

TRIBUNALE CIVILE DI CAGLIARI

CONSULENZA TECNICA D'UFFICIO

Esecuzione Immobiliare N° 375/2007

ALLEGATO N.3

RELAZIONE IDROLOGICA

ING. ANDREA ALLIERI

Il C.T.U.

P.E. Roberto Corona

Il Giudice dell'Esecuzione

Dott.ssa Flaminia Ielo

A. PREMESSA

Io sottoscritto Ing. Andrea Allieri, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Cagliari al n. 1889, con studio professionale in Cagliari, via S. Satta n. 29, sono stato indicato dal Geom. Roberto Corona, CTU nella procedura esecutiva n. 375/2007 ruolo gen. esecuz., quale esperto di opere idrauliche, per prestare collaborazione allo stesso, nella sua attività di indagine, provvedendo ad effettuare l'analisi delle problematiche legate all'assetto idraulico relative allo specchio d'acqua presente sul terreno pignorato.

In particolare, con verbale di udienza del 10/10/2023, nella procedura esecutiva n. 375/2007 ruolo gen. esecuz., il Giudice delle Esecuzioni immobiliari, dott.ssa Flaminia Ielo, ha disposto *“che l'esperto prosegua l'attività di indagine in collaborazione con il perito di opere idrauliche laureato in ingegneria al fine di comprendere l'origine, la regolarità ed eventualmente il costo di bonifica dello spettro di acqua presente che insiste sul terreno pignorato.”*.

In riferimento a quanto sopra, ho quindi provveduto all'effettuazione di diversi appositi sopralluoghi nei terreni oggetto di perizia, onde eseguire gli opportuni rilievi, constatazioni ed accertamenti in merito alle problematiche connesse con la presenza dello specchio acqueo di cui sopra.

Sulla base degli elementi acquisiti, ho quindi proceduto alla stesura della presente relazione di perizia, come in appresso illustrato.

B. QUESITI

Come indicato in premessa il Giudice delle Esecuzioni immobiliari, dott.ssa Flaminia Ielo, ha disposto *“che l'esperto prosegua l'attività di indagine in collaborazione con il perito di opere idrauliche laureato in ingegneria al fine di comprendere l'origine, la regolarità ed eventualmente il costo di bonifica dello spettro di acqua presente che insiste sul terreno pignorato.”*.

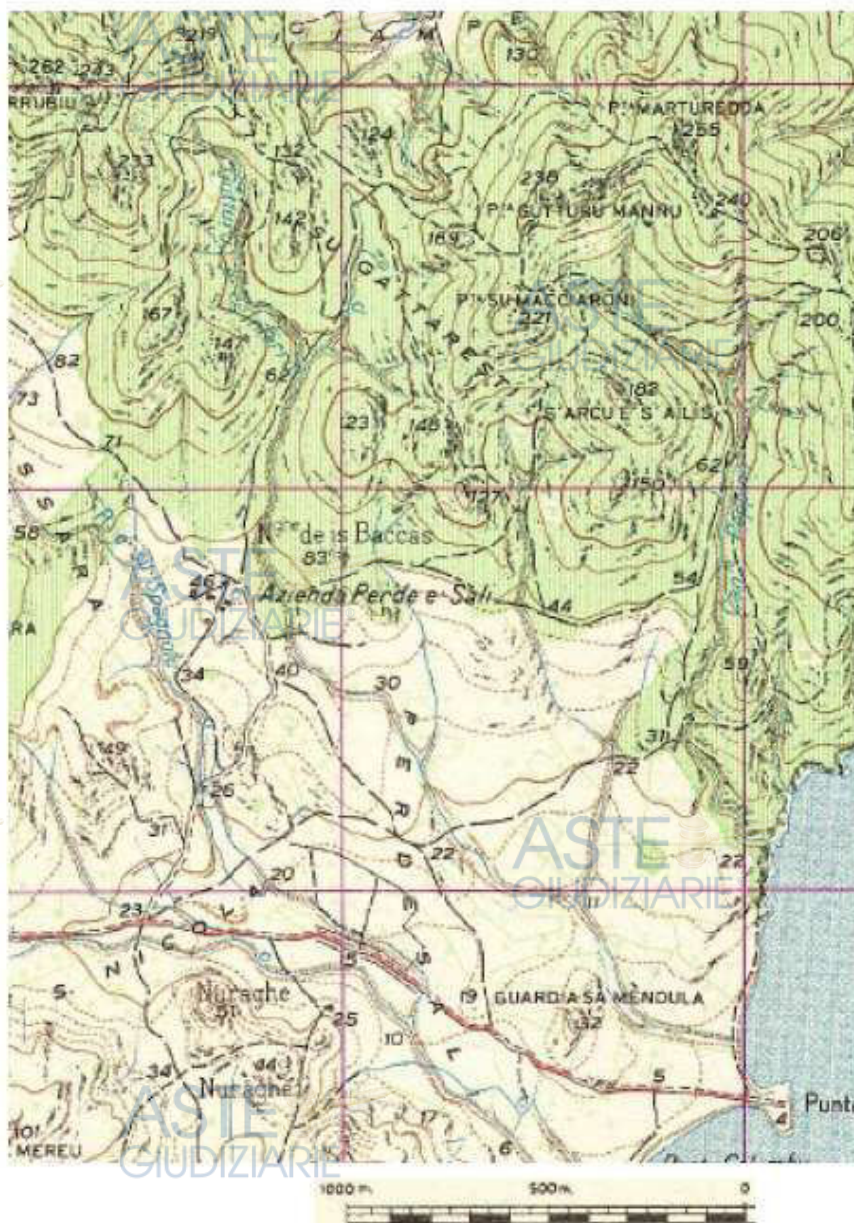
C. RISPOSTE AI QUESITIORIGINE

Lo specchio acqueo che insiste sul terreno pignorato ha origine dallo sbarramento del Rio Gutturu S'Inferu, ad una distanza di circa 100 m dalla sua foce originaria, mediante realizzazione di arginature in terra a sezione trapezia, dell'altezza di m 3 circa dal piano di campagna originario, con larghezza in sommità di 10 m circa.

Tale sbarramento ha dato luogo all'invaso attuale, della superficie di circa 15.300 mq.

In merito alla data di realizzazione di detto sbarramento non si sono rinvenuti, attraverso le numerose ricerche documentali e sulla cartografia disponibile effettuate, elementi di riferimento che consentissero almeno un periodo temporale circoscritto. Certamente l'invaso è presente nella cartografia tecnica (C.T.R. - Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000) dall'anno 2000 in poi. Non è invece presente nella Carta I.G.M. (Istituto

Geografico Militare, in scala 1:25.000 – SERIE M 891 – FOGLIO PULA 234 III SO - EDIZIONE 5 - I G M I -
VALUTAZIONE DELLA CARTA: A - 1 - X – 1958, di cui si riporta lo stralcio seguente.



Stralcio da Carta IGM (Istituto Geografico Militare) – SERIE M 891 – FOGLIO PULA 234 III SO
EDIZIONE 5 - I G M I - VALUTAZIONE DELLA CARTA: A - 1 - X - 1958

Nello stralcio è indicato l'intero sviluppo dell'asta del Rio Gutturu S'Inferu, sino al suo sbocco a mare.

Fino ad allora (1958) quindi non esisteva alcuno sbarramento lungo l'alveo del rio e, conseguentemente, nessun
invaso.

L'unico riferimento alla datazione è contenuto nella nota prot. 30460 del 02.08.2022 del Direttore del Servizio del Genio Civile di Cagliari della R.A.S., che in merito riporta quanto segue: *“Si tratta di uno sbarramento di un corso d'acqua e di relativo invaso realizzati senza alcuna autorizzazione, tra gli anni '50 e '60 ...”*.

REGOLARITA'

In merito alla regolarità della realizzazione dello sbarramento del Rio Gutturu S'Inferu, che ha dato origine allo specchio acqueo che insiste sul terreno pignorato, non risulta esservi stata richiesta autorizzativa alcuna né presso i competenti uffici della Regione Sardegna, né presso l'ufficio tecnico del Comune di Sarroch.

Il primo accertamento dell'esistenza dell'invaso in argomento risale al verbale di contestazione di cui all'art. 5, comma 2, della L.R. 12/2007, N. 18/18, DEL 05.11.2018, redatto dalla Stazione Forestale dee di V.A. di Pula e notificato in data 09.11.2018, con il quale è stata identificata la signora Obino Patrizia, nata a Carbonia il 30.04.1967, quale trasgressore per non aver presentato entro il termine perentorio del 30.06.2018 apposita istanza per ottenere l'autorizzazione alla prosecuzione dell'esercizio dello sbarramento di cui sopra.

Con nota del 28.06.2019, la signora Obino Patrizia comunicava la volontà di richiedere l'autorizzazione alla prosecuzione dell'esercizio dello sbarramento, senza tuttavia dare attuazione a tale intendimento.

Con nota n. 13407 del 26.04.2021, il Servizio del Genio Civile di Cagliari della R.A.S. comunicava alla sig.ra Obino che la richiesta di cui alla nota del 28.06.2019 non poteva essere accolta e, conseguentemente, con apposito provvedimento si sarebbe ingiunta la dismissione dello sbarramento.

Con Ordinanza Ingunzione n. 04/2021 del Direttore del Servizio del Genio Civile di Cagliari della R.A.S. determina a carico della sig.ra Obino Patrizia, oltre alla sanzione pecuniaria di euro 5.000 già irrogata, l'applicazione anche della sanzione di demolizione a proprie spese e con le dovute cautele dello sbarramento.

Considerato quanto sopra appare evidente che non sussistano dubbi sulla non regolarità dello sbarramento sul Rio Gutturu S'Inferu. A tale riguardo giova richiamare quanto contenuto nella nota prot. 30460 del 02.08.2022 del Direttore del Servizio del Genio Civile di Cagliari della R.A.S., che afferma: *“Si tratta di uno sbarramento di un corso d'acqua e di relativo invaso realizzati senza alcuna autorizzazione, tra gli anni '50 e '60 ...”*.

La nota suddetta riporta altresì che: *“per quanto riguarda la demanialità del laghetto, si fa presente che lo stesso non risulta inserito nell'elenco delle acque pubbliche, anche se questo non significa che non potrebbe essere qualificato come tale ai sensi delle norme in materia di acque pubbliche.”*.

COSTO DI BONIFICA DELLO SPETTRO DI ACQUA

In riferimento a tale quesito, è necessario preliminarmente individuare quale tipologia di intervento attuare.

Poiché con l'Ordinanza Ingunzione n. 04/2021 del Direttore del Servizio del Genio Civile di Cagliari della R.A.S. ha determinato a carico della sig.ra Obino Patrizia l'applicazione anche della sanzione di demolizione a proprie spese e con le dovute cautele dello sbarramento.

Poiché la costruzione delle arginature di delimitazione dell'invaso ha determinato una significativa modificazione morfologica della zona interessata dall'invaso, con la scomparsa del tratto terminale dell'alveo del Rio Gutturu S'Inferu sino al suo sbocco a mare, assume non si ritiene opportuno procedere alla demolizione totale delle arginature, mentre si reputa che la demolizione dello sbarramento debba intendersi come rimozione dell'ostacolo al naturale deflusso a mare del rio.

E' da rilevare infatti come, sebbene sussistano dei moti di filtrazione dal bacino al mare, è di tutta evidenza che, comunque, le attuali condizioni potrebbero assumere una criticità idraulica anche elevata, con la probabile insorgenza conseguente di situazioni di pericolo per la pubblica incolumità, in corrispondenza di portate di piena del Rio Gutturu S'Inferu particolarmente significative.

Si ritiene pertanto che la "bonifica" debba consistere sostanzialmente nella realizzazione del collegamento del bacino col mare, mediante esecuzione delle seguenti opere:

- condotta, dello sviluppo di m 95,00, realizzata con tubi in cemento vibrocompresso, con sottofondo e rinfianchi in conglomerato cementizio RcK 25
- pozzetto scolmatore, in prossimità del bacino, in c.a. con fondo, pareti e soletta in cls Rck 30 dello spessore di cm 30;
- n. 3 pozzetti di ispezione dimensioni interne cm. 230x230x230 h, con fondo, pareti e soletta in cls Rck 30 dello spessore di cm 30

come illustrato nell'allegato "SCHEMA PLANIMETRICO SBOCCO A MARE".

In merito alla determinazione del costo di dette opere occorre procedere ad un predimensionamento delle medesime, per il quale si è reso necessario uno studio idrologico (Allegato 1), che ha portato alla valutazione di piena del Rio Gutturu S'Inferu, in riferimento ad un tempo di ritorno assunto pari a 20 anni, pari a

$$Q = 10,13 \text{ mc/s.}$$

Per il predimensionamento della condotta si è operato assumendo un diametro della stessa ed effettuando un calcolo di verifica.

E' stata quindi considerata una condotta in tubi in cemento rotocompresso del diametro interno DN di 150 cm.

Per la determinazione della portata massima che può defluire attraverso il tubo DN 150 cm, si applica la relazione di Chezy:

$$Q' = \chi A (R \cdot i)^{1/2}$$

con

$\chi = c R^{1/6}$ coefficiente di scabrezza (formula di Gauckler – Strickler);

$c = 70$

$R = A/C$ raggio idraulico

A area di sezione liquida

C contorno bagnato;

i = 3% pendenza della condotta nel tratto terminale

Assumendo un grado di riempimento della tubazione pari a $h = 0,75$, si ha:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\pi}{6} + \sqrt{3/16} = 1,4217 \text{ mq}$$

$$C = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \frac{\pi}{4} = 3,1416$$

$$R = 0,4525$$

Da cui si perviene ad una portata pari a

$$Q' = 10,16 \text{ mc/s}$$

Quindi, essendo la portata che può defluire attraverso la condotta maggiore della massima portata prevedibile (relativa al prefissato tempo di ritorno $T = 20$ anni):

$$Q' > Q$$

La verifica idraulica in esame risulta verificata.

Stima delle opere

Si espone di seguito la stima delle opere sopra descritte, necessarie per la bonifica dello spettro di acqua, effettuata con riferimento, laddove possibile, al Prezzario Regionale dei Lavori Pubblici della Regione Sardegna 2023, ed ai prezzi correnti di mercato per opere simili.

Codice	Descrizione	Quantità	Prezzo unitario	Importo
SAR23_PF.0001.0002.0020	SCAVO A SEZIONE RISTRETTA E OBBLIGATA per fondazioni di opere d'arte di qualsiasi tipo e importanza $m \ 2,50 \times 2,80 \times 75,00 = mc \ 525,00$	mc 525,00	€ 15,79	€ 8.279,75
SAR23_PF.0001.0002.0038	RINTERRO DI CAVIA SEZIONE LARGA O RISTRETTA E OBBLIGATA per fondazioni di opere d'arte o simili $m \ 2,50 \times 1,00 \times 75,00 = mc \ 187,50$	mc 187,50	€ 6,67	€ 1.250,62
SAR23_PF.0001.0002.0081	Fornitura e posa in opera della massicciata stradale eseguita con tout venant $m \ (9,00 + 6,50) \times 0,50 \times 2,80 = mc \ 187,50$	mc 21,70	€ 22,71	€ 492,81
	Fornitura e posa in opera tubi di cemento rotocompresso dati in opera compresi il sottofondo e i rinfianchi in conglomerato cementizio RcK 25 DN 150 cm	m 95,00	€ 680,00	€ 64.600,00

Pozzetto scolmatore realizzato con fondo, pareti e soletta

in cls Rck 30 dello spessore di cm 30

n. 1

€ 4.200,00 € 4.200,00

Pozzetto di ispezione dimens. interne cm 230x230x230,

realizzato con fondo, pareti e soletta in cls Rck 30 dello spes-

sore di cm 30

n. 3

€ 3.400,00 € 10.200,00

Sommano i lavori

€ 89.023,18

Importo che, considerata l'entità della cifra, può essere arrotondato a € **89.000,00** (diconsi euro ottantanovemila/00).

A tale cifra va sommato l'importo degli onorari e spese relativi alla progettazione e direzione lavori, che si stima in € 9.000,00, pari a circa il 10% dell'importo lavori.

Pertanto l'ammontare del costo di bonifica dello spettro d'acqua ascende complessivamente a

$€ 89.000,00 + € 9.000,00 = € 98.000,00$

(diconsi euro novantottomila/00).

Allegati:

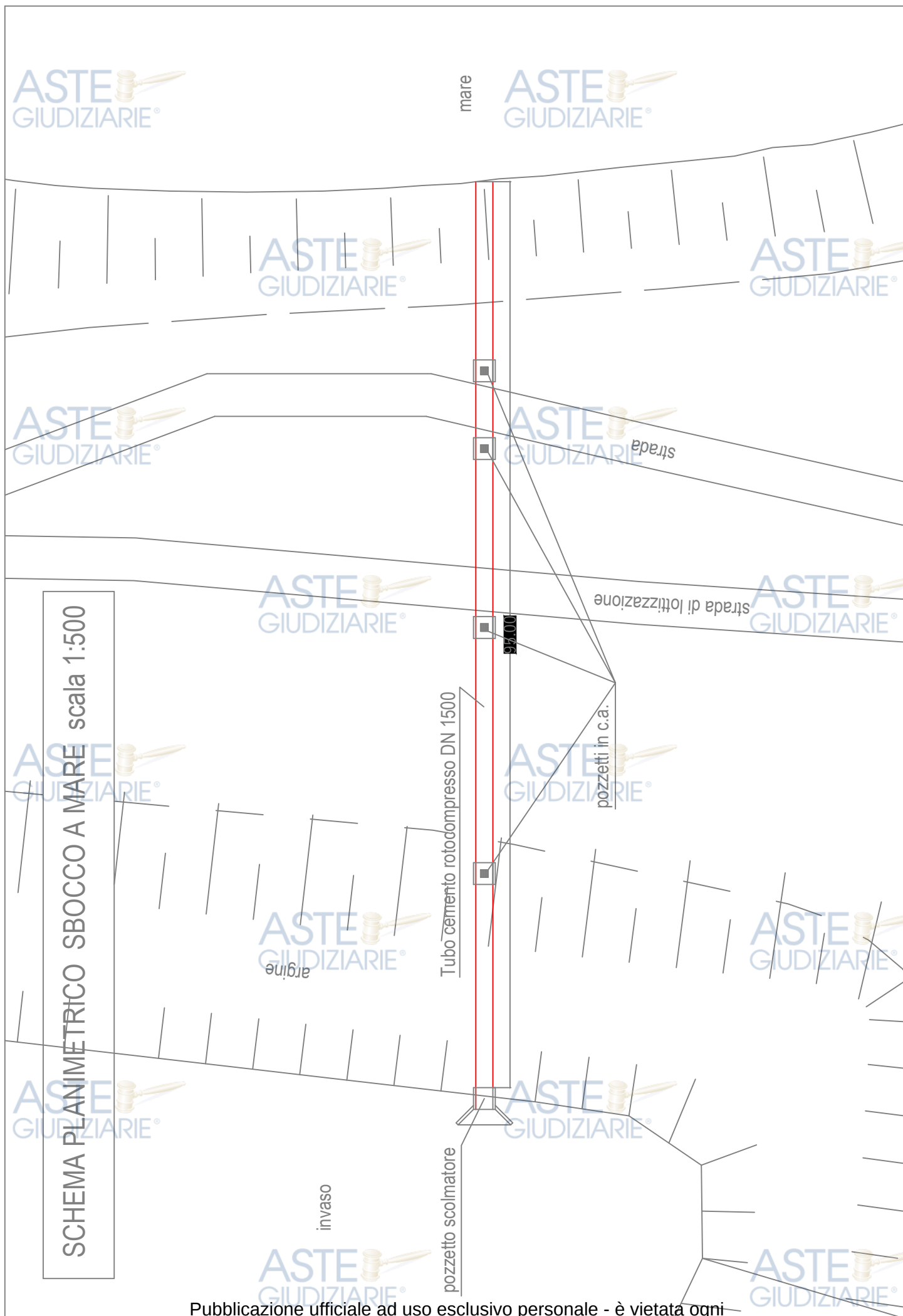
- SCHEMA PLANIMETRICO SBOCCO A MARE
- ALLEGATO 1 – STUDIO IDROLOGICO

Cagliari, 19.04.2024

Il tecnico

Ing. Andrea Allieri





SCHEMA PLANIMETRICO SBOCCO A MARE scala 1:500



STUDIO IDROLOGICO

Il tecnico

Ing. Andrea Allieri



1. INDICAZIONI GENERALI STUDIO IDROLOGICO

Come detto precedente, il corpo idrico in esame è costituito da un bacino ottenuto mediante sbarramento del Rio Gutturu S'Inferu, in prossimità della foce naturale.

Il Rio Gutturu S'Inferu è un corso d'acqua a carattere torrentizio, censito nel Piano di Tutela delle Acque, redatto dal Servizio della Tutela delle Acque dell'Assessorato della Difesa dell'Ambiente della Regione Autonoma Sardegna, approvato con D.G. n. 14/16 del 04/04/2006.

Per tale rio il Piano suddetto riporta i dati seguenti:

N	Nome Bacino Idrografico	Codice Bacino CEDOC	Area Bacino (Kmq)
32	Riu Gutturu S'Inferu	0290	1,99

Per il corretto dimensionamento idraulico delle opere in esame è indispensabile la conoscenza del regime idrologico della zona in studio.

Lo studio idrologico si articola secondo i seguenti punti:

- caratterizzazione morfometrica del bacino idrografico;
- scelta del modello idrologico per la determinazione della portata di massima piena;
- scelta della metodologia per la determinazione della curve di possibilità climatica;
- determinazione del tempo di corrivazione del bacino;
- scelta del tempo di ritorno e calcolo della portata di massima piena.

Attraverso i risultati dell'analisi idrologica è stato possibile, quindi, effettuare il predimensionamento idraulico delle opere oggetto della presente relazione.

Si evidenzia che tutti i calcoli riportati nella presente relazione sono stati sviluppati con un livello di dettaglio coerente col livello di predimensionamento.

2. STUDIO IDROLOGICO

2.1 Impostazione dello studio: determinazione dei parametri morfometrici del bacino.

L'area oggetto del presente studio è individuabile nella Cartografia Tecnica Regionale (C.T.R) in scala 1:10000 redatta dalla R.A.S. (Regione Autonoma della Sardegna) e nella Carta IGM (Istituto Geografico Militare) – SERIE M 891 – FOGLIO PULA 234 III SO - EDIZIONE 5 - I G M I - VALUTAZIONE DELLA CARTA: A - 1 - X – 1958.

Attraverso la cartografia digitale è stato individuato il bacino imbrifero del corso d'acqua Riu Gutturu S'Inferu, dopo aver fissato la sezione di chiusura in corrispondenza della sua foce nella sua posizione originaria (come da Carta IGM).

Individuato lo spartiacque, attraverso misurazioni effettuate direttamente sulla cartografia digitale, è stato possibile determinare i parametri morfometrici dei bacini. In particolare, sono stati calcolati:

- Area (A);
- lunghezza dell'asta fluviale (L_{asta});
- pendenza dell'aste fluviale ($i_{m.asta}$);
- quote media (Z_{med}) e minima (Z_{chius}) del bacino.

La determinazione di tali parametri risulta indispensabile per ottenere i dati di ingresso occorrenti al calcolo della portata di massima piena attraverso le metodologie di calcolo cosiddette "indirette" (vedasi Paragrafo 2.2).

Le caratteristiche morfometriche del bacino sono di seguito riportate:

Bacino	A	L_{asta}	$i_{m.asta}$	Z_{chius}	Z_{med}
	km ²	Km	m/m	m s.l.m.	m s.l.m.
Rio Gutturu S'Inferru	1,99	2,79	0,023	0,00	81

2.2 Determinazione delle curve di possibilità pluviometrica

Le diverse procedure analitiche di valutazione delle piene di un corso d'acqua si basano, in maniera più o meno marcata, sulla elaborazione delle serie storiche di dati idrologici raccolti da stazioni pluviometriche e idrometriche.

La Sardegna, come altre regioni d'Italia, risente della limitatezza di tali serie storiche e la semplice elaborazione statistica dei dati raccolti fornisce risultati non sufficientemente attendibili riguardo il comportamento idrologico dei bacini regionali.

Spesso, infatti, si ha la necessità di dover determinare le portate di piena di un bacino idrografico in sezioni per le quali non esistono stazioni di misura idrometriche ovvero in zone la cui copertura di stazioni pluviometriche è insufficiente o ancora in zone dove le serie storiche delle misurazioni raccolte appaiono incomplete.

Ci si ritrova così nella situazione di dover stimare le portate al colmo di piena mediante metodi indiretti (modelli di calcolo 'sintetici' oppure modelli 'empirici') sviluppati appositamente per la particolare realtà territoriale, che prescindono dalla elaborazione diretta delle raccolte dei dati pluviometrici e idrometrici. I risultati ottenuti da tali modelli vengono sottoposti successivamente ad una valutazione critica in modo da verificarne l'attendibilità.

Tali metodologie sono sviluppate utilizzando le serie storiche delle registrazioni pluviometriche di quelle zone del territorio dove le osservazioni risultano più consistenti e continue nel tempo. Da tali raccolte di dati si deduce il regime pluviometrico dei bacini 'osservati' e, una volta determinato

questo, si tenta di interpretare il comportamento di un bacino ‘non osservato’ attribuendogli quello di un bacino ‘osservato’ reputato ‘idrologicamente omogeneo’ ad esso.

I metodi di calcolo adottati nel presente studio per la determinazione delle curve di possibilità climatica sono quelli riportati nella letteratura tecnica specialistica e richiamati anche dalle Linee Guida del Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.) della Regione Sardegna, dettagliatamente descritti al paragrafo 1.7 del citato documento. In tale paragrafo si evidenzia che la determinazione della portata di massima piena deve avvenire mediante il confronto critico fra i risultati ottenuti tramite le metodologie dirette (ovvero ottenute tramite elaborazione di dati effettivamente misurati), indirette, empiriche e i dati osservati, ove disponibili.

Nel presente studio, tralasciate le metodologie empiriche per la limitata affidabilità dei loro risultati, sono state considerate esclusivamente metodologie di tipo indiretto in quanto quelle di tipo diretto ricavate per la Sardegna (log-normale e TCEV) ben si adattano a bacini di significative dimensioni (Area > 60 km²), fornendo risultati non attendibili per bacini di piccole dimensioni come quello in esame.

La determinazione della portata di piena attraverso le metodologie indirette passa perciò per la determinazione delle *curve di possibilità pluviometrica o climatica*, le quali descrivono la risposta del bacino all’afflusso meteorico fornendo il legame analitico fra l’altezza di pioggia (ovvero l’intensità di pioggia) e la durata dell’evento meteorico. Ottenute le altezze di pioggia è possibile procedere alla determinazione della portata di piena del bacino in studio.

La determinazione delle curve di possibilità pluviometrica è stata condotta ponendo a confronto i risultati offerti dal metodo VAPI e dal modello log-normale.

2.2.1 Metodo VAPI

Il primo fra i modelli di calcolo utilizzati nel presente studio è quello di regionalizzazione delle piogge basato sulla procedura VA.PI. (VALutazione PIene) nel quale la distribuzione delle massime altezze di pioggia giornaliere segue la distribuzione probabilistica TCEV.

Per la Sardegna l’illustrazione completa di tale metodo è riportata nel Rapporto Regionale “*Valutazione delle piene in Sardegna*” (Cao et al.) pubblicato nel 1991 a cura del CNR-IRPI, nell’ambito del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNCDI) e in indagini e analisi condotte in date successive (Deidda et al., 1993; Deidda e Piga, 1996; Deidda et al., 1997).

Gli studi condotti sui massimi valori delle piogge giornaliere e sulle piogge brevi e intense in Sardegna, mostrano come il modello probabilistico a quattro parametri TCEV ben riesca ad

interpretare le caratteristiche di frequenza delle serie storiche pluviometriche del territorio regionale. L'analisi delle registrazioni, infatti, spesso mette in evidenza, accanto a valori ordinari, la presenza di valori di piovosità particolarmente elevati che non riescono ad essere interpretati con sufficiente accuratezza dalle distribuzioni probabilistiche normalmente adottate, caratterizzate da un numero esiguo di parametri.

La distribuzione probabilistica TCEV1, al contrario, che si rappresenta mediante una funzione di probabilità cumulata del tipo:

$$P(x) = \exp(-\Lambda_1 \cdot e^{\frac{x}{\Theta_1}} - \Lambda_2 \cdot e^{\frac{x}{\Theta_2}}) \quad (1)$$

è caratterizzata dalla presenza di ben 4 parametri, i primi due dei quali (Λ_1 e Θ_1) descrivono la componente della distribuzione relativa agli eventi ordinari, più frequenti, mentre gli ultimi due (Λ_2 e Θ_2) esprimono la componente straordinaria relativa agli eventi di magnitudine maggiore e più rari.

In particolare, se la funzione di probabilità (1) viene riferita al massimo valore $h(\tau)$ dell'altezza di pioggia di durata τ [$P(h(\tau))$], e se si effettua una trasformazione di variabili ponendo $\Theta^* = \Theta_2/\Theta_1$, $\Lambda^* = \Lambda_2/\Lambda_1^{1/\Theta^*}$ e $\Theta_l = \Theta_{h(\tau)}$, essa assume la forma seguente:

$$P(h(\tau)) = \exp(-\Lambda_1 \cdot e^{\frac{h(\tau)}{\Theta_{h,\tau}}} - \Lambda^* \cdot \Lambda_1^{\frac{1}{\Theta^*}} \cdot e^{\frac{h(\tau)}{\Theta_{h,\tau} \cdot \Theta^*}}) \quad (1')$$

dove Λ_1 , Λ^* , $\Theta_{h,\tau}$ e Θ^* sono i parametri della distribuzione TCEV con

$$\Theta_{h,\tau} = \frac{\mu_{h,\tau}}{\eta_\tau} = \frac{\mu_{h,\tau}}{\ln \Lambda_1 + 0.5772 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{(-1)^j \cdot \Lambda^*^j}{j!} \cdot \Gamma\left(\frac{j}{\Theta^*}\right)} \quad (2)$$

e dove $\mu_{h,\tau}$, chiamata anche *pioggia indice*, rappresenta la media della variabile $h(\tau)$.

Per la determinazione di $h(\tau)$ è dunque sufficiente stimare i 4 parametri della distribuzione (1') anche se la sua forma implicita ne rende l'impiego piuttosto difficoltoso.

Il procedimento di stima dei parametri della distribuzione TCEV avviene mediante una procedura di tipo gerarchico che prevede tre successivi livelli di regionalizzazione. Vengono raccolte le registrazioni di tutte le stazioni pluviometriche presenti nel territorio regionale e, per poter considerare anche i dati raccolti dai pluviometri ordinari, la regionalizzazione viene condotta sulle altezze di pioggia giornaliere $h(d)$ ¹.

Al primo livello di regionalizzazione corrisponde la determinazione dei parametri θ_* e λ_* i cui valori sono costanti su tutto il territorio della regione Sardegna che viene considerata come un'unica zona pluviometrica omogenea.

Al secondo livello compete la determinazione del parametro λ_i , diverso a seconda della sub-zona omogenea in cui il territorio regionale è stato suddiviso. Per la Sardegna sono state individuate 3 sub-zone omogenee.

Al terzo livello di regionalizzazione compete la determinazione del valore della pioggia indice $\mu_{h,\tau}$ in ogni punto del territorio regionale.

Allo scopo di facilitare l'impiego del modello che, come detto, esprime implicitamente, tramite la (1'), l'altezza della precipitazione, si è cercato di ottenere delle relazioni esplicite fra l'altezza di pioggia $h(\tau)$, la probabilità di non superamento dell'evento $P(u) = 1 - \frac{1}{T_R}$ (associata al tempo di ritorno T_R) e la durata della precipitazione τ .

¹ Nelle espressioni precedenti “ τ ”, che esprime la variabile generica “tempo”, diventa “ d ” per esprimere il “giorno”.

Si ricava così che l'altezza di pioggia e la pioggia indice $\mu_{h,\tau}$ sono in relazione fra loro attraverso la variabile adimensionale $h'(\tau, T_R)$:

$$h_\tau = \mu_{h,\tau} \cdot h'(\tau, T_R) \quad (3)$$

dove è stata evidenziata la dipendenza di tale variabile dal tempo di ritorno T_R dell'evento.

La variabile adimensionale, definita per ciascuna delle tre sub-zone omogenee in cui è stato ripartito il territorio regionale, ha la seguente espressione generale:

$$h'(\tau, T_R) = a_2(T_R) \cdot \tau^{b_2(T_R)} \quad (4)$$

I valori dei due parametri a_2 e b_2 sono variabili a seconda della sottozona di appartenenza e dipendono dal tempo di ritorno dell'evento. Negli eventi brevi e intensi, cioè di durata inferiore al giorno, i parametri a_2 e b_2 differiscono all'interno della stessa sub-zona a seconda che il tempo di ritorno sia superiore o inferiore ai 10 anni. Inoltre, per tempi di ritorno superiori ai 10 anni il parametro b_2 assume valori differenti a seconda che la durata della precipitazione sia superiore o inferiore all'ora.

Introducendo nella relazione (3) la relazione (4), si ottiene la formulazione esplicita delle curve di possibilità pluviometrica valutate col metodo VAPI, ovvero la relazione che intercorre fra altezze di pioggia, durate e tempo di ritorno:

$$h_\tau = \mu_{h,\tau} \cdot a_2(T_R) \cdot \tau^{b_2(T_R)} \quad (3')$$

La pioggia indice $\mu_{h,\tau}$, dipendente esclusivamente dalla durata della precipitazione τ , si esprime attraverso la relazione

$$\mu_{h,\tau} = a_1 \cdot \tau^{b_1}$$

dove i parametri a_1 e b_1 sono espressi dalle relazioni:

$$a_1 = \frac{\mu_d}{0.886 \cdot 24^{b_1}}$$

$$b_1 = -0.493 + 0.476 \cdot \text{Log} \mu_d$$

Il parametro μ_d , che rappresenta la pioggia indice giornaliera, è ricavabile dalla consultazione della carta regionale delle isoiete tracciata appositamente per tale indice.

La relazione (3') può, in definitiva, risciversi come:

$$h(\tau, T_R) = (a_1 \cdot a_2) \cdot \tau^{(b_1+b_2)} \quad (3'')$$

dove è stata messa in evidenza la dipendenza dell'altezza di pioggia h dalla durata dell'evento e dal tempo di ritorno.

Per quanto concerne il bacino in studio, esso ricade nella Subzona 2. La pioggia indice μ_d per il bacino è pari a 55. I tempi di ritorno utilizzati sono quelli indicati al Paragrafo 2.3. Le durate della precipitazione, infine, sono state scelte coincidenti col tempo di corrivazione T_c del bacino che rappresenta, per definizione, il tempo impiegato dalla particella d'acqua caduta nel punto idraulicamente più lontano dalla sezione di chiusura a raggiungere la sezione di chiusura stessa (vedasi Paragrafo 2.4).

Con queste scelte, nella (3''), se si eccettuano i valori di a_1 e b_1 che restano costanti per ogni subzona e per qualsiasi tempo di ritorno, dipendendo solo da μ_d , i valori degli altri parametri per tempi di ritorno superiori a 10 anni e per piogge brevi e intense saranno:

- $a_2 = 0.46420 + 1.0376 \cdot \text{Log } T_R$
- $b_2 = -0.18722 + 0.24862 \cdot \text{Log } T_R - 3.6305 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{Log } T_R)^2$ (se $\tau < 1 \text{ ora}$)
- $b_2 = -6.3887 \cdot 10^{-3} - 4.5420 \cdot 10^{-3} \cdot \text{Log } T_R$ (se $\tau \geq 1 \text{ ora}$)

Riferendosi invece alla pioggia giornaliera, l'altezza di pioggia, per la Subzona 2, sarà espressa in funzione del tempo di ritorno dalla relazione:

$$h_d (T_R) = \mu_d \cdot (0.60937 + 0.91699 \cdot \text{Log } T_R + 3.9932 \cdot 10^{-2} \cdot (\text{Log } T_R)^2) \quad (3''')$$

2.2.2 Metodo log-normale

In tale metodo, l'espressione delle curve di possibilità pluviometrica è la seguente:

$$h = h_1 \cdot T_p^{(a+bu)} \quad (5)$$

con

- $\log h_1 = c + d \cdot u$
- T_p = durata della pioggia
- h = altezza della pioggia di durata pari a T_p
- u = frattile della distribuzione normale standardizzata relativo alla probabilità di non superamento dell'evento considerato $P(u) = 1 - \frac{1}{T_R}$.

I parametri a , b , c e d delle curve, relativamente alla Sardegna, sono stati ricavati da lavori di Cao, Pazzaglia e Puddu coi successivi aggiornamenti apportati da Piga e Liguori. Secondo tali studi, in Sardegna vengono individuati quattro gruppi di stazioni omogenee per ciascuno dei quali le curve hanno la medesima espressione ovvero ben determinati valori dei parametri a , b , c e d .

I quattro gruppi sono stati determinati attraverso elaborazioni statistiche dei dati raccolti da 46 stazioni pluviografiche. L'attribuzione di una curva di possibilità pluviometrica ad un punto del territorio regionale può essere fatta attribuendogli quella della stazione pluviografica più vicina.

Il bacino in esame ricade nel I gruppo (stazione Pula) e i valori dei parametri della relativa curva di possibilità pluviometrica, aggiornati al 1991, sono i seguenti:

$$a = 0.305043 \quad b = 0.0171463$$

$$c = 1.273175 \quad d = 0.179731$$

2.3 Determinazione della portata di massima piena

Note le espressioni delle curve di possibilità pluviometrica associate ai diversi tempi di ritorno T_R , è possibile, tramite queste, determinare l'altezza di pioggia corrispondente ad una durata stabilita e determinare, quindi, la portata corrispondente.

Poiché, dai calcoli idrologici effettuati, risulta che la distribuzione probabilistica TCEV offre, a parità di tutti gli altri parametri, valori maggiormente cautelativi di portata (ossia superiori) rispetto alla distribuzione log-normale, essa è stata adottata come distribuzione descrittiva delle curve di possibilità pluviometrica del sito in esame.

Pertanto, una volta determinate le espressioni delle curve di possibilità pluviometriche e nota l'altezza di pioggia giornaliera, applicando la relazione (3'''), con tempo di ritorno di 20 anni, è stata valutata la portata di massima piena.

La portata di piena Q_{max} è stata calcolata utilizzando la nota Formula Razionale che esprime la massima portata al colmo come prodotto tra l'altezza di precipitazione h (di assegnata durata T_p e periodo di ritorno T_R), il coefficiente di assorbimento Ψ , la superficie del bacino A e l'inverso della durata critica T_p della precipitazione:

$$Q_{max} = \Psi \cdot \frac{h \cdot A}{3.6 \cdot T_p} \quad (6)$$

dove h è espresso in mm , A è espresso in km^2 e T_p è espresso in ore .

Come durata critica della pioggia T_p che genera l'evento di massima piena viene assunto il tempo di corrivazione T_c del bacino.

Per il calcolo del tempo di corrivazione T_c sono stati confrontati i valori ottenuti dall'applicazione delle formule del Ventura, Viparelli, Giandotti e Pasini (vedasi Paragrafo 2.4), scegliendo, fra questi, il valore più attendibile in base al campo di applicabilità delle formule, ovvero, qualora i risultati convergano verso un valore comune, calcolando la media fra di essi.

Per quanto riguarda la determinazione del coefficiente di deflusso Ψ , tale coefficiente appare fortemente influenzato dalla permeabilità del terreno, dovendo tener conto di tutta quella parte della precipitazione che non contribuisce al deflusso superficiale. La permeabilità del terreno, a sua volta, può dipendere dalla sua capacità di drenaggio, legata alla natura geologica del terreno stesso e alle condizioni di saturazione nell'istante antecedente l'evento meteorico.

Il coefficiente di deflusso Ψ , che consente di tener conto del volume di precipitazione che si infila nel terreno e non contribuisce al deflusso superficiale, può essere ricavato con il metodo del *Curve Number* del *Soil Conservation Service* (S.C.S.).

Con tale metodo la pioggia netta (che contribuisce al deflusso superficiale) viene espressa come una funzione della precipitazione totale, della copertura del suolo, dell'uso del terreno e delle condizioni di umidità del terreno antecedenti l'evento meteorico.

La relazione che lega Ψ al CN è la seguente:

$$\Psi = \frac{(h - 0,2 \cdot S)^2}{h \cdot (h + 0,8 \cdot S)} \quad (7)$$

dove:

h : altezza di pioggia totale

$$S = \frac{25400 - 254 \cdot CN}{CN}$$

I dati di partenza utilizzati per il calcolo del CN sono quelli presenti nello studio IFRAS, nel quale tutto il territorio della Sardegna è stato diviso in una maglia georeferenziata di quadrati di 400 metri per lato. A ciascun vertice della maglia, indicato mediante coordinate UTM, sono associate, tra le altre, le seguenti informazioni:

- uso del suolo;
- grado di copertura.

In particolare, i dati relativi all'uso del suolo e al grado di copertura sono stati utilizzati per la valutazione del parametro di assorbimento CN. I valori del CN, che teoricamente possono variare tra zero (assenza di deflusso superficiale) e 100 (assenza di perdite per infiltrazione), si ricavano dalle tabelle del *Soil Conservation Service*. I valori del parametro CN forniti dalle tabelle, si riferiscono a condizioni medie di umidità del terreno all'inizio della precipitazione (la cosiddetta classe AMC II).

Per via della natura del suolo della zona in esame, si è deciso di adottare un approccio più cautelativo, riportando i valori ricavati dalle tabelle del CN, attraverso fattori di conversione forniti sempre dal S.C.S, alla classe AMC III. Tale classe si riferisce a condizioni di terreno saturo d'acqua

all'inizio della precipitazione, situazione che implica il minimo assorbimento da parte del suolo e quindi il massimo deflusso superficiale.

Poiché il valore di Ψ è funzione dell'altezza di pioggia h (vd. relazione 7) e questa, a sua volta, si esprime attraverso le curve di possibilità pluviometrica, risulta che il valore di Ψ ottenuto attraverso le curve di possibilità pluviometrica ricavate mediante il **metodo VAPI**, per il tempo di ritorno considerato (20 anni), è pari a $\Psi_{20} = 0,7$

2.4 Il tempo di corrivazione

Fra le formule proposte in letteratura per la determinazione del tempo di corrivazione T_c , quelle che vengono reputate maggiormente attendibili rispetto all'idrografia dei corsi d'acqua della Sardegna sono le seguenti:

Formula di Ventura:

$$T_c = 0.1272 \cdot \left(\frac{A}{j_{ma}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Formula di Giandotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{(z_m - z_s)}}$$

2^a Formula del Pasini:

$$T_c = \frac{0.108 \cdot (A \cdot L)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{j_{ma}}}$$

Formula di Viparelli:

$$T_c = \frac{L}{3.6 \cdot V}$$

dove:

- $T_c(h)$ è il tempo di corrivazione
- $A (km^2)$ è l'area del bacino
- j_{ma} è la pendenza media dell'asta principale
- $L (km)$ è la lunghezza dell'asta principale
- $z_m (m s.l.m.)$ è la quota media del bacino
- $z_s (m s.l.m.)$ è la quota della sezione di chiusura
- $V (m/s)$ è una velocità media (fittizia) di deflusso compresa tra 1 e 1.5 m/s

Le espressioni del tempo di corrivazione forniscono, per il medesimo bacino, risultati spesso discordanti caratterizzati da ampi intervalli di variabilità. Tale variabilità è imputabile al carattere sperimentale delle formule utilizzate e alla non perfetta similitudine fra le caratteristiche morfometriche dei bacini in studio con quelle dei bacini utilizzati per la formulazione delle relazioni.

Fra le espressioni sopra riportate si è visto, ad esempio, che la relazione del Pasini, in generale, ben si adatta ai piccoli bacini sardi, mentre quella del Giandotti, pur essendo una fra le formule più diffuse, applicata indifferentemente a bacini di qualsiasi dimensione, a rigore, dovrebbe essere

valida esclusivamente per bacini di estensione compresa fra 170 km^2 e 70.000 km^2 . Nei piccoli bacini montani, inoltre, sottostima il valore di T_c .

La formula del Viparelli richiede una certa sensibilità e attenzione nell'applicazione in quanto è a discrezione dell'operatore attribuire alla velocità media (fittizia) di deflusso V un qualsivoglia valore compreso tra 1 e 1.5 m/s . Si capisce quindi la limitata affidabilità dei risultati che essa offre in un bacino naturale, la quale, invece, tende ad aumentare quando la formula viene utilizzata in canali regolarizzati o in bacini di limitata estensione e caratteristiche omogenee.

La relazione del Ventura, infine, dovrebbe essere applicata, a rigore, solo per valori della pendenza j_{ma} compresa fra il 3% e il 4%.

Per il bacino in esame sono state applicate tutte le relazioni sopra riportate e i risultati ottenuti sono stati sottoposti a confronto critico in modo da poter scegliere il più attendibile.

Due fra le formule sopra riportate, ovvero le relazioni del Ventura e quella del Pasini, hanno fornito risultati del tempo di corrivazione convergenti verso un valore comune con scarti contenuti. Per tale motivo, il tempo di corrivazione adottato per il bacino in esame è il valore medio fra i risultati ottenuti con le relazioni del Ventura e del Pasini, pari a $T_c = 1,222 \text{ h}$

2.5 Risultati dello studio idrologico

In relazione ai dati d'ingresso (parametri morfometrici del bacino, caratteristiche della subzona pluviometrica di appartenenza, tempi di ritorno degli eventi di piena...) la portata determinata attraverso le curve di possibilità pluviometrica ricavata tramite il **metodo VAPI** è pari a

$$Q_{\max.20} = 10,13 \text{ mc/s}$$

ricordando che tale valore è stato considerato poiché apparso più cautelativo rispetto a quello della distribuzione log-normale, in quanto sempre superiore a quello fornito da tale distribuzione.