

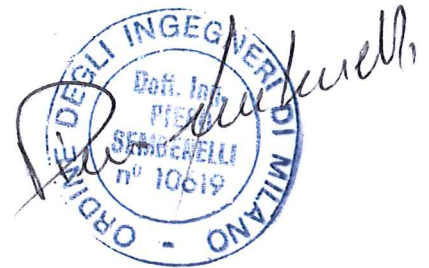


MEDITERRANEA DELLE ACQUE spa
GENOVA

DIGA DI BADANA
INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA

PROGETTO DEFINITIVO
Mod. M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013

VOL. 3B



RELAZIONE IDROLOGICA



SEMBENELLI
CONSULTING

**MEDITERRANEA DELLE ACQUE spa
GENOVA**

**DIGA DI BADANA
INTERVENTI DI MANUTENZIONE STRAORDINARIA**

**PROGETTO DEFINITIVO
Mod. M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013**

VOL. 3B

RELAZIONE IDROLOGICA

Redatto M. Scarella

Approvato P. Sembenelli

Documento F:\1EDIT\BADE\REL\...\Vol 3\R140512-Vol 3B.docx

Data: 12 maggio 2014



STRUTTURA DEL DOCUMENTO

Questo è il **Volume 3B** del **Progetto Definitivo** degli interventi di manutenzione straordinaria che si rendono necessari sulla diga di Badana, uno degli invasi a servizio dell'acquedotto di Genova, in seguito ai dissesti prodottisi nel febbraio 2006.

Il dossier completo del **Progetto Definitivo** è stato redatto in ottemperanza all'Art. 33 del D.P.R. 207/2010 e recepisce le modifiche M.INF. DIGHEIDREL Div. V 20/9/2013. Gli elaborati sviluppati da SC comprendono i seguenti Volumi:

VOL 1 - Relazione Descrittiva

VOL 2 - Elaborati Grafici

VOL 3 - Relazioni Tecniche e Specialistiche

3A - Relazione Geologica e Geomeccanica

3B - Relazione Idrologica

3C - Relazione Idraulica

3D - Studio di Filtrazione

VOL 4 - Calcoli Strutturali

VOL 5 - Specifiche Tecniche

VOL 6 - Computo Metrico Estimativo

VOL 7 - Elenco Prezzi Unitari e Analisi Prezzi

VOL 8 - Cronoprogramma



INDICE

1	OGGETTO	4
2	CARATTERISTICHE DEL BACINO E DELLO SBARRAMENTO.....	5
2.1	Morfologia del Bacino	5
2.2	Diga di Badana	6
3	PIOGGE DI MASSIMA INTENSITÀ E BREVE DURATA.....	8
3.1	Analisi Pluviometrica	8
3.2	Interpretazione Probabilistica	8
3.3	Curve di Possibilità Pluviometrica	10
4	PORTATE DI PIENA	15
4.1	Premessa	15
4.2	Studio ADFG	15
4.2.1	<i>Tempo di Corrivazione</i>	16
4.2.2	<i>Ietogramma di Progetto e Precipitazione Efficace</i>	16
4.2.3	<i>Idrogramma Unitario</i>	18
4.3	Metodo di Regionalizzazione	19
4.4	Valutazioni del RID	21
4.5	Portate di Riferimento	21
5	ANALISI DEI LIVELLI DEL SERBATOIO	23
5.1	Introduzione	23
5.2	Serie Storica	23
5.3	Interpretazione Probabilistica	24
5.4	Portate Massime Istantanee	24
5.5	Conclusioni	25



1 OGGETTO

Oggetto del presente documento è lo studio idrologico del bacino del rio Badana chiuso in corrispondenza della diga del lago Badana (SND 34/C).

Scopo dello studio è fornire una valutazione delle portate di piena di bassa frequenza per diversi periodi di ritorno ($T=100, 200, 500$) e definire la piena di progetto per le opere idrauliche della diga ($T=1000$ anni).

Il più recente e completo studio idrologico del bacino del rio Badana è stato svolto da ITEC-Engineering nel 2006. Lo studio di ITEC ripercorre il precedente studio di ADFG del 1999, integrandolo con le osservazioni dell'Ufficio Idraulica del RID e le valutazioni derivanti dall'utilizzo del metodo di regionalizzazione proposto dal Prof. A. Brath nell'ambito del progetto VA.PI. del CNR GNDICI.

In risposta alla richiesta di approfondimenti espressa nel voto 254/07 del Consiglio Superiore LL. PP, nel 2008 il gestore Mediterranea delle Acque ha incaricato la stessa ITEC-Engineering di aggiornare lo studio idrologico includendo un'analisi dei livelli del serbatoio registrati nel corso del secolare esercizio dell'impianto.

Il presente documento si pone l'obiettivo di riassumere gli aspetti salienti dello studio idrologico del 2006 nonché delle successive integrazioni sviluppate nel 2008, fornendo dunque un quadro completo delle analisi disponibili nel bacino afferente la diga del lago Badana.

Per maggiori dettagli circa le metodologie adottate e i risultati conseguiti si rimanda ai documenti originali:

- ITEC-Engineering: “*Diga del Lago Badana – Portate di Piena e Verifiche Idrauliche degli Organi di Scarico*”, Genova, maggio 2006.
- ITEC-Engineering: “*Diga del Lago Badana – Interventi di Manutenzione Straordinaria – Relazione Integrativa sugli Aspetti Idrologici*”, Genova, settembre 2008.



2 CARATTERISTICHE DEL BACINO E DELLO SBARRAMENTO

2.1 Morfologia del Bacino

Il rio Badana è un affluente di sinistra del torrente Gorzente, nel quale confluisce in prossimità dell'invaso del lago Lavezze. Il bacino del lago Badana appartiene all'amministrazione del territorio del Comune di Bosio, in provincia di Alessandria.

Il torrente Gorzente è un sub-affluente del torrente Orba e scorre sul versante padano dell'Appennino Ligure, sull'asse Genova-Ovada. Il bacino si estende parte in territorio Ligure, parte in territorio Piemontese.

In corrispondenza della diga del lago Badana il bacino omonimo è delimitato a Ovest dalla parte montana dei bacini del Torrente Stura e del torrente Piota e in direzione Sud-Est ed Est sul crinale appenninico dalla parte montana del bacino del torrente Polcevera. L'area è inserita nel Parco Naturale delle Capanne di Marcarolo.

Il bacino ha una superficie di circa 4.8 km², la sua forma è assimilabile in prima approssimazione ad un rettangolo, con lato maggiore della lunghezza di 2.8 km circa e lato minore di 1.7 km circa.

Partendo dalla sezione di sbarramento e proseguendo in senso orario, lo spartiacque si sviluppa secondo una direttrice N-S sino al monte Moro (881 m s.l.m.) e NE-SO sino al monte Poggio (1081 m s.l.m.), al confine con la parte occidentale dei bacini del Lago Lavezze e del Lago Lungo. Di qui prosegue in direzione S lungo il confine con la parte montana del bacino del torrente Stura sino al Bric Siscioin (962 m s.l.m.) e lungo il confine con la parte montana del torrente Piota sino a Costa Lavezzara (1036 m s.l.m.). Piegando verso NE lo spartiacque prosegue sino al Bric degli Alberghi (935 m s.l.m.) per scendere poi rapidamente alla sezione di sbarramento.

Il reticolo drenante è di tipo dendritico o a forma d'albero, caratterizzato dalla presenza di numerose ramificazioni in più direzioni.

L'asta principale ha una lunghezza complessiva di 4.5 km, con andamento marcatamente meandriforme incassato in roccia con direzione prevalente O-E, la sua pendenza media è pari a circa il 7%.

In ragione della loro elevata acclività, i versanti risultano parzialmente denudati. All'interno del bacino non sono presenti centri abitati.



Le principali caratteristiche del bacino risultano in sintesi:

Superficie:	4.8	km ²
Lunghezza asta principale:	4.5	km
Quota minima:	667	m s.l.m.
Quota media:	835	m s.l.m.
Quota massima asta principale:	980	m s.l.m.
Quota massima bacino:	1081	m s.l.m.
Pendenza media asta principale:	6.9	%
Pendenza media dei versanti:	45	%

2.2 Diga di Badana

L'opera di sbarramento fu iniziata nel 1907 e terminata nel 1914.

La diga è del tipo a gravità, in muratura di pietrame, con malta di calce idraulica, di altezza pari a 56.25 m con coronamento a quota 717.25 m s.l.m., massimo invaso a quota 717.00 m s.l.m. e quota in asse dell'imbocco dello scarico di fondo pari a 668.50 m s.l.m..

Le portate transitanti attraverso gli scarichi della diga recapitano integralmente nel Lago Lavezze, circa 1 km a valle.

In Fig. 2/1 è riportata la corografia generale del bacino in scala 1:50 000.

3 PIOGGE DI MASSIMA INTENSITÀ E BREVE DURATA

3.1 Analisi Pluviometrica

L'analisi pluviometrica è stata condotta con riferimento ai contenuti dello studio idrologico di ADFG del 1999. E' stata effettuata preliminarmente un'indagine conoscitiva volta alla determinazione delle fonti e della disponibilità dei dati pluviometrici necessari alle successive elaborazioni.

In particolare sono stati individuati e analizzati i dati storici delle precipitazioni massime annuali con durate 1, 3, 6, 12, 24 ore e i dati storici delle precipitazioni di forte intensità e breve durata (inferiore all'ora) pubblicati dall'ex Servizio Idrografico Italiano, Sezione di Parma, relativi alla stazione di Lavezze (Lago), ubicata in prossimità dell'invaso del Lavezze, circa 1 km a valle dello sbarramento.

Il campione storico disponibile è relativo al periodo 1944-1988.

Per quanto riguarda le altezze di pioggia con durate inferiori all'ora va segnalato che queste ultime costituiscono un campione storico non omogeneo e meno esteso di quello relativo a durate da una a ventiquattro ore. Pertanto ai fini delle successive elaborazioni sono state considerate le sole altezze di pioggia con durata superiore ad 1 ora, il cui campione storico risulta più esteso e omogeneo.

Nella Tab. 3/1 sono riportati i dati storici della stazione di Lavezze.

I valori delle precipitazioni intense così raccolti hanno fornito la base dell'analisi probabilistica, finalizzata alla determinazione delle curve di probabilità pluviometrica per assegnati periodi di ritorno.

3.2 Interpretazione Probabilistica

Le elaborazioni sono state condotte regolarizzando le altezze di pioggia massime annuali per ciascuna durata utilizzando diverse leggi probabilistiche ed individuando quella che meglio si adatta a rappresentare il fenomeno.

In particolare, indicando con h (mm) la variabile altezza di pioggia, con $P(h)$ la sua probabilità cumulata, con $m(h)$ la media e con $s(h)$ lo scarto quadratico medio, sono state utilizzate:

1. Distribuzione asintotica del massimo valore de tipo I (*di Gumbel*):

$$P(h) = \exp[-\exp[-a \cdot (h - u)]]$$

dove:

$$a = \frac{1.283}{s(h)}$$

$$U = m(h) - \frac{0.577}{a}$$

2. Distribuzione log-normale a due parametri (*di Galton*):

$$P(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

dove:

$$u = a \cdot \ln(h) + b$$

$$a = \left[\ln \left(1 + \left(\frac{s(h)}{m(h)} \right)^2 \right) \right]^{-0.5}$$

$$b = \frac{1}{2a} - a \cdot \ln(m(h))$$

3. Distribuzione Gamma a due parametri (*di Pearson*):

$$p(h) = \frac{\alpha^\gamma}{\Gamma(\gamma)} \cdot \int_0^h e^{-\alpha h} \cdot h^{(\gamma-1)} \cdot dh$$

dove:

$$\alpha = \frac{m(h)}{s^2(h)}$$

$$\gamma = \left[\frac{m(h)}{s(h)} \right]^2$$

$$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty e^{-u} \cdot u^{\gamma-1} \cdot du$$



Per le serie di ciascuna durata e per ognuna delle tre distribuzioni di probabilità sono state dedotte le stime dei parametri caratteristici utilizzando il metodo dei momenti e dunque la stima di $m(h)$ e $s(h)$. Successivamente sono state ricavate le stime delle funzioni di probabilità cumulata $P(h)$.

Per il calcolo delle frequenze osservate è stata utilizzata la formula di Gringorten, che stima la "plotting position" con la seguente espressione:

$$F(i) = \frac{i - 0.44}{N + 0.12}$$

dove i è il numero d'ordine delle osservazioni e N il numero totale delle osservazioni.

Dovendo identificare la distribuzione teorica che fornisce globalmente la miglior regolarizzazione dei campioni sperimentali è stato impiegato il test di adattamento del chi-quadro (o di Pearson).

In particolare per ciascuna durata si è suddiviso il campo di esistenza della variabile altezza di precipitazione in un numero di intervalli tali da rispettare il principio dell'equiprobabilità, in modo che ogni classe individuata contenesse almeno cinque osservazioni sperimentali.

Dall'analisi dei risultati dei test, risulta che la distribuzione che meglio rappresenta la condizione di probabilità di superamento della variabile chi-quadro superiore a 0.05 (livello di significatività del test) è la Log-normale a due parametri.

La distribuzione Log-normale è stata infine adottata nelle successive elaborazioni.

3.3 Curve di Possibilità Pluviometrica

Verificata la bontà dell'adattamento della legge log-normale ai valori storici osservati sono state costruite le curve di probabilità pluviometrica per diversi periodi di ritorno, l'espressione è la seguente:

$$h = a \cdot t^n$$

dove h (mm) rappresenta l'altezza di pioggia per la durata t (ore) dell'evento, mentre a ed n sono parametri rappresentativi della stazione.

I valori di a e di n sono stati ricavati per diversi periodi di ritorno T (anni) mediante interpolazione ai minimi quadrati dei valori di h (mm) al variare della durata t (ore) per un prefissato valore di T . In particolare, per i periodi di ritorno 100, 200, 500 e 1000 anni sono stati ottenuti i seguenti valori di a e n caratteristici per la stazione pluviometrica di Lavezze Lago:



- T = 100 anni	a = 84.12	n = 0.444
- T = 200 anni	a = 92.51	n = 0.444
- T = 500 anni	a = 103.77	n = 0.444
- T = 1000 anni	a = 112.49	n = 0.445

In Fig. 3/1 sono diagrammate le curve di possibilità pluviometrica ottenute per la stazione di Lavezze Lago. I dati numerici sono riassunti nella Tab. 3/2.

Di seguito sono inoltre riportati per confronto i corrispondenti valori di a ed n per la stessa stazione indicati dal PAI (Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del fiume Po, adottato con delibera del Comitato Istituzionale n. 18 del 26 aprile 2001 e approvato con DPCM del 24 maggio 2001):

- T = 100 anni	a = 83.96	n = 0.454
- T = 200 anni	a = 91.81	n = 0.454
- T = 500 anni	a = 102.18	n = 0.454

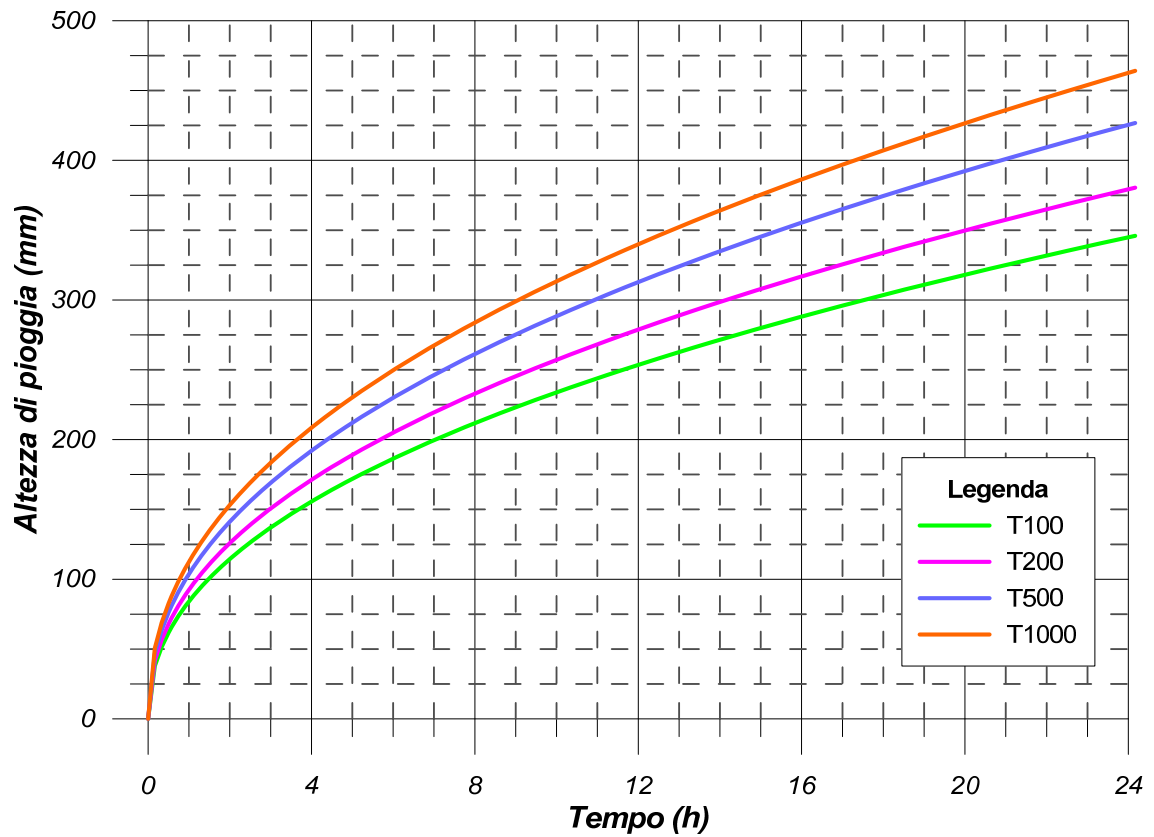


Fig. 3/1 - Relazione Idrologica. Curve di Possibilità Pluviometrica per differenti periodi di ritorno T : 100, 200, 500, 1000 anni, stazione di Lavezze Lago.



Tab. 3/1 - Relazione Idrologica. Altezze di pioggia massime annuali (mm) per differenti durate (stazione di Lavezze Lago).

ANNO	30 min	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
1944	18,0	40,0	54,6	60,0	73,0	94,4
1946	20,0	40,0	69,6	75,0	82,0	96,6
1947	13,0	22,0	35,0	57,0	84,0	122,0
1951		42,1	92,0	132,0	233,0	319,4
1952		26,6	47,0	85,6	122,0	133,4
1953	25,4	29,6	38,2	39,2	54,2	70,0
1954	17,0	27,4	55,0	81,6	121,0	207,0
1955		36,0	63,2	101,2	168,6	260,8
1956		32,0	62,4	74,6	101,8	131,8
1957	26,0	34,6	75,8	128,4	196,6	285,6
1958	20,0	52,4	76,0	83,0	95,0	108,0
1959	23,0	23,0	61,6	106,4	132,0	230,6
1960	16,6	31,6	57,8	83,6	99,2	105,6
1961		48,6	53,6	80,0	125,0	197,6
1962		22,8	52,6	66,6	88,0	116,0
1964	23,0	48,2	93,2	111,6	119,8	138,8
1965		39,0	58,2	71,2	111,0	149,2
1966		45,0	91,4	123,0	124,8	145,8
1967		35,0	43,2	62,0	69,0	104,0
1968		25,0	36,2	47,0	80,0	149,0
1969		25,0	37,8	39,2	65,2	73,8
1970	19,6	86,0	143,0	195,6	240,0	281,4
1971		23,4	37,0	61,0	78,0	142,0
1972	14,0	14,6	33,0	42,6	56,0	89,8
1973		25,0	40,0	71,0	100,0	133,0
1974	19,6	23,8	53,4	85,2	95,8	108,8
1975		32,6	68,0	76,8	89,4	125,2
1976	29,2	47,4	111,2	123,0	145,8	172,6
1978		27,2	39,4	63,0	86,0	135,8
1979	10,4	39,4	49,8	61,2	82,0	141,8
1980		66,8	102,6	112,4	154,8	227,6
1981	27,4	36,0	49,6	52,4	84,0	119,0
1982		49,6	58,0	69,6	101,0	160,0
1983	27,4	31,4	54,0	94,4	106,4	108,2
1984		60,0	101,0	128,4	139,0	179,6
1986	16,8	34,2	37,0	72,0	84,4	96,0
1987	24,4	44,4	100,0	120,8	124,2	152,6
1988	12,0	19,8	36,4	45,8	79,0	117,2



Tab. 3/2 - Relazione Idrologica. Curve di Possibilità Pluviometrica (mm), stazione di Lavezze Lago.

t min	T100 anni	T200 anni	T500 anni	T1000 anni
10	9,5	9,7	10,0	10,2
20	22,1	23,3	24,7	25,8
30	36,2	38,7	42,0	44,4
40	51,4	55,6	61,1	65,3
50	67,4	73,6	81,8	88,1
60	84,1	92,5	103,8	112,4
70	90,1	99,1	111,1	120,4
80	95,6	105,1	117,9	127,8
90	100,7	110,8	124,2	134,7
100	105,5	116,1	130,2	141,1
110	110,1	121,1	135,8	147,3
120	114,4	125,8	141,2	153,1
130	118,6	130,4	146,3	158,6
140	122,5	134,8	151,2	163,9
150	126,4	139,0	155,9	169,0
160	130,0	143,0	160,4	174,0
170	133,6	146,9	164,8	178,7
180	137,0	150,7	169,0	183,3
190	140,3	154,3	173,1	187,8
200	143,6	157,9	177,1	192,1
210	146,7	161,3	181,0	196,4
220	149,8	164,7	184,8	200,5
230	152,8	168,0	188,4	204,5
240	155,7	171,2	192,0	208,4
250	158,5	174,3	195,6	212,2
260	161,3	177,4	199,0	215,9
270	164,0	180,4	202,3	219,6
280	166,7	183,3	205,6	223,2
290	169,3	186,2	208,9	226,7
300	171,9	189,0	212,0	230,1
310	174,4	191,8	215,1	233,5
320	176,9	194,5	218,2	236,8
330	179,3	197,2	221,2	240,1
340	181,7	199,8	224,2	243,3
350	184,1	202,4	227,1	246,5
360	186,4	205,0	229,9	249,6
720	253,5	278,8	312,8	339,7
1440	344,9	379,3	425,5	462,5

4 PORTATE DI PIENA

4.1 Premessa

La presente analisi ha come finalità la stima delle portate al colmo e dei relativi idrogrammi di piena per periodi di ritorno 100, 200, 500 e 1000 anni. L'analisi ripercorre i principali risultati esposti nello studio idrologico di ADFG del 1999. Inoltre sono riportate le valutazioni dell'Ufficio Idraulica del RID e le considerazioni derivanti dall'utilizzo del metodo di regionalizzazione proposto dal Prof. A. Brath nell'ambito del progetto VA.PI. del CNR GNDCI.

4.2 Studio ADFG

Non essendo disponibile nel bacino del Lago Badana, nonché in generale nel più ampio bacino del torrente Gorzente, alcuna stazione idrometrica, la portata di piena è stata calcolata impiegando un modello seriale di trasformazione afflussi-deflussi.

Il modello è costituito da una prima parte di trasformazione della pioggia di progetto in volume specifico di ruscellamento, basato sull'interpretazione Hortoniana (non lineare) del processo di assorbimento, e da una seconda parte caratterizzata da una interpretazione lineare della formazione della piena attraverso la rete idrografica basato sul modello di Nash.

I passi principali della metodologia di calcolo utilizzata si possono così sintetizzare:

- determinazione dell'altezza di pioggia di riferimento, derivata dalle curve di possibilità pluviometrica;
- stima del tempo di corrivazione del bacino chiuso alla sezione di sbarramento;
- identificazione degli ietogrammi di progetto, definizione dell'eventuale ragguglio all'area e valutazione della pioggia efficace;
- definizione dell'idrogramma unitario istantaneo caratteristico della risposta del bacino all'impulso di pioggia;
- calcolo dell'idrogramma di piena per assegnato periodo di ritorno alla sezione di interesse.

Ai fini del calcolo sono state utilizzate le curve di probabilità pluviometrica della stazione di Lavezze Lago (si veda il capitolo precedente, Fig. 3/1 e Tab. 3/1). La stazione di Lavezze, per la sua ubicazione ed il consistente numero di dati storici disponibili, consente una precisa caratterizzazione degli eventi di pioggia sul bacino in esame.

Di seguito si riporta una descrizione sintetica della metodologia e dei parametri utilizzati nel calcolo.

4.2.1 *Tempo di Corrivazione*

Il tempo di corrivazione del bacino t_c (ore) è stato stimato attraverso le seguenti formulazioni:

Giandotti:

$$t_c = \frac{3\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m - H_0}}$$

dove A (km²) è l'area del bacino sotteso, L (km) la lunghezza del percorso idraulicamente più lungo, H_m e H_0 (m s.l.m.) sono rispettivamente la quota media del bacino e la quota alla sezione di chiusura.

Kirpich:

$$t_c = 0.066 \cdot L^{0.77} \cdot \left[\frac{1000 \cdot L}{H_{max} - H_0} \right]^{0.385}$$

dove L ed H_0 hanno lo stesso significato di parametri contenuti nella formula di Giandotti ed H_{max} è la quota massima del bacino.

Viparelli:

$$t_c = 0.277 \cdot \frac{L}{v}$$

dove v in m/s rappresenta la velocità media di percorrenza dell'asta, assunta in questo caso pari a 1.5 m/s.

Merlo:

$$t_c = 3.96 \cdot \frac{L}{\sqrt{i_a}} \cdot \left[\frac{A}{L^2} \cdot \left(\frac{i_a}{i_v} \right)^{0.5} \right]^{0.72}$$

Per il bacino di Badana chiuso alla sezione di sbarramento è stato stimato un tempo di corrivazione pari a 0.9 ore, ottenuto dalla media dei valori calcolati con le formule precedenti.

4.2.2 *Ietogramma di Progetto e Precipitazione Efficace*

Definite le curve di probabilità pluviometrica ed il tempo di corrivazione, è stato selezionato lo ietogramma di progetto rappresentativo dell'evento di pioggia.

Nel caso in esame si è adottato uno ietogramma di tipo rettangolare che simula una distribuzione temporale dell'intensità di pioggia costante per tutta la durata prefissata. In particolare, sono stati costruiti ietogrammi con durate variabili prossime al tempo di corrivazione, allo scopo di



simulare il comportamento del bacino durante diversi eventi meteo-climatici ed individuare quindi la portata massima associabile ad un determinato periodo di ritorno.

Considerata l'importanza e le caratteristiche peculiari dell'opera idraulica in questione, il calcolo è stato eseguito nell'ipotesi cautelativa di distribuzione spaziale uniforme della precipitazione, ovvero senza alcun ragguaglio all'area.

Successivamente si è proceduto, per ogni ietogramma, al calcolo della precipitazione efficace al fine dello scorrimento superficiale, ottenuta depurando gli ietogrammi dalle perdite per infiltrazione e per immagazzinamento.

Si è adottato il metodo di depurazione della pioggia noto come *Curve Number*, proposto dal Soil Conservation Service, basato sul modello Hortoniano di descrizione del fenomeno dell'assorbimento.

Come noto, tale procedura consente di calcolare l'altezza di pioggia efficace sulla base dell'espressione:

$$h_n = \frac{(h_r - I_a)^2}{h_r - I_a + S}$$

dove h_n (mm) è l'altezza di pioggia efficace che produce scorrimento superficiale, h_r (mm) l'altezza di precipitazione, S (mm) il potenziale di assorbimento del terreno, cioè il volume immagazzinabile a saturazione nello stesso, mentre I_a (mm) rappresenta la quota parte della precipitazione che si infila prima che il ruscellamento abbia inizio.

La determinazione di S viene effettuata sulla base della relazione:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right)$$

La stima del parametro CN dipende dalla natura idrologica del suolo in relazione alla permeabilità e all'uso del territorio. Sulla base delle caratteristiche del bacino in esame, e in misura cautelativa, è stato scelto un valore $CN = 90$. Tale valore, certamente elevato, è raccomandabile nel caso di suoli relativamente sottili con orizzonti pressoché impermeabili in vicinanza della superficie e condizioni antecedenti l'evento molto umide.

Quale valore di I_a , al posto della relazione suggerita dal Soil Conservation Service ($I_a=0.2S$), si è adottato un valore pari a 3 mm, come consigliato da diversi autori nelle applicazioni pratiche al fine di non sottostimare eccessivamente il volume di piena.

4.2.3 Idrogramma Unitario

L'idrogramma unitario rappresenta la risposta del bacino ad una sollecitazione di pioggia efficace. Nella presente analisi è stato adottato il modello di Nash, che simula il comportamento del bacino con una cascata di n serbatoi posti in serie. L'IUH di Nash, ovvero idrogramma unitario istantaneo, è sintetizzato della seguente espressione:

$$I(t) = \frac{I}{K \cdot (n-1)!} \cdot \left(\frac{t}{K}\right)^{n-1} \cdot e^{-\frac{t}{K}}$$

dove k è la costante caratteristica dei serbatoi e n il numero degli stessi.

I parametri n e k sono stati dedotti in funzione dei parametri geomorfologici del bacino R_B (rapporto di biforcazione), R_L (rapporto di lunghezza) e R_A (rapporto di area), secondo la metodologia proposta da Rosso mediante le formule:

$$n = 3.29 \cdot \left(\frac{R_B}{R_A}\right)^{0.78} \cdot R_L^{0.07}$$

$$k = 0.7 \cdot \left(\frac{R_A}{R_B \cdot R_L}\right)^{0.48} \cdot \frac{L_\Omega}{v}$$

dove L_Ω (m) è la lunghezza del canale di ordine massimo del bacino e v (m/s) rappresenta la velocità media della corrente sul bacino.

In mancanza di osservazioni sperimentali il valore di v è stato assunto pari a 1.4 m/s, calcolato dividendo la lunghezza dell'asta principale per il tempo di corrivazione del bacino.

I valori dei parametri geomorfologici del bacino risultano rispettivamente $R_B = 3.84$, $R_L = 2.21$ e $R_A = 4.67$.

Posto $L_\Omega = 1500$ m (lunghezza del canale di ordine 4) e $v = 1.4$ m/s risulta pertanto:

- $n = 2.99$;
- $k = 567$ sec (9.5 min).

Una volta disponibili gli ietogrammi di progetto e l'idrogramma unitario, sono stati calcolati gli idrogrammi di piena per ogni durata di pioggia considerata attraverso l'integrale di convoluzione:



$$Q(t) = S \cdot \int_0^t I(t-u) \cdot p(u) \cdot du$$

il quale, noti lo ietogramma di riferimento e l'idrogramma unitario istantaneo, permette di legare la portata uscente $Q(t)$ all'intensità di pioggia efficace $p(t)$.

Il calcolo è stato effettuato per i periodi di ritorno 100, 200, 500 anni e 1000 anni. La durata di pioggia che genera il massimo colmo di piena è all'incirca di 1 ora, ovvero pressoché uguale al tempo di corrivazione del bacino.

I valori delle massime portate al colmo per differenti periodi di ritorno sono così sintetizzati:

- T = 100 anni	Q= 89 m ³ /s
- T = 200 anni	Q= 100 m ³ /s
- T = 500 anni	Q= 114 m ³ /s
- T = 1000 anni	Q= 125 m ³ /s

4.3 Metodo di Regionalizzazione

Di seguito si riporta una stima delle portate di piena per assegnato periodo di ritorno risultante dall'applicazione del modello di regionalizzazione proposto dal Prof. Armando Brath, ordinario di Costruzioni Idrauliche presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Bologna nell'ambito del Progetto speciale Valutazione delle Piene (VAPI) del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del CNR.

Tale metodologia si basa sulla definizione di regioni idrologicamente omogenee all'interno delle quali si ipotizza che la distribuzione di probabilità delle portate al colmo Q sia invariante a meno di un fattore di scala (portata indice), di solito assunto pari alla media $\mu(Q)$ della variabile. Tale ipotesi implica l'invarianza dei momenti della variabile $q=Q/\mu(Q)$ e quindi, in particolare, del coefficiente di variazione $CV(Q)$.

Quale modello probabilistico viene utilizzata la distribuzione TCEV (Two Components Extreme Values).

La stima della portata per assegnato periodo di ritorno avviene utilizzando la seguente relazione:

$$Q_T = K_T \cdot \mu(Q)$$

valida per singole regioni omogenee, dove $\mu(Q)$ rappresenta la "portata indice" e K_T un fattore di crescita funzione del periodo di ritorno T .



L'area oggetto di studio si colloca appena al di là dello spartiacque tirrenico dell'Appennino Ligure, in base alla zonizzazione adottata nel progetto VAPI, essa appartiene al compartimento SIMN di Parma. Vista la notevole estensione della zona di pertinenza, quest'ultima è stata suddivisa in ulteriori quattro sottozone omogenee. I Laghi del Gorzente sono ubicati appena all'interno della Regione 2, nella zona confinante a levante con la Regione 3 ed a Sud con la Liguria Tirrenica del SIMN di Genova.

Nella tabella seguente sono riportati i valori della curva di crescita K_T per i periodi di ritorno 100, 200, 500 e 1000 anni relativi alle tre regioni omogenee individuate:

Compartimento	Zona	T = 100 anni	T = 200 anni	T = 500 anni	T = 1000 anni
		KT 100	KT 200	KT 500	KT 1000
Genova	Unica	4.60	5.43	6.52	7.35
Parma	Regione 2	5.29	6.36	7.75	8.81
Parma	Regione 3	4.25	4.90	5.75	6.41

Per la valutazione della portata indice in assenza di misure dirette, Brath propone una relazione che lega quest'ultima alla estensione planimetrica del bacino ed ad un indice pluviometrico:

$$\mu(Q) = \alpha \cdot S^\beta \cdot m_i^\gamma$$

dove S rappresenta la superficie del bacino [km²], m_i l'intensità media puntuale degli eventi medi di pioggia [mm/h], α , β e γ sono i parametri regressivi validi per le singole regioni omogenee.

Nelle tabella seguente sono riportati i valori dei parametri della relazione multiregressiva calcolati da Brath per le tre zone d'interesse.

Zona	α	B	γ
Genova	1.60	0.74	0.42
Parma – Regione 2	0.23	0.82	0.79
Parma – Regione 3	0.55	0.86	0.71

Il valore dell'indice pluviometrico m_i (mm/h) è mappato per tutto il bacino occidentale del Po e delle Liguria Tirrenica; nell'area in esame è stato definito un valore di 16 mm/h.

In base alle precedenti assunzioni risultano infine i seguenti valori delle portate di piena per assegnati periodi di ritorno, calcolati con riferimento alle tre zone idrologicamente omogenee sopra individuate:

Compartimento	Zona	T = 100 anni	T = 200 anni	T = 500 anni	T = 1000 anni
		Q ₁₀₀ [m ³ /s]	Q ₂₀₀ [m ³ /s]	Q ₅₀₀ [m ³ /s]	Q ₁₀₀₀ [m ³ /s]
Genova	Unica	75	89	107	120
Parma	Regione 2	39	47	58	66
Parma	Regione 3	64	74	87	97

I risultati mostrano che i valori di portata calcolati per il compartimento di Genova–Liguria Tirrenica siano mediamente superiori a quelli ottenuti per le altre zone. Poiché il bacino del torrente Gorzente ha caratteristiche tipicamente appenniniche, prossimo al versante tirrenico, si ritiene che tali valori risultino i più adatti a descriverne il comportamento idrologico.

4.4 Valutazioni del RID

L'Ufficio Idraulica del RID, con nota n. SDI/75/cis del 28/03/02 ha determinato in 160 m³/s il valore della portata di progetto degli organi di scarico superficiali della diga del lago Badana.

4.5 Portate di Riferimento

Ai fini delle successive elaborazioni è stato assunta quale portata al colmo di piena di progetto il valore di 160 m³/s indicato dall'Ufficio Idraulica del RID. Lo stesso ufficio ministeriale ha ritenuto congrua tale definizione nell'ambito dell'iter di approvazione del progetto per la sistemazione definitiva dello scarico di superficie (approvato dallo stesso RID con nota prot. SDI/552/UCCE del 11/10/2002).

In base alle elaborazioni descritte ai paragrafi precedenti, alla portata al colmo di 160 m³/s è stato associato un periodo di ritorno di 1000 anni. Con riferimento a tale valore sono state quindi ricavate le portate per i periodi di ritorno 100, 200 e 500 anni, riscalandosi i risultati ottenuti nello studio ADFG.

Le portate al colmo di piena risultano dunque così definite::

- T = 100 anni Q= 114 m³/s;
- T = 200 anni Q= 128 m³/s;
- T = 500 anni Q= 146 m³/s;
- T = 1000 anni Q= 160 m³/s.

In Fig. 4/1 sono illustrati i relativi idrogrammi di piena ricavati impiegando la metodologia descritta dello studio ADFG.

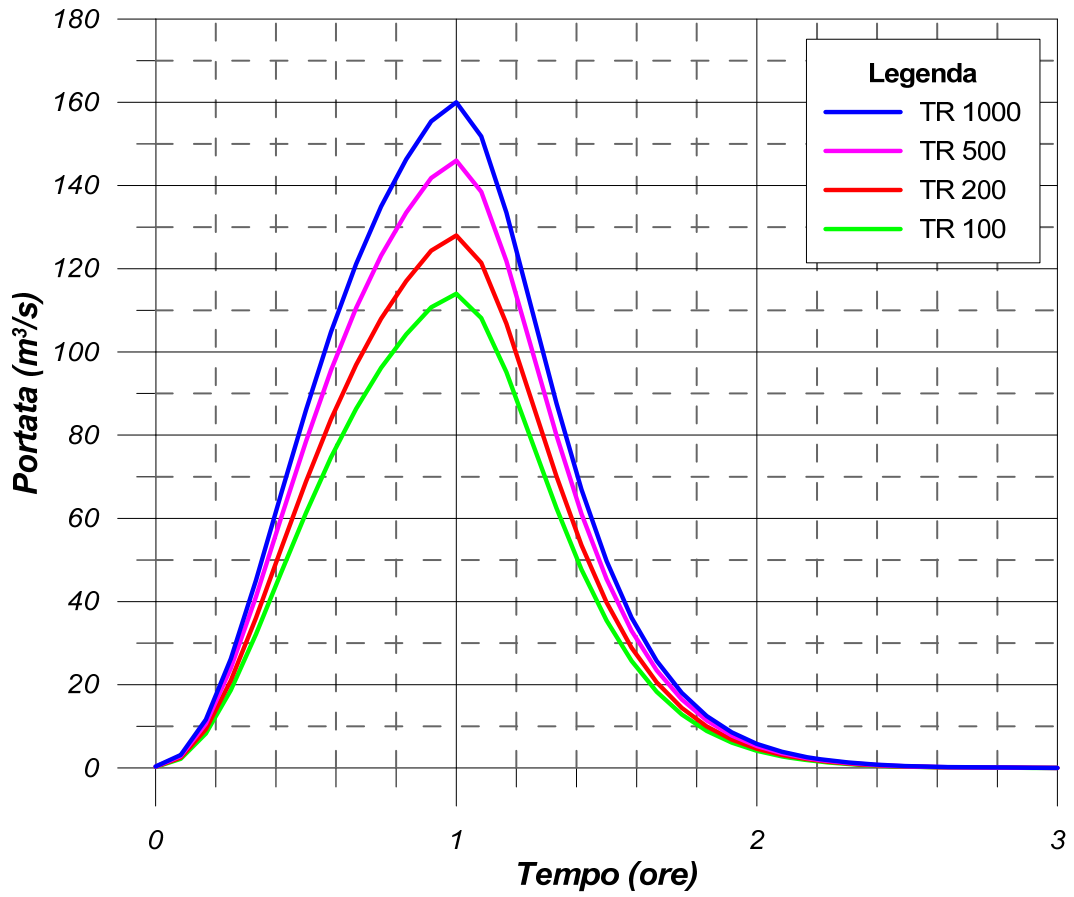


Fig. 4/1 - Relazione Idrologica. Idrogrammi di piena per periodi di ritorno fissati (100, 200, 500, 1000 anni).



5 ANALISI DEI LIVELLI DEL SERBATOIO

5.1 Introduzione

In risposta alla richiesta di approfondimenti espressa nel voto 254/07 del Consiglio Superiore LL. PP. è stata condotta una specifica analisi volta ad aggiornare ed integrare lo studio idrologico del bacino del lago Badana.

Lo studio si basa sull'analisi delle portate medie giornaliere affluenti allo sbarramento dedotte dal registro storico dei volumi giornalieri del serbatoio. Il registro presenta una serie particolarmente lunga di misure, che includono il 2006, anno in cui nel mese di febbraio si è verificato il dissesto della diga, e il 1935, anno in cui nel mese di agosto nel bacino di Ortiglieto si è verificato un evento di pioggia eccezionale.

Sulla base delle portate medie giornaliere è stata dedotta una stima delle portate massime istantanee mediante l'impiego di relazioni empiriche disponibili in letteratura. I massimi annuali delle portate istantanee sono stati interpretati con opportune leggi probabilistiche. I risultati hanno infine permesso di definire le portate al colmo di piena per differenti periodi di ritorno.

L'analisi a messo in evidenza la coerenza dei risultati con quelli ottenuti per mezzo di relazioni indirette e simulazioni afflusso-deflussi, in sostanza confermando la consistenza dei precedenti studi.

5.2 Serie Storica

I dati disponibili sono rappresentati dai volumi giornalieri complessivamente invasati nei tre laghi Lavezze, Lungo e Badana, ubicati nella parte alta del bacino del torrente Gorzente e interconnessi secondo il seguente schema: il lago Badana e il lago Lungo sono disposti in parallelo su due affluenti che confluiscono nel sottostante invaso del lago Lavezze. La serie storica dei dati è disponibile a partire dal 1910 fino al 2007.

Dall'invaso del lago Lavezze veniva ed è tuttora derivato un volume giornaliero di circa 55 000 m³ (ridotto nel periodo successivo alla messa fuori esercizio del lago Badana) da inviare alla centrale di Isoverde (nel contiguo bacino del torrente Verde) per uso idroelettrico e idropotabile.

Al fine di eliminare le incertezze sui valori delle portate derivate per uso idroelettrico e sul possibile utilizzo di canali di gronda, ad oggi non più in uso, per la captazione di portate maggiori di quelle relative ai bacini naturali sottesi dagli invasi, si è circoscritta l'analisi al periodo dal 1934 al 2007, per un totale di 74 anni.

I valori di portata media giornaliera affluita sono stati ricavati a partire dalle misure dei volumi invasati mediante l'equazione di continuità nella forma:

$$Q_e = \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_d$$

dove Q_e è la portata media affluita (m^3/s), ΔV la differenza tra i volumi invasati (m^3) nel periodo Δt , assunto pari a 1 giorno, e Q_d la portata media di derivazione (m^3/s).

Stante l'origine dei dati, la portata risultante è quella relativa alla somma dei tre invasi e quindi alla portata complessivamente affluita al lago Lavezze, che sottende un bacino di 17.7 km^2 , a fronte dei 4.8 corrispondenti al bacino del lago Badana. La portata affluita alla diga del lago Badana è stata quindi ottenuta riscalandosi tali valori in modo proporzionale alle rispettive superfici.

5.3 Interpretazione Probabilistica

Dalla serie storica delle portate medie giornaliere sono stati estratti i massimi annuali nel periodo 1934 – 2007 (vedi Tab. 5/1). Tali valori sono stati interpretati con un'analisi di frequenza sulla base delle più comuni leggi probabilistiche, individuando quella che meglio si adatta a rappresentare il campione di dati storici.

L'analisi statistica ha considerato la distribuzione del massimo valore EV1, anche nota come Gumbel, la distribuzione Log-normale a due parametri di Galton e la distribuzione Gamma a due parametri di Pearson. L'espressione di tali leggi probabilistiche è descritta nel precedente Capitolo 3.2, i parametri caratterizzanti sono stati stimati attraverso il metodo dei momenti.

Per la definizione della distribuzione teorica che fornisce globalmente la miglior regolarizzazione dei campioni sperimentali è stato impiegato il test di adattamento del chi-quadro (o di Pearson). La distribuzione che meglio rappresenta la condizione di probabilità di superamento della variabile chi-quadro superiore a 0.05 (livello di significatività del test) è la Log-normale a due parametri.

La distribuzione Log-normale è stata adottata nelle successive elaborazioni.

5.4 Portate Massime Istantanee

Le portate massime istantanee, rappresentative dei colmi di piena, sono state stimate mediante l'applicazione di un coefficiente R proposto da P. Canuti e U. Moisello (si veda la pubblicazione "*Indagine regionale sulle portate di massima piena in Liguria e Toscana*"). Tale coefficiente, valido per bacini liguri, è funzione dell'area A (km^2) e della quota media Z_m (m s.l.m.) del bacino nella forma:



$$R = 11.72 A^{-0.1} Z_m^{-0.112}$$

Per il bacino del lago Badana chiuso alla sezione di sbarramento, dati $A = 4.8 \text{ km}^2$ e $Z_m = 835$ ne risulta $R = 4.7$.

L'interpretazione probabilistica dei massimi istantanei ha infine permesso di definire la portata al colmo di piena per differenti periodi di ritorno:

- | | |
|-----------------|---------------------------|
| - T = 100 anni | Q= 83 m ³ /s; |
| - T = 200 anni | Q= 92 m ³ /s; |
| - T = 500 anni | Q= 106 m ³ /s; |
| - T = 1000 anni | Q= 116 m ³ /s. |

5.5 Conclusioni

I risultati ottenuti nell'elaborazione delle misure storiche del serbatoio del lago Badana dimostrano un'ottima congruenza con quelli ricavati negli studi precedenti per mezzo di metodi di stima indiretti (si veda Cap. 4.2, studio ADFG).

La portata al colmo di piena associata all'evento con tempo di ritorno 1000 anni, per esempio, differisce di solo il 3%, ovvero presenza in sostanza un significativa corrispondenza. E' ragionevole dunque affermare che la stima delle massime portate di piena sia stata elaborata con le miglior interpretazioni disponibili e applicabili al caso in esame.

Si fa tuttavia osservare che la portata di progetto raccomandata dall'Ufficio Idraulica del RID, pari a 160 m³/s, rappresenta in ogni caso il valore più cautelativo.



Tab. 5/1 – Relazione Idrologica. Valori massimi annuali delle portate medie giornaliere.

ANNO	Portata Gorzente m³/s	Portata Badana m³/s	ANNO	Portata Gorzente m³/s	Portata Badana m³/s
1934	44,3	12,0	1971	12,3	3,3
1935	23,6	6,4	1972	18,5	5,0
1936	18,9	5,1	1973	31,1	8,4
1937	24,7	6,7	1974	15,7	4,2
1938	21,1	5,7	1975	33,1	9,0
1939	46,6	12,6	1976	40,0	10,8
1940	18,0	4,9	1977	26,6	7,2
1941	16,6	4,5	1978	7,6	2,1
1942	27,3	7,4	1979	27,9	7,6
1943	13,0	3,5	1980	38,1	10,3
1944	15,1	4,1	1981	25,5	6,9
1945	31,3	8,5	1982	19,1	5,2
1946	8,4	2,3	1983	16,9	4,6
1947	18,6	5,0	1984	27,3	7,4
1948	26,8	7,3	1985	16,2	4,4
1949	41,0	11,1	1986	14,6	4,0
1950	28,9	7,8	1987	23,8	6,5
1951	36,7	9,9	1988	15,2	4,1
1952	26,3	7,1	1989	25,7	7,0
1953	11,9	3,2	1990	14,8	4,0
1954	46,5	12,6	1991	32,4	8,8
1955	19,8	5,4	1992	27,5	7,5
1956	39,1	10,6	1993	70,9	19,2
1957	42,2	11,4	1994	16,6	4,5
1958	31,8	8,6	1995	25,0	6,8
1959	53,0	14,4	1996	26,6	7,2
1960	22,9	6,2	1997	43,7	11,8
1961	26,3	7,1	1998	14,0	3,8
1962	11,2	3,0	1999	17,2	4,7
1963	26,4	7,1	2000	14,8	4,0
1964	10,4	2,8	2001	14,4	3,9
1965	40,9	11,1	2002	16,1	4,4
1966	24,4	6,6	2003	28,0	7,6
1967	16,3	4,4	2004	13,6	3,7
1968	20,1	5,4	2005	29,4	8,0
1969	9,7	2,6	2006	16,7	4,5
1970	41,9	11,4	2007	12,0	3,2