistono diverse formulazioni empiriche per il calcolo della capacità di trasporto solido al fondo ed in sospensione a partire dalle caratteristiche idrauliche della corrente. Tra tali diverse formulazioni, si è assunto di utilizzare quattro differenti modelli, che si differenziano tra loro in base all'intervallo di applicabilità relativo sia alla morfologia dell'alveo, sia alla granulometria del materiale costituente il fondo. Le formulazioni utilizzate sono quelle di Meyer-Peter e Muller, Engelund e Fredsoe, Smart e Jaeggi, più adeguate alla stima della capacità di trasporto in presenza di materiale grossolano, e la formulazione di Van Rijn, adeguata a descrivere il fenomeno di trasporto di materiale più fine (diametri fino a 2 mm).

Tutte le formulazioni non tengono conto della reale distribuzione granulometrica e sono applicate usualmente ai materiali eterogenei presenti negli alvei reali facendo riferimento nella definizione delle grandezze caratteristiche al diametro medio ( $d_{50}$ ). La sola formulazione di Smart e Jaeggi utilizza anche i diametri  $d_{30}$  e  $d_{90}$ .

#### 4.1.1 Formulazioni di Meyer-Peter e Muller, Engelund e Fredsoe, Smart e Jaeggi

Tutte le formule sono fondate sulla teoria di Shields, per cui la capacità di trasporto adimensionale per unità di larghezza  $\phi$  risulta funzione della tensione di Shields  $\tau^*$  e del numero di Reynolds della particella  $R_p$ , per cui:

$$\phi = \phi(\tau^*, R_p)$$

dove la tensione di Shields è data da:

$$\tau^* = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho) \cdot g \cdot d}$$

$$\tau = \gamma \cdot if \cdot y$$

con:

$\tau$  = tensione fisica al fondo, fornita dal modello numerico [N/m<sup>2</sup>];

$\rho_s$  = peso specifico della particella solida, assunto costante pari a  $2,65 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>;

$\rho$  = peso specifico dell'acqua;

$g$  = accelerazione di gravità;

$d$  = diametro medio del grano ( $d_{50}$ );

mentre  $R_p$ , numero di Reynolds della particella è calcolato dalla:

$$R_p = \frac{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3}}{\nu}$$

con:

$s = \rho_s/\rho = 2,65$ ;

$\nu$  = viscosità cinematica, pari a  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s.

Secondo tutte le formulazioni, si ha condizione di incipiente trasporto al fondo quando la tensione di Shields eguaglia il valore critico  $\tau^*_c$ , calcolato in funzione del numero di Reynolds secondo la formula di Brownlie:

$$\tau^*_c = 0,22 R_p^{-0,6} + 0,06 \exp(-17,77 R_p^{-0,6})$$

La corrente determina quindi un trasporto al fondo positivo per  $\tau^* > \tau^*_c$  e nullo per  $\tau^* < \tau^*_c$ . Il valore del trasporto è poi dato in termini adimensionali dalle singole formule empiriche riportate a seguire, da cui è possibile ricavare il valore di portata solida per unità di larghezza  $q$  mediante la formula:

$$\phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d^3}}$$

ed il valore totale di portata solida moltiplicando per la larghezza dell'alveo.

La formula di Meyer-Peter e Muller esprime la portata solida adimensionale per unità di larghezza secondo l'espressione:

$$\phi = 8 (\tau^* - \tau^*_c)^{1,5}$$

in cui il valore della tensione critica è assunto indipendente dal numero di Reynolds, e quindi dal diametro della particella, e pari a 0,047. La formula è valida per materiale grossolano sia omogeneo che eterogeneo con diametro compreso tra 0,4 e 60 mm e pendenza dell'alveo tra 0,04% e 2%.

La formula di Engelund e Fredsoe presenta un intervallo di validità simile a Meyer-Peter e Muller, in cui la portata solida è calcolata attraverso l'espressione:

$$\phi = 10 (\tau^* - \tau^*_c) (\tau^{*0,5} - 0,7 \tau^{*0,5}_c)$$

in cui la tensione critica è nuovamente assunta indipendente da  $R_p$  e pari a 0,05.

La formula di Smart e Jaeggi permette il calcolo del trasporto solido di materiale grossolano in fiumi o canali ad elevata pendenza. La formula è basata sull'equazione originale di Meyer-Peter Müller, derivata da esperimenti di laboratorio con sedimenti non uniformi di varia densità ed una pendenza compresa tra 0,04% e 2,0%. Si è osservato che l'equazione originale di Meyer-Peter Müller tende a sottostimare la quantità di trasporto solido per pendenze di fondo maggiori del 3% per cui Smart e Jaeggi hanno proposto una modifica all'equazione originale basandosi ancora su prove di laboratorio e considerando sia il parametro di Shields in funzione della pendenza, sia la non uniformità dei sedimenti:

$$\phi = 4 \left[ (d_{90}/d_{30})^{0,2} \cdot i_f^{0,6} \cdot C \cdot \tau^{0,5} (\tau^* - \tau_c^*) \right]$$

con:

$i_f$  = pendenza della superficie libera;  
 $C$  = parametro di Chezy.

#### 4.1.2 Formulazione di Van Rijn

Secondo il modello proposto da Van Rijn (1984), il trasporto totale è ottenuto mediante la somma del trasporto di fondo e del trasporto in sospensione.

I diametri dei sedimenti che rientrano nell'intervallo di validità della formulazione di Van Rijn sono compresi tra 0,2 e 2,0 mm.

##### 4.1.2.1 *Calcolo del trasporto al fondo*

La formulazione individuata da Van Rijn per il calcolo del trasporto al fondo prevede che, in analogia con quanto già espresso per altre formulazioni sopra riportate, il valore del trasporto al fondo sia ricavato dapprima in termini adimensionali mediante il calcolo della portata solida adimensionalizzata  $\phi$ , funzione della tensione di Shields  $\tau^*$  e del diametro medio della particella  $d_{50}$ . Una volta determinata  $\phi$  è possibile ricavare il valore di portata solida per unità di larghezza  $q$  mediante la formula:

$$\phi = \frac{q}{\sqrt{(s-1) \cdot g \cdot d_{50}^3}}$$

con  $s = \frac{\rho_s}{\rho} = 2,65$

Il valore di portata solida al fondo si ottiene poi moltiplicando il termine  $q$  per la larghezza dell'alveo.

In particolare, secondo la formulazione di Van Rijn, il calcolo della portata solida adimensionalizzata  $\phi$  viene effettuato introducendo due parametri che sono stati considerati adeguati a descrivere il trasporto di fondo: il diametro adimensionalizzato della particella  $D_*$  ed il cosiddetto *transport stage parameter*  $T$ , definiti secondo le espressioni di seguito riportate:

$$\phi = \frac{0,053 \cdot T^{2,1}}{D_*^{0,3}}$$

dove

$$D_* = d_{50} \left[ \frac{s-1}{\nu^2} \cdot g \right]^{1/3}$$



con  $\nu$ =viscosità cinematica, pari a  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

e

$$T = \frac{\tau^* - \tau_c^*}{\tau_c^*}$$

con il termine  $\tau_c^*$  che rappresenta la tensione critica di Shields, calcolata secondo la formulazione di Brownlie.

#### 4.1.2.2 Calcolo del trasporto in sospensione

Il metodo è basato sul calcolo della concentrazione di riferimento, determinata dal trasporto al fondo. Tale concentrazione di riferimento, indicata con il termine  $c_a$ , è pertanto funzione del diametro adimensionalizzato della particella  $D^*$  e del *transport stage parameter*  $T$  precedentemente ottenuti.

In particolare, la concentrazione di riferimento è calcolata secondo la seguente formulazione:

$$c_a = 0,015 \cdot \frac{d_{50} \cdot T^{1,5}}{a \cdot D_*^{0,3}}$$

in cui  $a$  rappresenta il livello di riferimento, al di sotto del quale tutto il trasporto solido è considerato trasporto di fondo. Convenzionalmente il termine  $a$  risulta pari a  $0,01 \cdot D$ , dove con  $D$  si indica il tirante idrico nella sezione.

Secondo la formulazione proposta da Van Rijn, la portata solida per unità di larghezza  $q_s$  è legata alla concentrazione di riferimento  $c_a$  secondo la seguente relazione:

$$q_s = F \cdot u \cdot D \cdot c_a$$

in cui  $u$  rappresenta la velocità media di deflusso nella sezione, ed  $F$  un termine adimensionale definito secondo la seguente espressione:

$$F = \frac{\left[\frac{a}{D}\right]^{Z'} - \left[\frac{a}{D}\right]^{1,2}}{\left[1 - \frac{a}{D}\right]^{Z'} \cdot [1,2 - Z']}$$

Il termine  $Z'$  che compare nella definizione precedente rappresenta il cosiddetto *suspension parameter*, che esprime l'influenza sul trasporto dei moti turbolenti ascendenti e delle forze gravitazionali che si oppongono a tali moti. Il calcolo del termine  $Z'$  viene proposto da Van Rijn come la somma del *numero di Rouse*  $Z$  e di un termine correttivo  $\psi$ . Il *numero di Rouse*  $Z$  è espresso comunemente secondo la seguente espressione:

$$Z = \frac{w}{k \cdot u_f'}$$

in cui  $w$  rappresenta la velocità di sedimentazione della particella,  $k$  la costante di Von Karman, assunta pari a 0,4 e  $u_f'$  rappresenta la cosiddetta *friction velocity*, definita in funzione della tensione fisica al fondo  $\tau$  secondo la seguente espressione:

$$u_f' = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$$

Il termine correttivo  $\psi$  è definito invece come:

$$\psi = 2,5 \cdot \left[ \frac{w}{u_f} \right]^{0,8} \cdot \left[ \frac{c_a}{c_0} \right]^{0,4}$$

dove il termine  $c_0$  rappresenta la concentrazione massima al fondo, comunemente assunta pari a 0,65.

## 4.2 Valutazione del trasporto solido potenziale con il metodo di Gavrilovic

La valutazione del trasporto solido medio annuo è stata condotta utilizzando il metodo di Gavrilovic S.<sup>3</sup> (1959) che permette di stimare la produzione di sedimenti media annua in funzione del “peso” attribuito, sulla base di analisi statistiche, alle differenti variabili indipendenti considerate: fisiografia, piovosità, termometria, utilizzazione del territorio e assetto vegetazionale, erodibilità del substrato roccioso, condizioni di dissesto idrogeologico in atto.

Tale metodologia, già ampiamente utilizzata e verificata in passato, risulta una delle più complete sotto il profilo delle variabili considerate.

In particolare vengono utilizzati i parametri seguenti.

### Parametri fisiografici

S = superficie bacino (km<sup>2</sup>);

$I' = \sqrt{I}$  dove I è la pendenza media del bacino (-);

### Parametri climatici

$t' =$  coefficiente di temperatura =  $\sqrt{t * 0,1 + 0,1}$  dove t è la temperatura media annua (per  $t < -1$   $t' = 0$ );

h = precipitazione media annua (mm);

### Uso del suolo

A = superficie a boschi e frutteti (km<sup>2</sup>);

B = superficie a prati e pascoli (km<sup>2</sup>);

C = superficie seminativi e coltivi vari (km<sup>2</sup>);

D = superficie sterile (km<sup>2</sup>);

U = superficie pavimentata e urbanizzata (km<sup>2</sup>);

### Litologia

J = superficie rocce incoerenti (km<sup>2</sup>);

K = superficie rocce pseudocoerenti e semicoerenti (km<sup>2</sup>);

L = superficie rocce coerenti (km<sup>2</sup>);

### Dissesti

N = superficie con frane (km<sup>2</sup>);

P = superficie con erosione accentuata (km<sup>2</sup>);

Q = superficie zone con valanghe (km<sup>2</sup>).

I singoli parametri vengono opportunamente combinati e pesati per esprimere i coefficienti di degradazione legati ai diversi fattori che concorrono alla definizione del livello di erodibilità dei bacini ovvero il coefficiente di

---

<sup>3</sup> Gavrilovic S. (1959) «Methode de la classification des bassins torrentiels et equation nouvelles pour le calcul des hautes eaux et du debit solide». Vadoprivreda, Belgrado.

protezione del suolo dato dalla vegetazione (X), il coefficiente di erodibilità del suolo dato dalla litologia (Y) e il coefficiente di degradazione (V'):

$$X = \frac{(A \cdot 0,2 + B \cdot 0,5 + C \cdot 0,8 + D \cdot 1,0 + 0,05 \cdot U)}{S}$$

$$Y = \frac{(J \cdot 1,6 + K \cdot 0,8 + L \cdot 0,3)}{S}$$

$$R = \frac{(N \cdot 7 + P \cdot 4 + Q \cdot 2)}{S} \cdot 100$$

Da R (superficie dissestata relativa) è quindi possibile calcolare il coefficiente di degradazione (V') che varia secondo il seguente schema:

se $0 \leq V \leq 0,5$	allora $V' = 0,1 + V \cdot 0,4$
se $0,5 < V < 2$	allora $V' = 0,134 \cdot V + 0,133$
se $2 \leq V \leq 8$	allora $V' = V/10 + 0,2$
se $V > 8$	allora $V' = 1$

e quindi il coefficiente di erosione relativa (Z):

$$Z = X \cdot Y \cdot (V' + I)$$

Dai parametri così calcolati è infine possibile arrivare alla stima del volume (in m<sup>3</sup>) di materiale prodotto annualmente entro il bacino considerato a causa dei processi erosivi ovvero il trasporto solido potenziale (W):

$$W = S \cdot t \cdot h \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3}$$

Noto W si calcola facilmente la profondità di erosione media annua (E1) e il contributo specifico alla produzione dei sedimenti (E2).

Nel caso del Piano Fasce della Sardegna i parametri sono stati ricavati dalle seguenti fonti:

- i dati climatici sono stati dedotti dalle carte tematiche contenute nella pubblicazione "Il clima della Sardegna" di Chessa P.A. & Delitala A. pubblicato sul sito web [www.sar.sardegna.it](http://www.sar.sardegna.it);
- la pendenza media dei bacini è stata calcolata a partire dal DEM della Regione Autonoma della Sardegna.
- per l'uso suolo è stata utilizzata la "Carta dell'uso del suolo" della Regione Autonoma della Sardegna alla scala 1:25.000 (2002);
- la caratterizzazione litologica è stata desunta dalla "Carta geologica della Sardegna" scala 1:200.000<sup>4</sup>;
- le superfici interessate da frane è stata desunta dall'IFFI – Inventario dei fenomeni franosi in Italia" (APAT – Regione Autonoma della Sardegna).

Viste le condizioni climatiche e altimetriche dell'area in esame, non si è tenuto conto delle superfici valanghive.

Non sono viceversa allo stato attuale disponibili documentazioni attendibili per la definizione delle superfici soggette ad erosioni accelerate.

<sup>4</sup> Carmignani L.(1996) – "Carta geologica della Sardegna scala 1:200.000". Servizio Geologico Nazionale, Regione Autonoma della Sardegna.

#### 4.2.1 Strato corazzato

Nei corsi d'acqua il cui letto è costituito da alluvioni grossolane è stata spesso osservata una variazione di granulometria verticale caratterizzata dalla presenza in superficie di un sottile livello di depositi più grossolani di quelli che costituiscono il substrato. Tale livello, di norma dello spessore pari a quello del diametro medio dei clasti di dimensioni maggiori che lo costituiscono, prende il nome di strato "corazzato", mentre in lingua inglese il fenomeno è chiamato "armouring".

La formazione di tale struttura è riconducibile essenzialmente a 2 fenomeni<sup>5</sup>:

- l'erosione selettiva del materiale fine;
- la deposizione selettiva del materiale grossolano.

In caso di erosione selettiva del materiale fine, in letteratura vengono distinti due tipi di strati, ovvero lo strato corazzato in senso stretto in cui il materiale grossolano può essere mobilitato in condizione di piena ordinaria e lo strato "pavement", ovvero pavimentato, in cui questo non può essere mobilitato attraverso i normali processi di erosione di fondo e pertanto la presenza dei clasti grossolani è dovuta ad altri tipi di processi (frane, debris flow, ecc.).

E' stato osservato inoltre che il fenomeno del corazzamento e/o pavimentazione è più pronunciato ove la disponibilità di materiale in alveo è inferiore alla capacità di trasporto complessiva del corso d'acqua e quindi, sostanzialmente, nei tratti in cui l'asta è in erosione. Pertanto la presenza di strati corazzati è frequente a valle degli sbarramenti artificiali mentre è rara a monte.

Tale processo influisce a sua volta sulla velocità critica di erosione del letto, che evidentemente può essere superiore a quella necessaria per mobilitare il substrato più fine.

Si possono verificare 3 situazioni.

Ove il rapporto tra diametri caratteristici è prossimo ad 1 non si ha il corazzamento.

Se tale rapporto è nettamente inferiore ad 1 si cade nei casi in cui si ha una sorta di corazzamento inverso, ovvero lo strato superficiale è costituito da depositi più fini di quelli profondi. Situazioni di questo genere si verificano soprattutto nei casi in cui nella coda degli eventi alluvionali si ha una progressiva riduzione della velocità della corrente con deposito di materiale alluvionale fine. Questo processo si sviluppa prevalentemente nei pressi delle sponde e nelle buche, soprattutto se queste non sono interconnesse all'alveo di magra.

Il corazzamento si ha con valori del rapporto dei diametri caratteristici significativamente superiori ad 1 (generalmente da 1,5 – 2 in su). I valori superiori a 3 sono tipici di processi di "pavimentazione" nei corsi d'acqua montani, ove l'asta è intasata da blocchi che non possono essere mobilitati con gli ordinari processi di trasporto di fondo.

Il metodo utilizzato per la verifica della sussistenza del fenomeno del corazzamento (o pavimentazione) nel letto di fiume consiste nella definizione delle caratteristiche granulometriche dello strato superficiale con il metodo della griglia di campionamento e quindi nel prelievo, dopo la rimozione dello strato superficiale per uno spessore dell'ordine del diametro medio dei clasti più grossolani, di un campione "profondo" da avviare in laboratorio per le analisi granulometriche, previa eventuale setacciatura preliminare in sito.

---

<sup>5</sup> Bunte K. & Abt S.R. (2001) – "Sampling surface and subsurface particle-size distributions in wadable gravel- and – cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics, and strambed monitoring". USDA (United States Department of Agriculture).

Tale metodologia richiede conseguentemente la presenza di banchi ciottolosi emersi, di larghezza sufficiente da consentire la posa della griglia di campionamento ovvero di un'area emersa priva di vegetazione avente almeno le dimensioni di un quadrato di 5 m di lato.

A questo proposito, per altro, va ribadito che l'assenza di depositi grossolani fa sì che non vi siano le condizioni per la formazione di uno strato corazzato.

La presenza di vegetazione, viceversa, maschera eventuali banchi di depositi grossolani e, dove sono presenti arbusti o alberi, tende a rallentare le acque e a creare turbolenze che, da un lato impediscono la formazione dello strato corazzato, dall'altro favoriscono la deposizione di uno spesso strato sabbioso-limoso che rende difficoltoso, se non impossibile, il campionamento con metodi manuali di eventuali livelli grossolani sottostanti.

## 5. COSTRUZIONE DEI DATA BASE

Il presente capitolo descrive le principali linee guida seguite nella costruzione dei data base delle attività di rilievo delle opere idrauliche, della vegetazione e delle aree di movimentazione inerti nella regione fluviale.

Le banche dati sono realizzate in ACCESS con relativa applicazione che permette la visualizzazione, l'implementazione e la stampa delle schede di rilievo delle opere idrauliche, della vegetazione e delle aree movimentazione inerti.

Di seguito vengono definite le caratteristiche delle tre banche dati costruite rispettivamente per le attività richieste:

- elaborazione di uno schema concettuale di riferimento;
- elaborazione di un modello logico-fisico dei dati (tabella);
- realizzazione della scheda monografica, della cartografia e delle interrogazioni.

### 5.1 Banca dati

#### 5.1.1 Modello concettuale

Il modello concettuale dei tre database è stato sviluppato analizzando le “schede” di raccolta dati al fine di evidenziare:

1. le Entità (oggetti);
2. le relazioni di struttura fra le stesse;
3. le modalità di rappresentazione delle entità di tipo geografico.

Il modello concettuale del Catasto delle opere idrauliche descritto in Figura 26 è incentrato sull'entità geografica OPERE che, in funzione della tipologia può assumere la rappresentazione di tipo puntuale o lineare; le opere si specializzano inoltre in una serie di tipologie per ciascuna delle quali viene assunta una univoca modalità di rappresentazione geografica.

Concorre alla descrizione dell'opera idraulica una serie di documenti specializzati per tipologia e funzione.

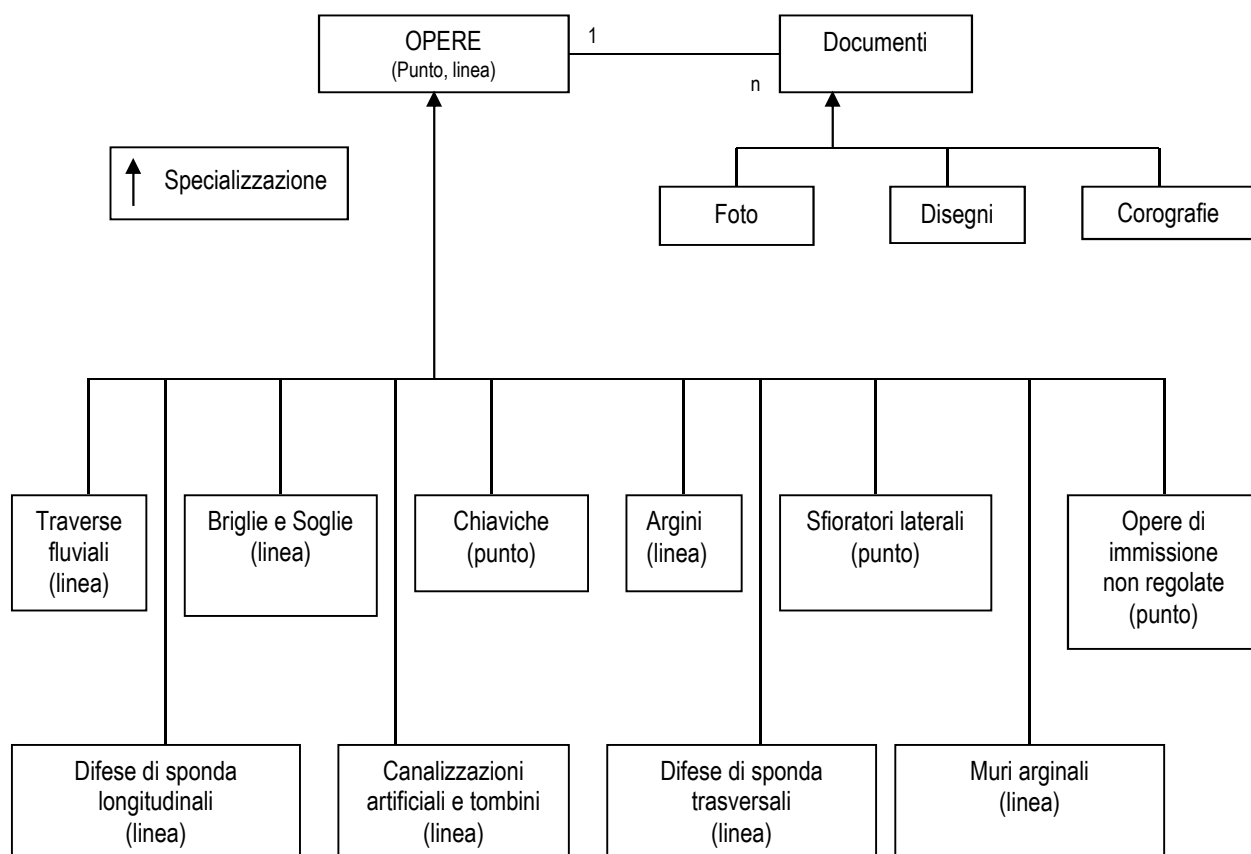


Figura 26 - Modello concettuale del Catasto delle opere idrauliche.

Il modello concettuale del Catasto vegetazione è elementare in quanto l'entità, il tratto omogeneo, è unica e non necessita di relazioni.

La caratterizzazione della vegetazione presente in ciascuno dei tratti omogenei è sviluppata con riferimento alla sponda sinistra, al letto e alla sponda destra.

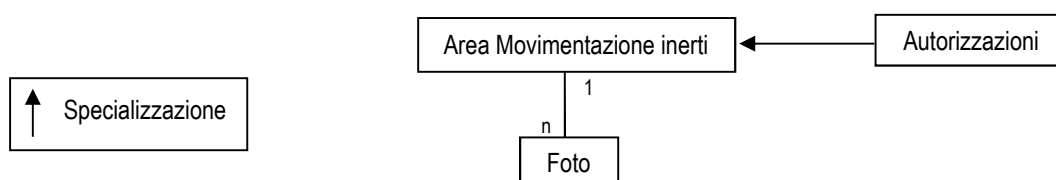


Figura 27 - Modello concettuale del Catasto delle aree movimentazione inerti.

Infine il modello concettuale del Catasto aree movimentazione inerti è sviluppato al fine di evidenziare la relazione di struttura tra aree, autorizzazioni e foto di riferimento (Figura 27).

### 5.1.2 Modello Logico - Fisico

Per ognuno dei tre modelli concettuali di riferimento è stato elaborato uno schema logico-fisico della base dati tenendo conto, in generale, dei seguenti fattori:

1. scala di lavoro e rappresentazione;
2. caratteristiche degli strumenti GIS e DB utilizzati;
3. modalità di raccolta dati e data entry;
4. massima semplificazione delle strutture fisiche.

### 5.1.2.1 Opere idrauliche

Per quanto concerne la base dati delle opere idrauliche si è ritenuto utile mantenere l'articolazione fra scheda generale dell'opera e "sottoschede" specializzate per ciascuna tipologia in quanto:

1. migliora la visibilità simultanea di tutte le opere presenti nella DB-Opere;
2. facilita le operazioni di costruzione e verifica del DB, soprattutto in relazione al collegamento fra le tabelle geografiche e le corrispondenti schede alfanumeriche;
3. permette di realizzare viste specializzate per le diverse tipologie di opere.

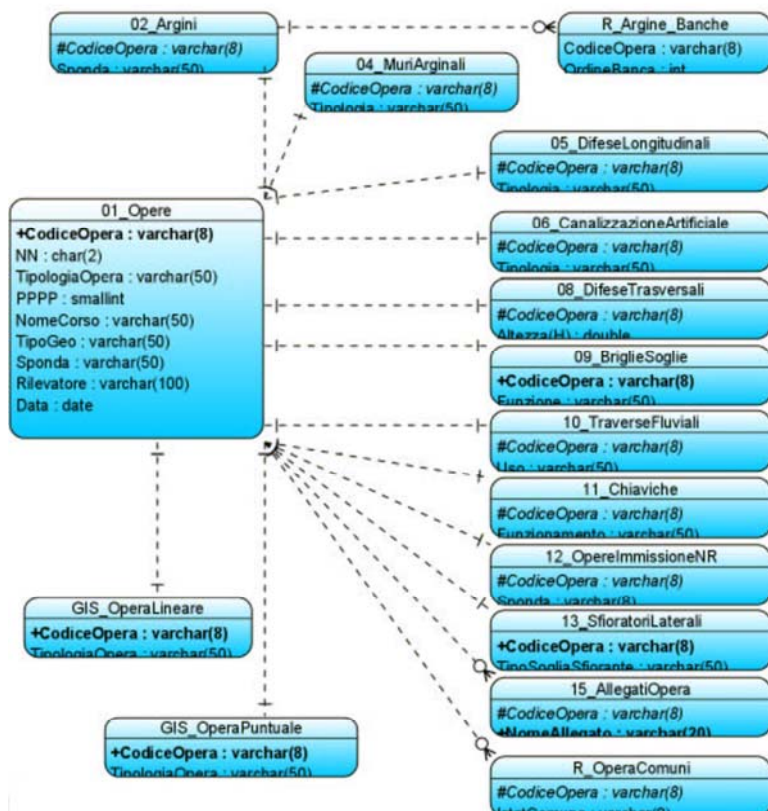


Figura 28 - Modello logico delle entità fisicamente presenti nella base dati delle opere idrauliche.

I documenti allegati a ciascuna delle opere, nel caso specifico costituiti esclusivamente da foto, sono invece contenuti in una tabella di catalogo che oltre ad una sintetica descrizione dell'allegato mantiene gli indirizzi dei file che, trattandosi di riproduzione fotografiche, sono in formato JPG.

La rappresentazione delle geometrie associate a ciascuna delle opere è risolta mediante due file, una per le entità di tipo puntuale ed una di tipo lineare.

Lo schema della base dati opere idrauliche sottende i seguenti vincoli:

1. integrità referenziale fra ciascuna delle tipologie di opere con gli elementi della tabella opere;
2. integrità referenziale fra documento tecnico ed opera;
3. integrità referenziale delle opere rappresentate in cartografia con le istanze della tabella Opere.



### 5.1.2.2 Vegetazione

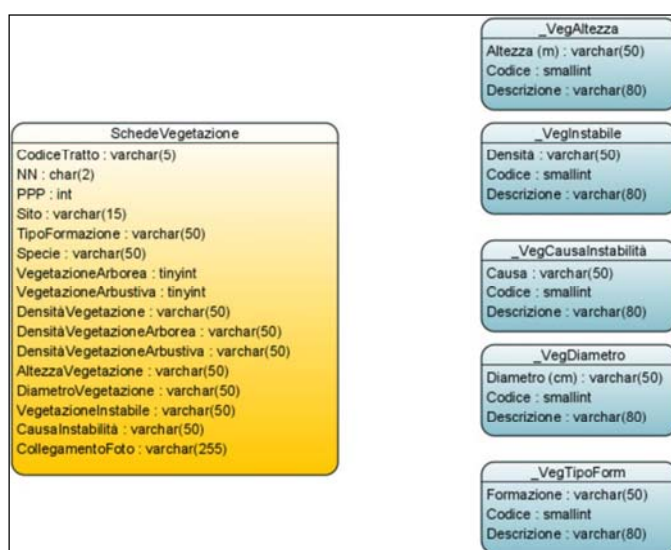


Figura 29 - Modello logico delle entità fisicamente presenti nella base dati della vegetazione.

Per quanto concerne la base dati della vegetazione la descrizione è realizzata mediante la redazione di un'unica scheda suddivisa in tre settori (sponda sinistra, letto e sponda destra) per ciascuno dei tratti omogenei. Tale scheda riassume i contenuti raccolti nelle "Schede di rilievo in sito delle caratteristiche della vegetazione in alveo e sulle sponde" riportate in Allegato 2.

I documenti allegati a ciascun tratto, nel caso specifico costituiti esclusivamente da foto, sono catalogati nella scheda come collegamento al file.

### 5.1.2.3 Aree movimentazione inerti

Lo schema della base dati sottende i seguenti vincoli:

1. integrità referenziale fra ciascuna delle aree con gli elementi della tabella autorizzazioni;
2. integrità referenziale fra documento fotografico ed area.
- 3.

### 5.1.3 Codifiche

Codice opere idrauliche: NNTPPPPP  
dove:

NN = Codice alfanumerico del fiume (Codifica Fiumi Sardegna, sigla)  
TT = Tipologia dell'opera  
PPPP = Progressivo sull'asta per singola opera (da monte a valle)

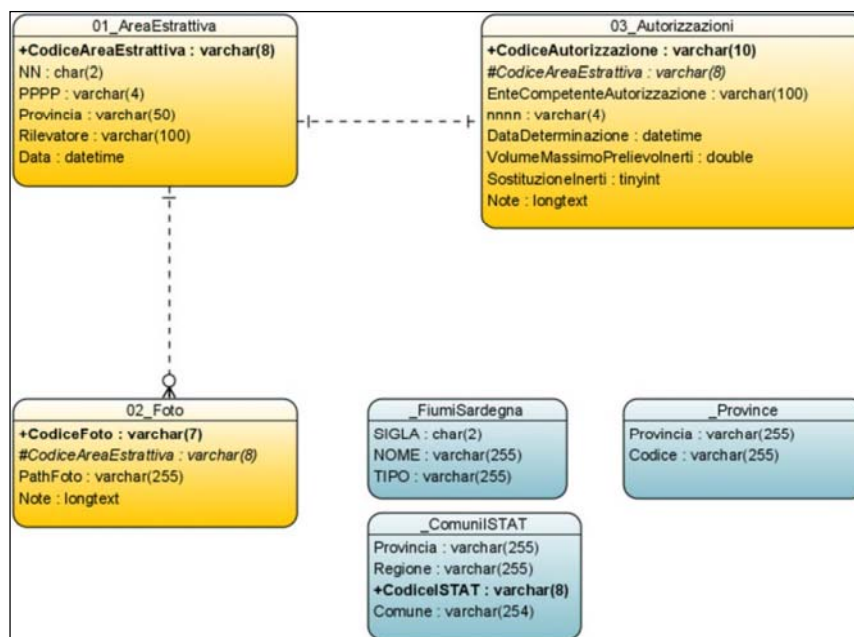


Figura 30 - Modello logico delle entità fisicamente presenti nella base dati delle aree movimentazione inerti.

Codifica Allegati opere: CodOpera-N  
 dove:

CodOpera = Codice opera  
 N = Progressivo foto (I file delle foto associate alle opere devono essere JPG)

Codifica tratti omogenei di vegetazione: NNPPP  
 dove

NN = Codice alfanumerico del fiume (Codifica Fiumi Sardegna, sigla)  
 PPP = Progressivo di percorrenza da monte a valle.

Codifica Allegati tratti omogenei di vegetazione.

I file delle foto associate alle opere devono essere JPG e il nome del file ha la seguente codifica: CodTratto-N  
 dove

CodTratto = Codice tratto omogeneo di vegetazione  
 N = Progressivo foto (ciascuna opera può avere più foto).

Codifica aree movimentazione inerti: NNPPP  
 dove

NN = Codice alfanumerico del fiume (Codifica Fiumi Sardegna, sigla)  
 PPP = Progressivo di percorrenza da monte a valle.

Codifica Allegati aree movimentazione inerti.

I file delle foto associate alle opere devono essere JPG e il nome del file ha la seguente codifica: CodArea-N  
 dove

CodArea = Codice tratto omogeneo di vegetazione  
 N = Progressivo foto (ciascuna opera può avere più foto).

#### 5.1.4 Banca dati opere idrauliche: restituzione della scheda monografica, della cartografia ed interrogazioni

##### 5.1.4.1 *Atlante delle schede monografiche delle opere idrauliche*

Nella forma proposta la scheda riporta l'insieme delle caratteristiche rilevate in campagna (in Allegato 3 sono riportate le schede compilate in campo dai rilevatori) ed i dati derivanti dall'analisi GIS delle geometrie georiferite. In particolare essi consistono nell'insieme dei dati geografici ed amministrativi di ubicazione (coordinate, sponda, ecc.) e di quelli derivanti dal calcolo delle caratteristiche geometriche degli elementi georiferiti (lunghezze, ecc.).

L'uscita è una scheda monografica di una pagina (formato A3) per ogni singola opera con riportate le relative fotografie.

##### 5.1.4.2 *Cartografia scala 1:10.000 e tematismi delle opere idrauliche*

Per la cartografia occorre fare riferimento al relativo progetto in ambiente GIS.

I temi, in formato SHP, con i dati di localizzazione delle opere idrauliche acquisiti durante la ricognizione svolta sono inseriti, con opportuna legenda, nelle stampe dell'atlante cartografico delle fasce fluviali. I temi sono georeferenziati nel sistema di riferimento Gauss-Boaga, zona Ovest.

La struttura dell'impianto cartografico è finalizzata alla rappresentazione planimetrica delle opere idrauliche in scala 1:10.000 ed alla produzione dell'Atlante cartografico in formato A3.

I tematismi prodotti contengono le opere idrauliche con geometria lineare e con geometria puntuale: le opere rappresentate sono collegate al database alfanumerico mediante il campo comune "CodiceOpera".

La coppia di campi EST – NORD rappresenta, nelle opere lineari, l'estremo di monte della linea rappresentatrice.

##### 5.1.4.3 *Interrogazioni*

La banca dati delle opere idrauliche è organizzata con tabelle che permettono di listare singolarmente le diverse tipologia di opere inserite (es. tabella 02\_Argini), oppure di visualizzare assieme tutte le opere attraverso la tabella 01\_Opere.

## **ALLEGATO 1**

**Definizione delle tabelle dei DB opere idrauliche,  
vegetazione e aree movimentazione inerti**

## Opere idrauliche

tabella	descrizione	note
01_Opere	Repertorio generale delle opere	
02_Argini	Argini - Contenimento dei livelli idrici	Opere lineari
04_MuriArginali	Muri o argini spondali - Protezione della sponda da fenomeni erosivi e contenimento dei livelli idrici	Opere lineari
05_DifeseLongitudinali	Difese di sponda longitudinali - Protezione della sponda da fenomeni erosivi; stabilizzazione planimetrica dell'alveo	Opere lineari
06_CanalizzazioneArtificiale	Canalizzazioni artificiali e tombini - Realizzazione di un alveo artificiale, rivestito su almeno tre lati	Opere lineari
08_DifeseTraversali	Difese di sponda trasversali (pennelli o repellenti) – Funzione di allontanamento dalla sponda del flusso principale della corrente favorendo la stabilizzazione delle stesse	Opere lineari
09_BriglieSoglie	Briglie e soglie - Controllo dell'erosione di fondo e del trasporto solido	Opere lineari
10_TraverseFluviali	Traverse fluviali - Regolazione dei livelli idrici (in genere tramite dispositivi regolabili) per derivazioni d'acqua	Opere lineari
11_Chiaviche	Chiaviche - Regolazione delle immissioni idriche in corrispondenza degli argini	Opere puntuali
12_OpereImmissioneNR	Opere di immissione non regolate - Convogliamento di apporti idrici di tributari artificiali	Opere puntuali
13_SfioratoriLaterali	Opere di scarico laterale di parte della portata di piena	Opere puntuali
15_AllegatiOpera	Documentazione di supporto	
R_Opera_Comuni	Tabella che regge la relazione 1 opera   molti comuni	
R_Argine_Banche	Tabella che regge la relazione 1 argine   molte banche.	
GIS_OperaPuntuale	Struttura della tabella associata alle geometrie puntuali	Entità derivante da file gestiti in ambito GIS
GIS_OperaLineare	Struttura della tabella associata alle geometrie lineari	Entità derivante da file gestiti in ambito GIS

## Vegetazione

tabella	descrizione	note
Schede vegetazione	Schede di descrizione della vegetazione (suddivise in tre settori - sponda sinistra, letto e sponda destra - per ogni tratto omogeneo)	
Tratti	Definizione dei tratti omogenei	

## Aree movimentazione inerti

tabella	descrizione	note
01_AreaEstrattiva	Definizione delle aree estrattive	
02_Foto	Allegati fotografici	
03_Autorizzazioni	Autorizzazioni	

## **ALLEGATO 2**

**Schede di rilievo in sito delle caratteristiche della  
vegetazione in alveo e sulle sponde**

# SCHEDA DI RILEVAMENTO DELLA VEGETAZIONE DI SPONDA E IN ALVEO

Codice scheda \_\_\_\_\_

Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Codice tratto omogeneo \_\_\_\_\_

Codice FOTO \_\_\_\_\_

		Sponda sinistra	Letto	Sponda destra
1.	Presenza di vegetazione arborea	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no
2.	Presenza di vegetazione arbustiva	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no	<input type="checkbox"/> si <input type="checkbox"/> no
3.	Densità della vegetazione arborea			
	assente (0%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	sporadica (0-20%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	rada (20-40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	prevalente (>40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Densità della vegetazione arbustiva			
	assente (0%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	sporadica (0-20%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	rada (20-40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	prevalente (>40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	Densità della vegetazione arborea-arbustiva consociata			
	assente (0%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	sporadica (0-20%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	rada (20-40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	prevalente (>40%)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	Altezza della vegetazione arborea			
	< 5 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	5 – 10 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	10 – 20 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	> 20 m	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.	Diametro della vegetazione arborea			
	< 10 cm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	> 10 cm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8.	Presenza di vegetazione arborea in stato di precaria stabilità			
	assente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	sporadica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	media	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	frequente	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	erosione	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
cause	senescenza	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	malattie patogene	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9.	Composizione specifica vegetazione arborea	Sponda sinistra	Letto	Sponda destra
formazione pura o con larga prevalenza di una sola specie				
AUTOCTONE: Acero, Agrifoglio, Carpino nero, Carrubo, Frassino, Ginepro, Leccio, Olivastro, Olivo, Ontano, Ornello, Perastro, Quercia, Roverella, Indigena, Sambuco, Sughera, Tamericio, Tasso				
formazione mista di specie autoctone: specie dominanti				
formaz. mista con specie esotiche o comunque non originarie dell'amb. fluv.				
ESOTICHE: Acacia, Ailanto, Albero di giuda, Bagolaro, Castagno, Cedro, Ciliegio, Cipresso, Eucalipto, Fico, Fico d'india, Gelso, Ippocastano, Melaleuca, Nocciolo, Noce, Olmo, Pino, Pioppo, Platano, Robinia, Sorbo, Tiglio				

### **ALLEGATO 3**

**Schede di rilevamento in campagna delle opere  
idrauliche**



## 02. Argini

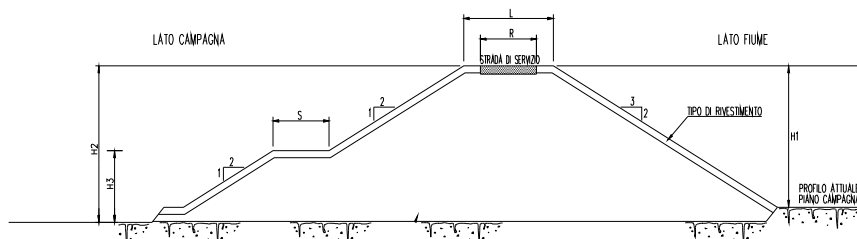
Codice scheda \_\_\_\_\_

Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Sponda \_\_\_\_\_



Tipologia:

☐ In terra ☐ In gabbioni

☐ Rivestimento paramento lato fiume:

☐ massi a scogliera ☐ gabbioni ☐ lastre in calcestruzzo ☐ blocchi/lastre in pietra  
☐ altro \_\_\_\_\_

Dimensioni<sup>6</sup>:

Altezza lato fiume H1 \_\_\_\_\_ m Altezza lato campagna H2 \_\_\_\_\_ m

Larghezza coronamento L \_\_\_\_\_ m

Pendenza paramento lato fiume: ☐ 3/2 ☐ altro \_\_\_\_\_

Pendenza paramento lato campagna: ☐ 1/2 ☐ altro \_\_\_\_\_

Banche lato campagna numero \_\_\_\_\_

altezza H3 \_\_\_\_\_ m larghezza S \_\_\_\_\_ m

altezza H3 \_\_\_\_\_ m larghezza S \_\_\_\_\_ m

altezza H3 \_\_\_\_\_ m larghezza S \_\_\_\_\_ m

altezza H3 \_\_\_\_\_ m larghezza S \_\_\_\_\_ m

Strada di servizio - tipo: ☐ assente ☐ sterrata ☐ asfaltata

Stato dell'opera:

Dissesto strutturale del corpo arginale:

☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato

Osservazioni<sup>7</sup>: \_\_\_\_\_

Dissesto del rivestimento del paramento a fiume:

☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato

Osservazioni<sup>2</sup>: \_\_\_\_\_

Presenza di edifici<sup>8</sup>: ☐ sì ☐ no

Descrizione edifici: \_\_\_\_\_

Osservazioni<sup>9</sup>: \_\_\_\_\_

<sup>6</sup> Dati da compilare utilizzando i risultati del rilievo topografico

<sup>7</sup> Deve essere indicata la presenza di elementi locali di discontinuità o di dissesto: finestre arginali, corde molli, rampe di accesso ....

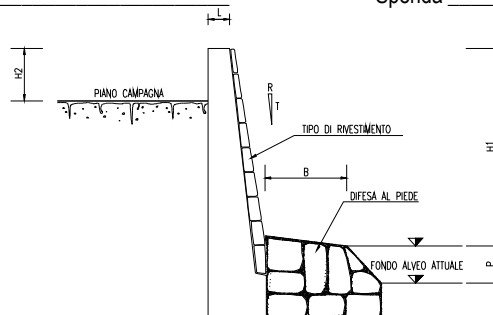
<sup>8</sup> Non idraulici nel corpo dell'argine o nelle immediate vicinanze

<sup>9</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

## 04. Muri arginali

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_ Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_ Sponda \_\_\_\_\_



Dimensioni:

Altezza lato fiume	H1	_____m
Altezza lato campagna	H2(>0,80 m)	_____m
Larghezza coronamento	L	_____m
Pendenza paramento	T/R	_____m

Materiale struttura:

- ☐ Calcestruzzo  
☐ Muratura  
☐ Elementi prefabbricati  
☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname  
☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

Materiale di rivestimento:

- ☐ massi a scogliera ☐ gabbioni ☐ lastre in calcestruzzo ☐ blocchi/lastre in pietra  
☐ altro \_\_\_\_\_

☐ Presenza di difesa al piede costituita da:

- ☐ Calcestruzzo  
☐ Muratura  
☐ Elementi prefabbricati  
☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname  
☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

Larghezza (B): \_\_\_\_\_

Stato dell'opera:

Dissesto strutturale del corpo del muro arginale:

- ☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato

Localizzazione dissesto

- ☐ al coronamento ☐ al corpo ☐ al piede ☐ alle fondazioni

Dissesto strutturale difesa al piede:

Per strutture rigide:

- ☐ scalzamento al piede profondità (p) \_\_\_\_\_m estensione longitudinale \_\_\_\_\_m

Per strutture flessibili:

- Assestamento/Deformazione del piede ☐ sì ☐ no

Presenza di edifici<sup>10</sup>: ☐ sì ☐ no

Descrizione edifici: \_\_\_\_\_

Lunghezza edifici: \_\_\_\_\_

Osservazioni<sup>11</sup>: \_\_\_\_\_

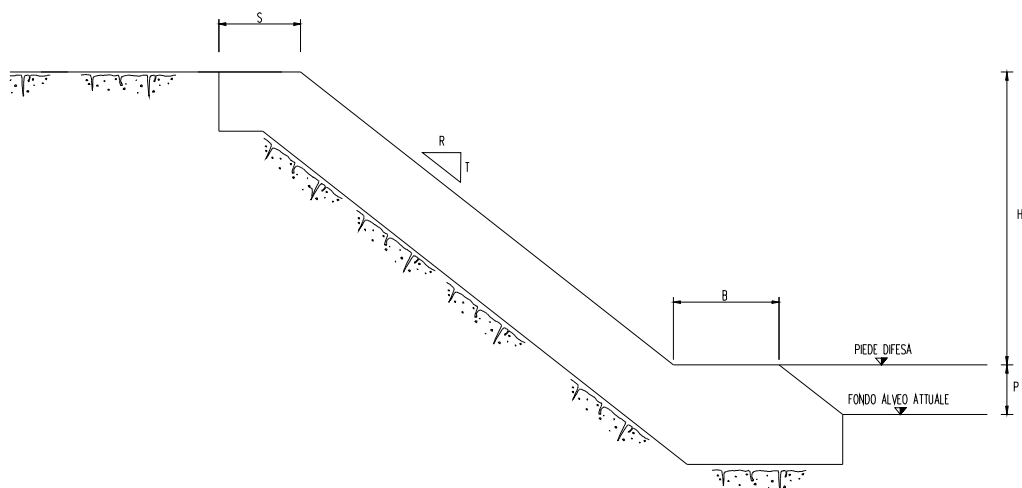
<sup>10</sup> Non idraulici nel corpo dell'argine o nelle immediate vicinanze

<sup>11</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

## 05. Difese di sponda longitudinali

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_ Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_ Sponda \_\_\_\_\_



Tipologia: ☐ rigida ☐ flessibile

Paramento: ☐ verticale ☐ obliquo ☐ gradoni

Dimensioni:

Altezza	H _____ m
Larghezza alla base	B _____ m
Larghezza in sommità	S _____ m
Pendenza paramento	T/R _____

Materiale struttura:

- ☐ Calcestruzzo  
☐ Muratura  
☐ Elementi prefabbricati  
☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname  
☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

Stato dell'opera:

Dissesto strutturale del corpo della difesa:

☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato

Localizzazione dissesto

☐ al coronamento ☐ al corpo ☐ al piede ☐ alle fondazioni

Dissesto strutturale al piede:

Per strutture rigide:

☐ scalzamento al piede profondità (p) \_\_\_\_\_ m estensione longitudinale \_\_\_\_\_ m

Per strutture flessibili:

Assesamento/Deformazione del piede ☐ sì ☐ no

Osservazioni<sup>12</sup>: \_\_\_\_\_

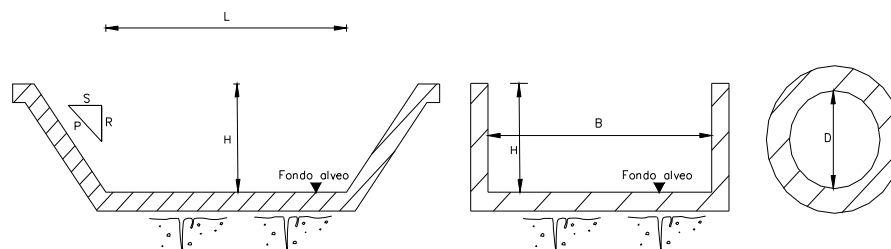
<sup>12</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

## 06. Canalizzazioni artificiali, tombini

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_



Tipologia: ☐ aperto ☐ tombino  
 Tipo sezione: ☐ circolare ☐ trapezoidale ☐ rettangolare

Dimensioni:

Diametro D \_\_\_\_\_ m Larghezza L \_\_\_\_\_ m  
 Altezza H \_\_\_\_\_ m Pendenza R/S \_\_\_\_\_

Materiale struttura:

☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

Materiale di rivestimento:

☐ massi a scogliera ☐ gabbioni ☐ lastre in calcestruzzo ☐ blocchi/lastre in pietra  
☐ altro \_\_\_\_\_

Presenza di edifici<sup>13</sup>: ☐ si ☐ no Descrizione edifici: \_\_\_\_\_ Lunghezza edifici: \_\_\_\_\_

Stato dell'opera:

Dissesto strutturale al corpo:  
☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato  
 Localizzazione dissesto  
☐ al coronamento ☐ al corpo ☐ al piede ☐ alle fondazioni

Osservazioni<sup>14</sup>: \_\_\_\_\_

—

<sup>13</sup> Non idraulici nel corpo dell'argine o nelle immediate vicinanze

<sup>14</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

**08. Difese di sponda trasversali (pennelli o repellenti)**

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Sponda \_\_\_\_\_

Dimensioni:

Altezza H \_\_\_\_\_ m

Larghezza in sommità L \_\_\_\_\_ m

Pendenza paramento \_\_\_\_\_

Materiale struttura:

☐ Calcestruzzo

☐ Muratura

☐ Elementi prefabbricati

☐ Gabbioni

☐ Massi: ☐ di cava intasati

☐ di cava a secco

☐ a scogliera

☐ di fiume intasati

☐ di fiume a secco

☐ Blocchi in calcestruzzo:

☐ a scogliera

☐ legati

☐ Legname

☐ Legname e pietrame

☐ Altro \_\_\_\_\_

Stato dell'opera:

Dissesto strutturale del corpo della difesa:

☐ assente

☐ localizzato

☐ generalizzato

Localizzazione dissesto

☐ al coronamento

☐ al corpo

☐ al piede

☐ alle fondazioni

Dissesto strutturale al piede:

Per strutture rigide:

☐ scalzamento al piede profondità (p) \_\_\_\_\_ m

estensione longitudinale \_\_\_\_\_ m

Per strutture flessibili:

Assesamento/Deformazione del piede ☐ sì

☐ no

Osservazioni: \_\_\_\_\_

## 09. Briglie/soglie

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Funzione:

- ☐ controllo [del trasporto solido e/o del profilo di fondo alveo]  
☐ consolidamento [delle fondazioni di opere di attraversamento (valle ponte)]

☐ interrimento a monte dell'opera

Dimensioni briglia/soglia

Altezza sul fondo alveo a monte H1 \_\_\_\_\_ m  
Altezza sul fondo alveo a valle H2 \_\_\_\_\_ m

Materiale struttura:

- ☐ Calcestruzzo  
☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

☐ Materiale di rivestimento:

- ☐ massi a scogliera ☐ gabbioni ☐ lastre in calcestruzzo ☐ blocchi/lastre in pietra  
☐ altro \_\_\_\_\_

☐ Presenza di controbriglia in:

- ☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame ☐ Altro \_\_\_\_\_

Distanza tra briglia a controbriglia: \_\_\_\_\_ m

☐ Presenza di platea in:

- ☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame ☐ Altro \_\_\_\_\_

☐ Presenza di bacino di dissipazione alla distanza di (L) \_\_\_\_\_:

- ☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame ☐ Altro \_\_\_\_\_

☐ Presenza opere in sponda sinistra in:

- ☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame ☐ Altro \_\_\_\_\_

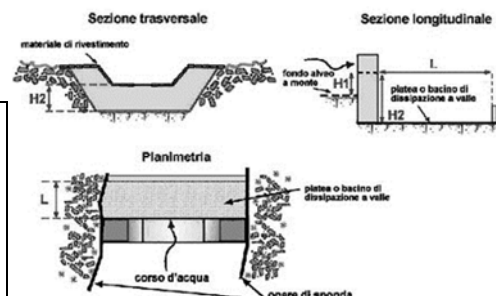
☐ Presenza opere in sponda destra in:

- ☐ Calcestruzzo ☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame ☐ Altro \_\_\_\_\_

☐ Dissesto strutturale:

- ☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato  
Localizzazione dissesto  
☐ al coronamento ☐ al corpo ☐ al piede ☐ alle fondazioni

Osservazioni<sup>15</sup>: \_\_\_\_\_



# 10. Traversa fluviali di derivazione (con/senza dispositivi di regolazione)

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_ Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Uso:

☐ Idroelettrico ☐ Potabile ☐ Irriguo ☐ Industriale  
☐ Altro \_\_\_\_\_

☐ Presenza paratoie

Tipo paratoie : ☐ Piane ☐ A settore ☐ A ventola ☐ Altro \_\_\_\_\_  
Larghezza (B) \_\_\_\_\_ - Altezza (H) \_\_\_\_\_

Numero luci parte fissa \_\_\_\_\_  
Larghezza luci parte fissa \_\_\_\_\_ Salto totale parte fissa \_\_\_\_\_

Numero luci parte mobile \_\_\_\_\_  
Larghezza luci parte mobile \_\_\_\_\_ Salto totale parte mobile \_\_\_\_\_

☐ Presenza muri d'ala

Materiale struttura:

☐ Calcestruzzo  
☐ Muratura ☐ Elementi prefabbricati ☐ Gabbioni  
☐ Massi: ☐ di cava intasati ☐ di cava a secco ☐ a scogliera  
☐ di fiume intasati ☐ di fiume a secco  
☐ Blocchi in calcestruzzo: ☐ a scogliera ☐ legati  
☐ Legname ☐ Legname e pietrame  
☐ Altro \_\_\_\_\_

Stato funzionale dell'opera

Dissesto paramento di valle:  
☐ assente ☐ localizzato ☐ generalizzato

Localizzazione dissesto:  
☐ al coronamento ☐ al corpo ☐ al piede ☐ alle fondazioni

☐ Abbassamento del fondo alveo rispetto al piede del paramento di valle di (stima): \_\_\_\_\_ m

Osservazioni<sup>16</sup>: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

<sup>16</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

## 11. Chiaviche

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Sponda \_\_\_\_\_

Funzionamento: ☐ gravità ☐ pompaggio

Numero luci: \_\_\_\_\_

Dimensioni sezione efflusso:

Larghezza \_\_\_\_m

Altezza \_\_\_\_m

Stato dell'opera

Dissesto strutturale:

☐ al coronamento

☐ al corpo

☐ al piede

☐ alle fondazioni

☐ Presenza paratoie:

Stato: ☐ Buono ☐ Cattivo

Fonte rilievo: \_\_\_\_\_

Osservazioni<sup>17</sup>: \_\_\_\_\_

---

<sup>17</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera



## 12. Opere di immissione non regolate

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_ Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_ Sponda \_\_\_\_\_

Funzionamento: ☐ gravità ☐ pompaggio

Tipo sezione: ☐ circolare ☐ rettangolare ☐ scatolare ☐ trapezia

Dimensioni sezione efflusso:

Diametro (D): \_\_\_\_\_ m

Larghezza \_\_\_\_\_ m Altezza \_\_\_\_\_ m

Materiale struttura:

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> Calcestruzzo             |   |   |
| <input type="checkbox"/> Muratura                 | <input type="checkbox"/> Elementi prefabbricati | <input type="checkbox"/> Gabbioni         |
| <input type="checkbox"/> Massi:                   | <input type="checkbox"/> di cava intasati       | <input type="checkbox"/> di cava a secco  |
|   | <input type="checkbox"/> di fiume intasati      | <input type="checkbox"/> di fiume a secco |
| <input type="checkbox"/> Blocchi in calcestruzzo: | <input type="checkbox"/> a scogliera            | <input type="checkbox"/> legati           |
| <input type="checkbox"/> Legname                  | <input type="checkbox"/> Legname e pietrame     |   |
| <input type="checkbox"/> Altro _____              |   |   |

Stato dell'opera

Dissesto strutturale:

- |   |                                   |                                   |  |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> al coronamento | <input type="checkbox"/> al corpo | <input type="checkbox"/> al piede | <input type="checkbox"/> alle fondazioni |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|

Osservazioni<sup>18</sup>: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

<sup>18</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera

### 13. Sfiotori laterali

Codice scheda \_\_\_\_\_ Rilevatore: \_\_\_\_\_

Data \_\_\_\_\_

Corso d'acqua denominazione: \_\_\_\_\_

Sponda \_\_\_\_\_

Tipo soglia sfiorante:

☐ libera ☐ con paratoie ☐ mista

Numero luci soglia libera \_\_\_\_\_

Numero luci soglia con paratoie \_\_\_\_\_

Larghezza netta soglia libera \_\_\_\_\_ m

Larghezza netta soglia con paratoie \_\_\_\_\_ m

Salto soglia libera \_\_\_\_\_ m

Salto soglia con paratoie \_\_\_\_\_ m

Tipo paratoie:

☐ piane ☐ a settore ☐ a ventole ☐ altro: \_\_\_\_\_

Larghezza paratoie \_\_\_\_\_ m

Altezza paratoie \_\_\_\_\_ m

☐ Presenza di opere in collegamento strutturale e/o funzionale con lo sfioratore

Stato dell'opera

☐ Presenza di dissesto strutturale:

Descrizione: \_\_\_\_\_

Stato paratoie: ☐ buono ☐ cattivo

Osservazioni<sup>19</sup>: \_\_\_\_\_

<sup>19</sup> Osservazioni di carattere generale sull'opera