DELIBERAZIONE DELLA GIUNTA REGIONALE 28 marzo 2022, n. 423

Piano di laminazione della diga del Cillarese per la riduzione del rischio idraulico a valle della diga ai sensi della direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 27 febbraio 2004 e della direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 8 luglio 2014. Approvazione ed adozione.

Il Presidente, con delega alla Protezione Civile, sulla base dell'istruttoria espletata dai funzionari ing. Teresa Mungari e geol. Fabrizio Panariello, dalla PO Responsabile del Centro Funzionale Decentrato, ing. Tiziana Bisantino, dalla PO Gestione reti di monitoraggio, dott. Franco Intini, così come confermata dal Dirigente ad interim della Sezione Protezione Civile, dott. Nicola Lopane, e dal Direttore del Dipartimento Personale e Organizzazione, dott. Ciro Giuseppe Imperio, riferisce quanto segue.

Premesso che:

- il corso d'acqua Cillarese si estende nel territorio della provincia di Brindisi, raccoglie i deflussi di un bacino idrografico esteso per circa 152 km^2 e sfocia nel seno di ponente del porto di Brindisi. Le sue acque sono raccolte da un invaso artificiale, con volume utile di regolazione pari a 4,2 Mm^3, e utilizzate dal Polo Industriale di Brindisi. L'invaso è caratterizzato da due scarichi, uno di fondo e uno di superficie a soglia fissa. L'alveo a valle dell'invaso è sistemato con un canale rivestito in calcestruzzo, a sezione trapezia, e le sue aree esondabili interessano elementi esposti ad elevato danno potenziale: il parco pubblico del Cillarese, aree portuali ed insediamenti economico-produttivi, aree sportive, rete stradale e spazi accessori, strutture strategiche come la zona militare portuale;
- la direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 27 febbraio 2004 "*Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale, statale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile*" prevede che le Regioni, con il concorso del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile, debbano assolvere al governo delle piene tra le cui attività è compresa la **regolazione dei deflussi dagli invasi artificiali**. Tale attività consiste nella massima laminazione degli eventi di piena, attesi o in atto, e nello sversamento in alveo di portate non pericolose per i tratti del corso d'acqua a valle. Lo strumento tecnico-operativo per la regolazione dei deflussi a valle degli invasi previsto dalla suddetta direttiva è il **Piano di Laminazione**;
- il Governo delle piene viene espletato con il concorso dei Centri Funzionali, delle Autorità di Bacino, del Registro italiano dighe, degli Uffici territoriali di Governo, delle Autorità responsabili dei piani d'emergenza provinciali, dei soggetti responsabili del presidio territoriale ove costituiti;
- la più recente direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 8 luglio 2014 "*Indirizzi operativi inerenti l'attività di protezione civile nell'ambito dei bacini in cui siano presenti grandi dighe*" stabilisce le condizioni di attivazione delle **fasi di allerta** per la gestione del rischio idraulico a valle delle dighe e le conseguenti azioni in caso di eventi, previsti o in atto, aventi rilievo per l'allertamento e l'attivazione del sistema di Protezione civile. La definizione di tali fasi di allerta è stabilita nel piano di laminazione stesso ed è propedeutica alla redazione/aggiornamento del documento di Protezione Civile e al conseguente piano di emergenza diga necessari a contrastare le situazioni di pericolo connesse con la propagazione di un'onda di piena originata da manovre degli organi di scarico ovvero dall'ipotetico collasso dello sbarramento;
- un'adeguata attività di regolazione dei deflussi finalizzata a contrastare gli effetti delle piene in un bacino idrografico nel quale sono presenti uno o più invasi artificiali, ancorché destinati alla produzione di energia e/o all'approvvigionamento primario di risorsa idrica, deve essere compatibile anche con gli interessi dei gestori degli invasi.

Considerato che:

- per le finalità di regolazione dei deflussi dalla diga Cillarese la Sezione Protezione Civile della Regione Puglia ha realizzato, nell'ambito del POR Puglia 2014-2020 – Asse V – Azione 5.1 - "*Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe*", gli studi propedeutici e la redazione del documento "**Piano di Laminazione della Diga del Cillarese**" (di seguito Piano) contenenti:

- la costruzione e calibrazione di un modello previsionale idrologico-idraulico;
- l'analisi statistica degli apporti all'invaso;
- la simulazione di scenari di gestione dell'invaso;
- la modellazione bidimensionale e l'analisi di rischio a valle dell'invaso;
- l'individuazione delle soglie di criticità e delle fasi di allerta per rischio idraulico lungo l'asta a valle dell'invaso;

- con nota AOO_026-9953 del 13 settembre 2018, la Sezione Protezione Civile ha convocato la prima riunione per la condivisione del documento con i rappresentanti degli Enti: Dipartimento della Protezione Civile nazionale, Ministero delle infrastrutture e dei trasporti - Ufficio tecnico per le dighe di Napoli, Autorità di Distretto dell'appennino meridionale, Regione Puglia - Sezione Lavori Pubblici in qualità di Autorità idraulica, Prefettura-UTG di Brindisi, Gestore della diga Consorzio ASI, Comune di Brindisi;
- il Piano ha evidenziato che la diga del Cillarese ha una capacità di laminazione dei colmi di piena molto limitata, dovuta alla conformazione della soglia fissa dello scarico di superficie e alla scarsa capacità dello scarico di fondo, e l'unico effetto possibile è lo sfasamento temporale tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita dall'invaso che consente di aumentare i tempi disponibili per l'allertamento e per l'evacuazione delle aree a rischio;
- nella tabella a seguire si rappresentano i principali risultati delle simulazioni al variare del livello iniziale dell'invaso, con riferimento all'evento con tempo di ritorno Tr = 30 anni e nell'ipotesi di scarico di fondo aperto:

Livello iniziale dell'invaso [m s.l.m.]	Portata del picco di piena a valle dell'invaso [m^3/s]	Ritardo del picco [h]	Ritardo del raggiungimento della portata soglia rossa (50 m^3/s) [h]
16	98	3	5
14	92	4	8
12	85	7	11
10	79	9	12
8	72	10	14
6	69	11	17

- il Piano, considerati i livelli iniziali di invaso più adeguati a garantire condizioni di sicurezza a valle, sintetizza in 4 possibili scenari la gestione del livello di invaso durante l'anno. Tali scenari, a partire dai volumi di piena attesi, garantiscono che il volume disponibile in diga sia sufficiente ad accumulare gli afflussi previsti;
- sulla base dei risultati osservati è stata proposta quale quota di limitazione di invaso quella pari a 14 m s.l.m. (ritardo del picco di piena pari a 8 ore) con la regola di gestione del livello di invaso riportata nello Scenario 1 e regolarizzata in 4 periodi dell'anno:

Periodo	Quota di invaso [m s.l.m.]
1 Ottobre - 31 Marzo	14,00
1 Aprile - 14 Aprile	15,00
15 Aprile - 30 aprile	15,50
1 Maggio - 30 Settembre	16,00

- tale scelta è in grado di ritardare il picco di portata a valle di 8 ore, incrementando i tempi utili per le attività di Protezione Civile, e, allo stesso tempo, è compatibile con il volume di utilizzo massimo dell'invaso da

parte del Gestore, pari a circa 3 Mm^3, pur comportando una riduzione della capacità utile di circa 1,4 Mm^3;

- la scelta del tempo di ritardo del picco di piena pari ad 8 ore è stata subordinata all'adozione dell'aggiornamento del piano di Protezione Civile comunale del Comune di Brindisi al rischio idraulico nelle aree a valle dell'invaso, nel quale sono state individuate le modalità e la tempistica necessaria per l'evacuazione delle suddette aree in linea con i tempi di ritardo dell'onda di piena previsti;
- con nota AOO_026-11010 del 12 ottobre 2021 è stata convocata la seconda riunione per la definitiva approvazione del piano di laminazione della diga Cillarese, durante la quale è stato ribadito che il ritardo di 8 ore è stato scelto con lo scopo di avere un certo coefficiente di sicurezza dal momento che l'onda di piena utilizzata nelle analisi non è quella più gravosa e che, nelle analisi degli scenari di gestione, i volumi dell'invaso sono stati quantificati al fine di non rendere la misura troppo restrittiva per le finalità di gestione della risorsa idrica. Si è tenuto conto, altresì, della necessità di avere un buffer di sicurezza alla luce del fatto che il tempo di evacuazione stimato nel piano di Protezione Civile del Comune di Brindisi è legato all'ipotesi che si verifichi quella sola tipologia di rischio e che per la stessa possano essere impiegate in campo tutte le componenti di cui si dispone:
- alla luce delle considerazioni effettuate e sopra menzionate, è stato deciso di:
    - approvare il **Piano di Laminazione della Diga Cillarese**, allegato al presente provvedimento (allegato A), per farne parte integrante e sostanziale;
    - adottare, sulla base dell'allegato documento tecnico-operativo, quale regola di gestione dell'invaso **lo Scenario 1** del Piano di Laminazione (Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni) con la seguente regolarizzazione:

Periodo	Quota di invaso [m s.l.m.]
1 Ottobre - 31 Marzo	14,00
1 Aprile - 14 Aprile	15,00
15 Aprile - 30 aprile	15,50
1 Maggio - 30 Settembre	16,00

    - testare lo Scenario 1 per un durata temporale pari a 1 (uno) anno, allo scadere del quale, sulla base delle informazioni che saranno acquisite, sarà effettuato un aggiornamento del piano;

- I contenuti del piano sono coerenti con quanto previsto nel documento di Protezione Civile della diga del Cillarese approvato con decreto prefettizio 3 ottobre 2017, n. 1341.

Preso atto che:
- la Prefettura - U.T.G. di Brindisi ha approvato il documento di protezione civile diga di Cillarese con decreto prefettizio 3 ottobre 2017, n. 1341;
- il Comune di Brindisi, con deliberazione del Consiglio comunale 9 luglio 2020, n. 7, ha aggiornato con il rischio diga il piano di emergenza comunale di Protezione Civile al fine di individuare le procedure e le tempistiche necessarie per l'evacuazione delle aree a valle dell'invaso in coerenza con le regole di gestione adottate nel piano di laminazione della diga del Cillarese.

Ravvisata la coerenza tra il documento Piano di Laminazione della Diga Cillarese e la normativa vigente;

Ritenuto quindi necessario, sulla scorta di quanto sopra riferito, provvedere a:
- prendere atto degli studi propedeutici e della redazione del Piano di Laminazione della Diga del Cillarese nell'ambito del POR Puglia 2014-2020 – Asse V – Azione 5.1 – "*Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe*";

- approvare il "**Piano di Laminazione della Diga del Cillarese**" quale strumento tecnico-operativo per la regolazione dei deflussi della diga del Cillarese nel corso di eventi di piena, allegato alla presente deliberazione di cui costituisce parte integrante e sostanziale (allegato A);
- adottare, sulla base dell'allegato documento tecnico-operativo, quale regola di gestione dell'invaso lo **Scenario 1** del Piano di Laminazione (Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni) con la seguente regolarizzazione:

Periodo	Quota di invaso [m s.l.m.]
1 Ottobre - 31 Marzo	14,00
1 Aprile - 14 Aprile	15,00
15 Aprile - 30 aprile	15,50
1 Maggio - 30 Settembre	16,00

- testare lo Scenario 1 per un durata temporale pari a 1 (uno) anno, allo scadere del quale, sulla base delle informazioni che saranno acquisite, sarà effettuato un aggiornamento del piano;
- trasmettere il suddetto piano al Dipartimento della Protezione Civile nazionale, Ministero delle infrastrutture e dei trasporti - Ufficio tecnico per le dighe di Napoli, Autorità di Distretto dell'Appennino meridionale, Regione Puglia - Sezione Lavori Pubblici in qualità di Autorità idraulica, Prefettura-UTG di Brindisi, Gestore della diga Consorzio ASI, Comune di Brindisi per quanto di competenza;

Visto:
- la direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 27 febbraio 2004 "*Indirizzi operativi per la gestione organizzativa e funzionale del sistema di allertamento nazionale, statale e regionale per il rischio idrogeologico ed idraulico ai fini di protezione civile*";
- la direttiva del Presidente del Consiglio dei ministri 8 luglio 2014 "*Indirizzi operativi inerenti l'attività di protezione civile nell'ambito dei bacini in cui siano presenti grandi dighe*";
- l'articolo 11 del decreto legislativo 2 gennaio 2018, n. 1 che stabilisce le funzioni delle Regioni nell'ambito della Pianificazione territoriale di Protezione Civile;
- la legge regionale 12 dicembre 2019, n. 53 "*Sistema regionale di Protezione Civile*".

Garanzie di riservatezza

La pubblicazione sul BURP, nonché la pubblicazione all'Albo o sul sito istituzionale, salve le garanzie previste dalla legge n. 241/1990 in tema di accesso ai documenti amministrativi, avviene nel rispetto della tutela della riservatezza dei cittadini secondo quanto disposto dal Regolamento UE n. 679/2016 in materia di protezione dei dati personali, nonché dal D.Lgs. n. 196/2003 ss.mm.ii., ed ai sensi del vigente regolamento regionale n. 5/2006 per il trattamento dei dati sensibili e giudiziari, in quanto applicabile. Ai fini della pubblicità legale, il presente provvedimento è stato redatto in modo da evitare la diffusione di dati personali identificativi non necessari ovvero il riferimento alle particolari categorie di dati previste dagli articoli 9 e 10 del succitato Regolamento UE.

COPERTURA FINANZIARIA
ai sensi del d.Lgs n. 118/2011 e ss.mm.ii.

La presente deliberazione non comporta implicazioni, dirette e/o indirette, di natura economico-finanziaria e/o patrimoniale e dalla stessa non deriva alcun onere a carico del bilancio regionale considerata la neutralità finanziaria che lo caratterizza.

Il Presidente, sulla base delle risultanze istruttorie, come innanzi illustrate, ai sensi dell'articolo 4, comma

4, lettera d) della legge regionale 4 febbraio 1997, propone alla Giunta l'adozione del conseguente atto deliberativo.

DISPOSITIVO DELLA DELIBERAZIONE

1. di richiamare le premesse in quanto parte integrante e sostanziale del presente atto;
2. di prendere atto degli studi propedeutici e della redazione del Piano di Laminazione della Diga del Cillarese nell'ambito del POR Puglia 2014-2020 – Asse V – Azione 5.1 – "*Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe*";
3. di approvare il documento "**Piano di Laminazione per la Diga del Cillarese**", strumento tecnico-operativo per la regolazione dei deflussi della diga del Cillarese nel corso di eventi di piena, allegato alla presente deliberazione di cui costituisce parte integrante e sostanziale (allegato A);
4. di adottare, sulla base dell'allegato documento tecnico-operativo, quale regola di gestione dell'invaso lo **Scenario 1** del Piano di Laminazione (Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni) con la seguente regolarizzazione:

Periodo	Quota di invaso [m s.l.m.]
1 Ottobre - 31 Marzo	14,00
1 Aprile - 14 Aprile	15,00
15 Aprile - 30 aprile	15,50
1 Maggio - 30 Settembre	16,00

5. di testare lo Scenario 1 per un durata temporale pari a 1 (uno) anno, allo scadere del quale, sulla base delle informazioni che saranno acquisite, sarà effettuato un aggiornamento del piano;
6. di considerare il suddetto documento funzionale al rafforzamento del sistema di pianificazione e gestione delle emergenze di protezione civile, nonché necessario e fondamentale per il governo del territorio, la progettazione e la pianificazione territoriale;
7. di notificare il suddetto piano, a cura della Sezione Protezione Civile proponente, al Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, al Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti - Ufficio tecnico per le dighe di Napoli, all'Autorità di Distretto dell'Appennino meridionale, alla Regione Puglia - Sezione Lavori Pubblici in qualità di Autorità idraulica, alla Prefettura-UTG di Brindisi, al Gestore della diga Consorzio ASI, al Comune di Brindisi, per quanto di competenza;
8. di disporre la pubblicazione del presente provvedimento sul BURP, ai sensi dell'articolo 6 della legge regionale n. 13/1994.

I sottoscritti attestano che il provvedimento istruttorio è stato espletato nel rispetto della vigente normativa regionale, nazionale e comunitaria e che il presente schema di provvedimento, dagli stessi predisposto ai fini dell'adozione dell'atto finale da parte della Giunta Regionale, è conforme alle risultanze istruttorie.

Il funzionario istruttore
(ing. Teresa Mungari)

Il funzionario istruttore
(geol. Fabrizio Panariello)

PO Responsabile del Centro Funzionale Decentrato
(ing. Tiziana Bisantino)

PO Gestione reti di monitoraggio
(dott. Franco Intini)

Il Dirigente ad interim della Sezione Protezione Civile
(dott. Nicola Lopane)

Il Direttore del Dipartimento Personale e Organizzazione
(dott. Ciro Giuseppe Imperio)

Il Presidente, con delega alla Protezione Civile
(dott. Michele Emiliano)

LA GIUNTA REGIONALE

- Udita la relazione e la conseguente proposta del Presidente, con delega alla Protezione Civile;
- Viste le sottoscrizioni apposte in calce alla proposta di deliberazione;
- A voti unanimi e palesi, espressi nei modi di legge.

D E L I B E R A

1. di richiamare le premesse in quanto parte integrante e sostanziale del presente atto;
2. di prendere atto degli studi propedeutici e della redazione del Piano di Laminazione della Diga del Cillarese nell'ambito del POR Puglia 2014-2020 – Asse V – Azione 5.1 – "*Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe*";
3. di approvare il documento "**Piano di Laminazione per la Diga del Cillarese**", strumento tecnico-operativo per la regolazione dei deflussi della diga del Cillarese nel corso di eventi di piena, allegato alla presente deliberazione di cui costituisce parte integrante e sostanziale (allegato A);
4. di adottare, sulla base dell'allegato documento tecnico-operativo, quale regola di gestione dell'invaso lo **Scenario 1** del Piano di Laminazione (Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni) con la seguente regolarizzazione:

Periodo	Quota di invaso [m s.l.m.]
1 Ottobre - 31 Marzo	14,00
1 Aprile - 14 Aprile	15,00
15 Aprile - 30 aprile	15,50
1 Maggio - 30 Settembre	16,00

5. di testare lo Scenario 1 per un durata temporale pari a 1 (uno) anno, allo scadere del quale, sulla base delle informazioni che saranno acquisite, sarà effettuato un aggiornamento del piano;
6. di considerare il suddetto documento funzionale al rafforzamento del sistema di pianificazione e gestione delle emergenze di protezione civile, nonché necessario e fondamentale per il governo del territorio, la progettazione e la pianificazione territoriale;
7. di notificare il suddetto piano, a cura della Sezione Protezione Civile proponente, al Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, al Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti - Ufficio tecnico per le dighe di Napoli, all'Autorità di Distretto dell'Appennino meridionale, alla Regione Puglia - Sezione Lavori Pubblici in qualità di Autorità idraulica, alla Prefettura-UTG di Brindisi, al Gestore della diga Consorzio ASI, al Comune di Brindisi, per quanto di competenza;
8. di disporre la pubblicazione del presente provvedimento sul BURP, ai sensi dell'articolo 6 della legge regionale n. 13/1994.

Il Segretario della Giunta
ANNA LOBOSCO

Il Presidente della Giunta
RAFFAELE PIEMONTESE

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

Associazione Temporanea di Imprese tra
Hydrodata S.p.A, DHI S.r.l. a socio unico, prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni
con capogruppo mandataria:
Hydrodata S.p.A., via Pomba, 23 - 10123 Torino
tel. 011-5592811, fax 011-6620620,
mail hydrodata@hydrodata.it, PEC hydrodatapec@registerpec.it
P.IVA 01735260018

Lopane Nicola
28.01.2022 13:33:41
GMT+01:00

POR Puglia 2014-2020 Azione 5.1 “Interventi di riduzione del rischio idrogeologico e di erosione costiera”.

“Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe”

CIG: 7022820665

Fase 2 - Piano di Laminazione per la Diga del Cillarese

REGIONE PUGLIA

Relazione Tecnica

Giugno 2018

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

POR Puglia 2014-2020 Azione 5.1 “Interventi di riduzione del rischio idrogeologico e di erosione costiera”.

“Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe”

CIG: 7022820665

Fase 2 – Piano di Laminazione per la Diga del Cillarese

Committente Regione Puglia, Servizio Protezione Civile

Referente del Committente ing. Tiziana Bisantino

Vista aerea della Diga del Cillarese

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

INDICE

1 Premessa e contesto di riferimento 1

2 Dettaglio delle attività 2

3 Caratteristiche generali del sistema modellistico 2
3.1 Il modulo RR 4
3.2 Il modulo HD 7
3.3 Il modulo DA 9

4 C1 – Costruzione e calibrazione del modello idrologico 12
4.1 Raccolta e analisi dei dati a disposizione 12
4.2 Ricostruzione delle serie di portata in ingresso all'invaso 14
4.3 Costruzione del modello idrologico 15
4.4 Calibrazione del modello idrologico 17

5 C2 – Costruzione del modello idrodinamico 19
5.1 Sopralluogo e rilievo del Canale Cillarese 19
5.2 Schematizzazione della diga del Cillarese 23
5.3 Verifica della capacità di invaso della diga 25
5.4 Costruzione del modello idrodinamico per il tratto di valle 26
5.5 Risultanze delle simulazioni con il modello idrodinamico 28
5.6 Soglie di allertamento 30

6 C3 – Analisi degli apporti all'invaso 31
6.1 Ricostruzione delle portate storiche con il modello idrologico 31
6.2 Analisi statistica delle precipitazioni 32
6.2.1 Curve di pioggia mediante procedura regionale Vapi 34
6.2.2 Curve di pioggia mediante procedura classica 38
6.2.3 Analisi dei trend pluviometrici sulle serie storiche giornaliere 44
6.2.4 Analisi dei trend e dei change-points 45
6.3 Analisi delle portate statistiche con il modello idrologico 47
6.4 Lo studio dell'Autorità di Bacino 48

7 C4 – Scenari di gestione dell'invaso 50
7.1 Analisi dei rilasci dall'invaso allo stato attuale 50
7.1.1 Impostazione delle simulazioni "storiche" 51
7.1.2 Risultati delle simulazioni "storiche" 52
7.2 Calcolo dei livelli di invaso per i 4 Scenari considerati con la serie storica di portata per il periodo 1976-2017 55
7.2.1 Scenario 1: T = 10 anni, Δt = 14 giorni 57
7.2.2 Scenario 2: T = 10 anni, Δt = 7 giorni 59
7.2.3 Scenario 3: T = 5 anni, Δt = 14 giorni 61
7.2.4 Scenario 4: T = 5 anni, Δt = 7 giorni 63
7.3 Analisi dei rilasci dall'invaso rispetto agli eventi "statistici" 65
7.3.1 Analisi di livelli di invaso, derivazioni e impostazione delle simulazioni 65
7.3.2 Risultati delle simulazioni "statistiche" 67
7.3.2.1 Simulazioni con livello iniziale 16 m s.l.m. 69
7.3.2.1.1 Simulazioni con livello iniziale 14 m s.l.m. 70
7.3.2.2 Simulazioni con livello iniziale 12 m s.l.m. 71
7.3.2.3 Simulazioni con livello iniziale 10 m s.l.m. 72
7.3.2.4 Simulazioni con livello iniziale 8 m s.l.m. 73

7.3.2.5 Simulazioni con livello iniziale 6 m s.l.m. ... 74
7.3.2.5.1 Sintesi dei risultati delle simulazioni statistiche ... 75

8 C6 – Individuazione degli esposti vulnerabili ... 76
8.1 Obiettivi e riferimenti normativi ... 76
8.2 Fonti informative di base ... 76
8.3 Sintesi metodologica ... 77
8.4 Risultati dell'individuazione degli elementi esposti ... 81

9 C5 – Modello bidimensionale ... 83
9.1 Costruzione della griglia di calcolo ... 83
9.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE FLOOD ... 85
9.3 Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte ... 85
9.3.1 Scenari di rottura diga – simulazione SIM1 ... 85
9.3.1.1 Collasso dello sbarramento - simulazione SIM1/1 ... 85
9.3.1.2 Apertura istantanea dello scarico di fondo – simulazione SIM1/2 ... 96
9.3.2 Risultati dell'analisi degli elementi esposti per lo scenario di Dambreak (scenario SIM1/1) ... 96
9.3.3 Scenari con eventi di assegnato tempo di ritorno ... 99
9.3.4 Risultati dell'analisi degli elementi esposti per gli scenari con eventi di assegnato tempo di ritorno ... 102

10 C7 – Proposte per il Piano di Laminazione della diga del Cillarese ... 105

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

Prof. ing. Alberto Ferruccio Piccinni

1 Premessa e contesto di riferimento

La presente relazione tecnica descrive l'insieme delle attività svolte dal RTI Hydrodata S.p.a. – DHI S.r.l. – Prof. Ing. Ferruccio Piccinni nell'ambito del servizio di "Predisposizione dei Piani di Laminazione sulle grandi dighe regionali e redazione dei relativi Piani Emergenza Dighe", relativamente alla Diga del Cillarese.

Complessivamente, il servizio comprende una serie di attività di studio finalizzate alla redazione dei Piani di Laminazione e dei Piani di Emergenza per le dighe di Occhito sul Fiume Fortore, di Torrebianca sul Torrente Celone e del Cillarese, sull'omonimo canale.

Il conseguimento degli obiettivi sopra indicati si articola su un percorso strutturato per fasi che possono essere così schematizzate:

- sviluppo e calibrazione di un insieme di modelli numerici idrologici e idraulici finalizzati all'analisi del bacino, dell'influenza dell'invaso e delle condizioni di rischio a valle;
- redazione del Piano di Laminazione, che definisce le modalità di regolazione dei livelli di invaso e dei deflussi a valle;
- redazione del Documento di Protezione Civile, che regola le procedure di gestione del rischio e le relative modalità di attivazione, (in carico al Centro Funzionale);
- redazione del Piano di Emergenza Diga, che indica le modalità di gestione degli eventi estremi.

Rispetto a tale percorso, la Regione Puglia, in particolare tramite il proprio Centro Funzionale Decentrato, ha già intrapreso e completato una serie di attività, adottando peraltro approcci e metodologie di lavoro all'avanguardia, tali da renderla una eccellenza nel panorama nazionale. Tra queste, è opportuno ricordare in questa sede:

- il pieno completamento ed approvazione del Piano di Laminazione della Diga di Occhito, basato su un programma statico (DGR 2563 del 30.12.13);
- l'implementazione di una piattaforma modellistica di previsione idrologica in tempo reale tale da consentire il monitoraggio e la gestione dinamica degli eventi estremi sui bacini del Fortore e del Candelaro;
- la conseguente predisposizione ed approvazione del "Documento di gestione del rischio idraulico del Fiume Fortore a valle della diga di Occhito e costituzione dell'Unità di Comando e Controllo", che consente una più avanzata gestione dinamica degli eventi (DGR 1439 del 13.09.16);
- l'attivazione di ulteriori analisi modellistiche avanzate finalizzate alla definizione delle aree allagabili e quindi funzionali al Piano di Emergenza per la Diga di Occhito.

Relativamente alla Diga del Cillarese, il servizio prevede:

- l'implementazione e calibrazione del modello previsionale idrologico e idraulico comprensivo anche della componente bidimensionale;
- la prima redazione del Piano di Laminazione, comprensiva dello studio idrologico, della definizione delle modalità di gestione, dell'individuazione degli esposti vulnerabili e dello studio idraulico di dettaglio a valle;
- la redazione del Piano di Emergenza Diga.

2 Dettaglio delle attività

Coerentemente con l'Offerta Tecnica predisposta dal RTI, l'insieme delle attività oggetto del Servizio, relativamente alla Diga del Cillarese, è stato articolato e classificato secondo la specifica nomenclatura riportata a seguire ed adottata quale riferimento per tutte le fasi di lavoro.

- C1 – Costruzione e calibrazione del modello idrologico;
- C2 – Costruzione del modello idrodinamico e soglie;
- C3 – Analisi degli apporti all'invaso;
- C4 – Simulazione scenari di gestione dell'invaso;
- C5 – Modello bidimensionale e analisi di rischio;
- C6 – Individuazione degli esposti vulnerabili;
- C7 – Proposte per il Piano di Laminazione;
- C8 – Redazione del Piano di Emergenza;
- C9 – Messa in Linea del modello.

Nell'ambito della fase 1 del progetto sono state completate una serie di attività di studio e analisi modellistica che sono state riassunte, congiuntamente per tutte le dighe, nell'elaborato 22801879-01-00100 denominato Fase 1- Sviluppo e aggiornamento dei modelli idrologici e idraulici.

Il presente elaborato di Fase 2, in accordo con quanto concordato con la Committenza, è relativo alla sola diga del Cillarese e ricomprende tutte le attività già presentate in Fase 1 nell'elaborato sopra citato unitamente a quanto oggetto della Fase 2.

Si segnala inoltre che l'attività C3, inizialmente definita "analisi statistica e scenari di precipitazione", era stata rinominata "analisi degli apporti all'invaso" in coerenza con l'approccio metodologico adottato per la successiva redazione dei Piani di Laminazione.

3 Caratteristiche generali del sistema modellistico

Nell'ambito delle diverse attività per la redazione dei Piani di Laminazione si è adottato sempre un approccio fortemente deterministico, basato sull'uso estensivo di modelli numerici.

Al fine di garantire il pieno rispetto degli standard già precedentemente in uso presso il Centro Funzionale, tutti i modelli sono stati implementati su piattaforma MIKE by DHI, secondo una struttura modulare in primis derivante dall'utilizzo degli stessi strumenti per le finalità del tempo reale.

In questo paragrafo si riportano quindi le caratteristiche generali di tale struttura modellistica, rimandando le specifiche modalità di implementazione agli specifici capitoli relativi agli invasi oggetto di analisi.

Il sistema modellistico è stato implementato utilizzando il codice di simulazione numerica MIKE 11 (oggi MIKE HYDRO RIVER) di DHI, versione 2017, utilizzato a scala mondiale per l'alto livello tecnologico, specialmente nel campo dell'idraulica-idrologia, già adottato quale riferimento dal Centro Funzionale.

Nella figura a seguire è riportato lo schema dei moduli utilizzati per la messa a punto del sistema modellistico di simulazione idrologico-idraulica, funzionale anche al tempo reale:

- RR *Rainfall-Runoff Module*, modello di trasformazione afflussi-deflussi "a serbatoi", basato su un approccio di idrologia continua, applicato ai bacini di testata ed ai bacini residui, per il calcolo del deflusso a partire dai dati di precipitazione e temperatura;

- HD *Hydrodynamic Module*, modello idraulico di trasformazione e composizione dei deflussi in alveo, applicato alle aste fluviali, sulla base delle caratteristiche geometriche desunte dal rilievo LIDAR a disposizione;
- SO *Structure Operation Module,* modulo interno alla componente idrodinamica (HD), per la schematizzazione di organi mobili e strutture complesse di controllo;
- DA *Data Assimilation Module*, modulo di autocalibrazione del modello di previsione.

Tale struttura è stata ulteriormente integrata in questo contesto con la componente idrodinamica bidimensionale MIKE 21, attraverso l'attivazione della piattaforma MIKE FLOOD che consente di integrare i modelli MIKE 11 e MIKE 21 in modalità dinamica.

Figura 3-1 Il sistema di simulazione numerica MIKE 11 – il modulo SO è schematizzato come interno alla componente idrodinamica HD.

Il sistema modellistico descritto nel presente Rapporto Tecnico presenta una serie di importanti caratteristiche strategiche ai fini della previsione delle piene, che è opportuno richiamare in questa sede:

- è basato su un approccio di idrologia "continua" e non di idrologia "ad evento" e quindi non ha bisogno che vengano assegnate dall'operatore le condizioni iniziali per poter riprodurre la piena, in quanto si aggiorna in continuazione utilizzando i dati che riceve in tempo reale dal sistema di monitoraggio;
- accorpa in sé sia il modulo di trasformazione afflussi-deflussi sia il modulo di propagazione idrodinamica e composizione della piena lungo l'asta di valle, permettendo, con un unico set-up, di rappresentare tutto il bacino idrografico;
- essendo basato su codici di calcolo ampiamente testati, validati e controllati sia sotto il profilo numerico che dal punto di vista degli algoritmi, e già ampiamente applicati in situazioni analoghe, il Modello rappresenta un sistema "robusto" rispetto alla stabilità dei calcoli ed ampiamente ottimizzato in relazione ai tempi di elaborazione;

- è dotato di un sistema di autocalibrazione delle previsioni, basato sul confronto iterativo in tempo reale tra i dati calcolati ed i dati misurati fino al tempo di preannuncio (modulo DA), che permette di correggere l'errore di ampiezza e l'errore di fase commessi nella ricostruzione dell'idrogramma di piena, ottenendo la migliore corrispondenza possibile tra osservazioni e simulazioni e stabilendo quindi condizioni ottimali a partire dalle quali effettuare il calcolo idrologico-idraulico per il periodo di previsione;
- può produrre in output, oltre ai valori di portata e livello, anche l'andamento temporale di alcuni parametri del modello idrologico riferiti ai bacini, per esempio lo stato attuale di saturazione del suolo ed il livello attuale del serbatoio neve, i quali, sebbene schematici - in quanto aggregazioni spaziali a scala di bacino di una realtà fenomenologica distribuita - possono essere utilizzati per definire una soglia di rischio incipiente di piena;
- può collegarsi ad un sistema di interpretazione e di gestione dei dati territoriali in modalità GIS che, potendo disporre di un modello digitale del terreno di appropriata definizione, consente di ricostruire automaticamente le aree di esondazione, generando mappe di previsione dell'inondazione;
- ricorrendo alla simulazione afflussi-deflussi con l'approccio di idrologia "continua" è in grado di prevedere, in funzione dell'andamento delle precipitazioni, delle temperature, della ricostruzione del fenomeno di accumulo e scioglimento del manto nevoso, non solo la fase di generazione degli idrogrammi ma anche le fasi di esaurimento, dando una rappresentazione esaustiva di tutto il ciclo idrologico che può essere utilizzata per la gestione della risorsa idrica;
- è dotato di un collegamento diretto, nell'ambito dello stesso pacchetto software MIKE 11, con i moduli di trasporto-dispersione (AD) e di qualità dell'acqua (ECO Lab) che potrebbero in futuro essere utilizzati nella gestione della qualità della risorsa.

L'impostazione del modello di previsione sopra descritto è di tipo deterministico. Con questo si intende un approccio che presenta le seguenti caratteristiche:

- stretta relazione con il sistema fisico idrografico;
- flessibilità rispetto alle caratteristiche del territorio e al grado di conoscenza disponibile;
- rappresentazione dei fenomeni nel continuo temporale;
- progressivo miglioramento/adattamento del sistema in base all'evoluzione del quadro conoscitivo;
- modularità del sistema.

L'espandibilità del sistema modellistico è un'ulteriore caratteristica molto importante; essa permette di incrementare il dettaglio rappresentativo, di specializzare l'output, di condurre simulazioni sui regimi idrologici ordinari, di poter inserire il sistema principale delle utenze, di simulare anche ulteriori fenomeni fluviali (quali trasporto solido e qualità dell'acqua).

3.1 Il modulo RR

RR è un modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi, deterministico, fisicamente basato, a parametri concentrati costituito da un set di relazioni matematiche collegate fra loro in modo tale da descrivere quantitativamente la fase terrestre del ciclo dell'acqua.

RR simula in continuo la variazione di contenuto di acqua (in fase liquida o vapore) di serbatoi distinti e reciprocamente collegati, i quali rappresentano gli elementi fisici principali del bacino idrografico. I serbatoi rappresentano i seguenti processi: accumulo e scioglimento neve, intercettazione, infiltrazione, immagazzinamento nella falda.

Il modello matematico è fisicamente basato e utilizza equazioni matematiche assieme a relazioni semi-empiriche; alcuni parametri possono essere stimati dai dati fisici del bacino, altri sono definiti attraverso valori guida determinati in funzione delle caratteristiche del territorio e possono essere oggetto di calibrazione.

Il modulo “neve” è strutturato per sottobacini suddivisi in fasce altimetriche. Pur mantenendo una concettualizzazione a parametri concentrati, RR dà così la possibilità di rappresentare i processi di formazione e fusione della neve tenendo conto delle caratteristiche altimetriche del bacino e delle differenze di temperatura in quota.

La quantità d'acqua intercettata dalla vegetazione, come quella immagazzinata nelle depressioni del terreno e nelle porzioni più superficiali del suolo coltivato, è simulata con un serbatoio superficiale di capacità massima Umax. La quantità d'acqua nel livello subito sotto il suolo, cioè la zona delle radici ove avviene anche il processo di traspirazione, è simulata con un serbatoio inferiore sottostante, di capacità massima Lmax. Il livello attuale di umidità del suolo L, che rappresenta lo stato di imbibizione dello strato radicale del terreno, è il nodo centrale del processo di trasformazione afflussi-deflussi. A seconda dello stato di umidità del suolo prevalgono gli effetti di corrivazione superficiale o di assorbimento dell’acqua e rilascio verso la falda e con deflusso ipodermico. Il modello simula quindi processi di trasformazione a “coefficiente di deflusso variabile”.

La quantità di umidità U nel serbatoio superficiale è continuamente diminuita per evaporazione ed infiltrazione, ma durante la precipitazione viene aumentata in maniera considerevole. Quando viene saturata la capacità massima superficiale Umax, parte dell'eccesso di precipitazione Pn inizia a scorrere sulla superficie verso la rete di drenaggio, mentre parte si suddivide in infiltrazione verso la zona sottostante e verso la falda profonda.

Anche la quantità d'acqua contenuta nel serbatoio inferiore L è diminuita dalla traspirazione, mentre il contenuto reale di umidità controlla il tasso di infiltrazione.

L'acqua che percola, BFU, cioè la quantità d'acqua che non viene trattenuta in questo serbatoio, passa attraverso la zona insatura e raggiunge, ricaricandolo, il serbatoio della falda satura.

Quando il serbatoio superficiale sfiora, cioè U>=Umax, l'eccesso di pioggia produce: scorrimento QOF, proporzionale a Pn e variabile linearmente con il contenuto di umidità del suolo nel serbatoio inferiore L/Lmax; infiltrazione, di cui una parte DL aumenta il contenuto di umidità del serbatoio Lmax, mentre l'altra G percola in profondità e ricarica il serbatoio rappresentante la falda, attraverso parametri costanti inferiori all'unità e adimensionali CQOF (coefficiente di permeabilità superficiale), CLOF (valore soglia per deflusso superficiale) e CLG (valore soglia per la percolazione).

Il contributo del deflusso ipodermico QIF è assunto proporzionale ad U e varia linearmente con il contenuto relativo L/Lmax del serbatoio intermedio, secondo una legge simile alle precedenti con altre costanti adimensionali.

Le perdite per evapotraspirazione sono considerate in prima approssimazione proporzionali al tasso potenziale dal serbatoio superficiale; se il contenuto di umidità U è inferiore a tale tasso potenziale, la frazione rimanente per raggiungerlo è presa dalla zona delle radici con un tasso reale Ea, che è proporzionale al tasso potenziale.

Il fenomeno della percolazione viene simulato con un serbatoio lineare con una costante di tempo CKUZ che ritarda la ricarica della falda BFU.

Il flusso capillare dal livello di falda verso la zona aerata dipende dallo spessore del tratto insaturo nel profilo del terreno, GWL, e dal contenuto di umidità relativo L/Lmax della zona aerata. Il livello di falda è calcolato considerando con un bilancio fra la porzione di ricarica, la porzione capillare, la perdita verso gli strati più profondi (variabile su scala mensile) e il deflusso di base. Il deflusso di base è calcolato con un serbatoio lineare con una sua propria costante di tempo CKBF, ed avviene quando il livello di falda è superiore al livello massimo GWLBF0.

I deflussi ipodermico e superficiale sono entrambi simulati attraverso due serbatoi lineari in serie con due costanti di tempo, le quali nel caso di scorrimento superficiale sono anche variabili nel tempo. In questo modo si assicura, in pratica, l'assunzione del modello dell'onda cinematica per

simulare i processi di deflusso superficiale e ipodermico; il deflusso di base è simulato invece secondo i processi della dinamica sotterranea.

Figura 3-2 Schema concettuale del modello idrologico RR.

I dati meteorologici necessari per le simulazioni sono: precipitazione, evapotraspirazione potenziale e temperatura. La risoluzione temporale di questi dati dipende dall'obiettivo dell'applicazione del modello e dalla scala di tempo con cui il bacino si presume possa rispondere; spesso sono sufficienti dati a scansione giornaliera, ma per portate di piena è necessario utilizzare anche precipitazioni di breve durata.

I risultati delle simulazioni riportano l'andamento temporale delle seguenti grandezze:

- deflusso di corrivazione superficiale;
- deflusso ipodermico;
- deflusso di base (sostenuto dal serbatoio di falda);
- deflusso totale;
- precipitazione netta (depurata della quota parte di perdite per evapotraspirazione);
- evapotraspirazione reale;
- livelli di umidità del terreno superficiale (U, piccoli serbatoi e trattenimento fogliare);
- livello di umidità del suolo (L);
- livello rappresentativo della falda profonda;
- altezza e consistenza dello strato della neve alle diverse altitudini.

Figura 3-3 Struttura del modello afflussi-deflussi.

3.2 Il modulo HD

MIKE 11 HD simula il flusso monodimensionale, stazionario e non, di fluidi verticalmente omogenei in qualsiasi sistema di canali o aste fluviali. È possibile tenere conto di:

- portate laterali;
- condizioni di corrente veloce o lenta;
- flusso libero o rigurgitato in corrispondenza di sfioratori;
- differenti regole operative di funzionamento di serbatoi o invasi;
- resistenze localizzate e perdite di carico concentrate;
- casse d'espansione;
- condizioni di flusso bidimensionale sulle pianure alluvionali;
- azione del vento;
- nodi idraulici (biforcazioni e convergenze).

HD consente la soluzione del problema idrodinamico di moto vario con uno schema di soluzione numerica molto efficiente, che limita i tempi di calcolo consentendo una adeguata rappresentazione dell'evolversi temporale dei transitori idraulici legati al passaggio dell'onda di piena.

Il modello consente di attivare tre diverse descrizioni del moto, mediante tre differenti formulazioni matematiche:

- approccio dell'"onda cinematica". Le condizioni di moto sono calcolate imponendo il bilancio tra le forze di gravità e di attrito. Questa semplificazione non permette di simulare gli effetti di rigurgito.

- approccio dell'"onda diffusiva". Oltre alle forze di gravità ed attrito viene tenuto conto del gradiente idrostatico in modo tale da poter valutare anche gli effetti a monte delle condizioni al contorno di valle, cioè simulare i fenomeni di rigurgito.
- approccio dell'"onda dinamica". Utilizzando le equazioni complete del moto, comprese le forze di accelerazione, è possibile simulare con questa formulazione transitori veloci, flussi di marea ecc.

In funzione del tipo di problema da risolvere è possibile scegliere la descrizione del moto più appropriata. Ognuna delle tre formulazioni consente di simulare sia sistemi idrici ramificati che reti idrauliche con maglie chiuse.

È possibile tenere conto in vario modo della presenza di strutture idrauliche lungo la rete idrografica simulata. In tal caso in corrispondenza della struttura viene inserito nella griglia di calcolo un nodo Q, di soluzione dell'equazione del moto, in cui all'equazione di de St.Venant è sostituita l'equazione tipica delle perdite di carico localizzate.

Possono essere simulati: stramazzi a larga soglia o di forma e geometria qualunque, tombini di geometria qualunque, tratti di condotte in pressione. Attraverso la costruzione di sistemi quasi-bidimensionali ramificati è possibile rappresentare compiutamente qualunque tipo di ponte o di arginatura trasversale, valutando sia l'effetto sulla corrente d'alveo che l'eventuale tracimazione della struttura da parte delle acque di piena.

Un particolare modulo di calcolo (SO), consente di simulare all'interno della rete la presenza di una o più strutture mobili, con la caratteristica di luce sotto battente o di stramazzo a ventola. La posizione della struttura mobile (sia essa l'apertura della paratoia o l'abbattimento della ventola) viene determinata automaticamente dal modello in funzione del tempo o di altre variabili del sistema. Tali variabili possono essere un livello, una differenza di livelli tra due punti della rete di simulazione, una portata od una differenza di portate. È inoltre possibile prevedere per ogni struttura una duplice regola operativa di funzionamento, standard o di emergenza, automaticamente attivata dal superamento di assegnate soglie critiche di livello o di portata.

MIKE 11 consente di utilizzare due diverse formulazioni della resistenza d'attrito: l'espressione di Chezy e quella di Strickler. Permette inoltre di tenere conto di ogni possibile variazione della scabrezza all'interno delle sezioni trasversali, nelle golene o lungo l'alveo.

La soluzione del sistema di equazioni è indipendente dall'approccio modellistico seguito (cinematico, diffusivo, dinamico). Le equazioni generali di De Saint Venant sono trasformate in un sistema di equazioni implicite alle differenze finite secondo una griglia di calcolo con punti Q e h alternati tra loro, nei quali la portata Q e il livello idrico h, rispettivamente, sono determinati ad ogni passo temporale (schema di Abbott a 6 punti). Il metodo implicito è particolarmente efficiente in quanto incondizionatamente stabile: è possibile in tal modo adottare passi di tempo tali da essere significativi per l'estensione temporale della simulazione, senza essere vincolati alla stabilità delle soluzioni numeriche. Questo è un'altra fondamentale caratteristica di MIKE 11 che ha contribuito a renderlo adatto ai PC e a diffonderlo in tutto il mondo fin dagli anni '80.

La soluzione del sistema di de St.Venant permette di rappresentare, in dettaglio, tutte le trasformazioni che l'onda di piena subisce nella traslazione da monte a valle per effetto della laminazione naturale, dell'interferenza con le opere idrauliche, delle esondazioni al di fuori dell'alveo attivo, della confluenza di tributari laterali e del contributo distribuito dei bacini versanti.

Il modulo HD, come è stato accennato, permette la realizzazione di modelli quasi-bidimensionali. Oltre al ramo principale, che costituisce il corso d'acqua primario, possono essere simulati qualunque ordine e tipo di ramificazioni parallele (a maglia aperta o chiusa) collegate al ramo principale stesso.

Tale possibilità risulta molto utile nella realizzazione di modelli che tengono conto delle aree di esondazione laterale. Invece di estendere semplicemente le sezioni d'alveo sulle aree spondali,

allargandone i limiti fino a coprire l'area di possibile esondazione, con MIKE 11 possono essere introdotti dei rami paralleli, collegati all'alveo principale a mezzo di stramazzi a larga soglia su canali fittizi di collegamento ("link"), su cui possono essere impostate reali condizioni di deflusso, oppure può essere prevista la prevalenza dei fenomeni di laminazione su quelli dinamici.

Si tratta in tal caso di rami di corso d'acqua dotati di aree di laminazione addizionali ("additional flooded areas") nelle quali viene risolta solamente l'equazione di continuità della portata, rappresentando la corretta funzione "volumi-livelli" di capacità di ritenzione delle acque di piena dell'area spondale corrispondente.

Tali possibilità, permettono di avere valori di livello differenti lungo una sezione trasversale dell'alveo, in pratica livelli in golena che possono essere più bassi o più elevati di quelli dell'alveo attivo a seconda dell'istante di piena di riferimento.

Il caso più evidente è quello rappresentato dalle esondazioni sulle aree esterne a tratti arginati, pensili rispetto alla campagna circostante. Con un modello puramente monodimensionale il livello di massima piena per ogni sezione corrisponderebbe al livello massimo di tracimazione delle sponde. Ricorrendo alle simulazioni quasi-bidimensionali realizzate con MIKE 11 si tiene conto dell'effettiva differenza di livello tra soglia arginale tracimante e piano compagna a tergo dell'opera, determinando una precisa valutazione dei volumi fuoriusciti dall'alveo e dell'estensione delle aree di esondazione.

3.3 Il modulo DA

Unitamente ai moduli RR ed HD, precedentemente descritti, il sistema modellistico è stato sviluppato, per il funzionamento in tempo reale, anche sulla base del modulo DA - Data Assimilation, che consente di utilizzare in fase di simulazione anche i dati di osservazione registrati dalle stazioni idrometriche presenti nel sistema idrografico, sia in termini di portata che di livello.

Se il vero e proprio input al sistema modellistico è costituito dalle serie di pioggia e temperatura, preparate in tempo reale dal modulo di gestione, sulla base delle quali il modello numerico è in grado di riprodurre i livelli e le portate di deflusso in tutti i corsi d'acqua, l'assimilazione, mediante l'utilizzo dei dati di osservazione idrometrica, consente di migliorare considerevolmente il livello di performance del modello in termini di rispondenza tra il dato osservato e simulato.

È infatti inevitabile che sia presente un errore di simulazione: per quanto omogeneamente distribuite sul territorio le stazioni pluviometriche non sono in grado di rappresentare "esattamente" il campo di precipitazione ed inoltre la modellazione del corso d'acqua comporta una schematizzazione della geometria trasversale e longitudinale limitata dalla significatività delle sezioni a disposizione.

È quindi importante "aggiustare" automaticamente i risultati del modello per far sì che prima della fase di previsione ci sia la massima verosimiglianza tra dati calcolati e dati misurati. La procedura che applica tale autocalibrazione è svolta dal modulo DA.

Rispetto ad altri modelli presentati in letteratura DA ha un vantaggio fondamentale, che è quello di operare un aggiustamento dei dati calcolati sia nel campo dell'ampiezza dell'idrogramma osservato che nel campo dello sfasamento temporale, sia in fase di osservazione che nel periodo previsionale. La seguente Figura 3-4 presenta le diverse tipologie di errore che possono essere riscontrate dal modulo durante la simulazione del periodo storico.

Figura 3-4 Errori "di ampiezza" e "di fase" considerati dal modulo DA.

Requisito principale per l'applicazione di tale procedura è la possibilità di disporre di una stazione idrometrica estremamente affidabile, in termini di lettura di livello e di scala di deflusso per la determinazione delle portate.

In assenza di tale requisito sussiste, infatti, la possibilità di introdurre nel sistema una ulteriore incertezza ed approssimazione nei risultati.

Inoltre, affinché la correzione sia efficace è necessario che il modello idrologico-idraulico sia tarato al meglio, cioè che il campo di correzione si mantenga al di sotto di una certa percentuale (30-40%, indicativamente) dell'errore di deflusso. Per questo motivo è sempre fondamentale operare la migliore calibrazione possibile del sistema, sulla base dei dati storici a disposizione.

L'applicazione del modulo è automatica all'interno del modello. L'utente, che ha sempre comunque la possibilità di intervenire sul set up, in caso di simulazioni in tempo reale riceve i risultati già corretti dalla procedura di assimilazione.

Come anticipato, il modulo DA - Data Assimilation può operare indistintamente in reazione alle due variabili di stato, livello e portata, per ogni singola stazione di misura.

La procedura di aggiornamento del modello sulla base dei dati idrometrici di osservazione è basata su di un algoritmo di filtro combinato con un modello di previsione dell'errore nei diversi punti di misura.

L'algoritmo di filtro è applicato su di un tratto definito dall'utente per ogni stazione di misura; in particolare, possono essere adottate tre diverse tipologie della funzione di filtro, rispettivamente costante, triangolare ed esponenziale.

Figura 3-5 Diverse tipologie della funzione di filtro e relativo intervallo spaziale di applicazione rispetto al punto di osservazione.

La procedura di aggiornamento così definita può essere applicata in un intervallo temporale per cui siano disponibili i dati di osservazione, limitatamente all'istante in cui viene condotta la simulazione.

Al fine di poter "correggere" il modello anche nel periodo di previsione, la funzione di filtro viene accoppiata con una previsione dell'errore, così come presentato nella figura successiva.

Per ogni stazione di misura viene quindi elaborata la serie temporale delle correzioni applicate, per ogni punto dello schema di calcolo, durante il periodo antecedente al momento della previsione. Tale serie viene poi estesa al periodo futuro sulla base di una legge di previsione dell'errore definita in ogni singolo punto di misura.

Figura 3-6 Schema di funzionamento accoppiato della funzione di filtro con l'algoritmo di previsione dell'errore.

4 C1 – Costruzione e calibrazione del modello idrologico

Il modello idrologico e idrodinamico relativo al bacino del Canale Cillarese ed al relativo invaso è stato allestito sulla base degli standard già adottati in riferimento a Fortore e Candelaro, così come per gli altri bacini interessati dal sistema di previsione idrologica (Cervaro, Carapelle, Ofanto e Lato).

La presentazione delle attività di costruzione e calibrazione del modello idrologico e idraulico è suddivisa nei paragrafi a seguire, in riferimento alle attività di progetto C1 e C2.

4.1 Raccolta e analisi dei dati a disposizione

Una prima attività ha previsto l'acquisizione presso il Centro Funzionale di tutte le informazioni necessarie per lo studio ed implementazione del modello numerico, nonché per costruire un quadro informativo di riferimento che dovrà comunque essere oggetto di continua integrazione nel tempo.

Per l'implementazione del modello numerico sono stati raccolti e resi disponibili i seguenti dati:

- foglio di condizioni per l'esercizio e manutenzione della Diga del Cillarese;
- rilievo aereo con tecnologia LIDAR realizzato Ministero dell'Ambiente relativo all'intera asta del Cillarese;
- serie storiche relative alle precipitazioni e temperature registrate dalle stazioni ricadenti nel bacino e limitrofe;
- serie storica relativa al livello nell'invaso, ai rilasci dallo scarico di fondo e di superficie ed alla derivazione ad uso industriale;
- lo "Studio selle caratteristiche dell'onda di piena conseguente a ipotetico collasso dello sbarramento sul canale Cillarese ed alla individuazione delle aree soggette ad allagamento" comprensivo dei relativi allegati.

Tutti i dati territoriali sono stati organizzati in una piattaforma GIS, operante in ambiente ArcGis 10.5, ed utilizzati nelle diverse fasi di implementazione e gestione del dispositivo modellistico idrologico ed idrodinamico, come presentato nei paragrafi a seguire.

Sulla base delle informazioni sopra elencate, opportunamente integrate con ulteriori mappe territoriali e tematismi, si è proceduto ad individuare il bacino afferente all'invaso, che si sviluppa su un'area complessiva pari a 152 Km^2.

A tal proposito è opportuno evidenziare come il reticolo idrografico in tale area sia caratterizzato dalla presenza di numerosi canali irrigui che frequentemente si interrompono in corrispondenza di estese aree coltivate. Risulta quindi particolarmente difficile una ricostruzione di dettaglio del reticolo e delle dinamiche di deflusso, peraltro non necessaria per le finalità di studio.

A fronte di questa situazione, è stato opportuno limitarsi alla definizione del bacino complessivo a monte dell'invaso adottando, come dettagliato nel seguito, una schematizzazione idrologica basata su un unico bacino elementare. Tale dettaglio risulta peraltro compatibile, in termini di area, con la schematizzazione adottata per i bacini sottesi dagli invasi di Occhito e Torrebianca, nonché con la distribuzione spaziale delle stazioni meteorologiche.

Nell'immagine a seguire si presenta una visione di insieme del bacino oggetto di analisi comprensiva della relativa idrografia.

Figura 4-1 Delimitazione del bacino e reticolo idrografico del bacino del Canale Cillarese.

I dati delle centraline idro-meteo-pluviometriche della rete della Regione Puglia sono stati acquisiti interrogando in modo diretto il database della piattaforma di supporto decisionale MIKE OPERATIONS, già oggi operativa presso il Centro Funzionale. Complessivamente sono disponibili dati a passo orario per il periodo dal 2000 al 2017 sebbene la disponibilità dei dati delle stazioni risulti fortemente variabile, in particolare in riferimento ai primi anni.

Figura 4-2 Localizzazione planimetrica delle stazioni pluviometriche e termometriche utilizzate per la ricostruzione delle serie di input al modello idrologico.

Tali dati puntuali sono stati successivamente processati mediante un algoritmo di interpolazione al fine di generare dei campi bidimensionali tempo-varianti di precipitazione e temperatura, sulla base dei quali sono state costruite le serie di input al modello idrologico.

In aggiunta ai dati a passo orario, di cui sopra, sono stati acquisiti anche i dati a passo giornaliero a partire dal 1976 relativamente alle stazioni di Brindisi, Latiano, San Pancrazio Salentino e San Pietro Vernotico. Tali serie di dati sono risultate utili per l'analisi dei volumi in arrivo all'invaso, di cui all'attività C3.

All'interno del bacino del Cillarese non sono invece disponibili stazioni idrometriche. Come dettagliato nel seguito, l'unico termine di calibrazione possibile per il modello idrologico è quindi la serie di livello nell'invaso, peraltro con frequenza giornaliera.

4.2 Ricostruzione delle serie di portata in ingresso all'invaso

L'analisi dei volumi e del bilancio idrico dell'invaso è stata condotta a partire dai dati a passo giornaliero resi disponibili dal Consorzio ASI a partire da Maggio 2000, in coincidenza con l'inizio delle operazioni di invaso.

La figura a seguire presenta la serie di livello resa disponibile, in cui si evidenza il primo periodo caratterizzato dal progressivo invaso e la successiva gestione a partire dal 2003 con livelli mediamente compresi tra 14 e 17 m s.l.m., pari alla quota dello scarico di superficie.

Figura 4-3 Serie di livello di invaso per la Diga del Cillarese.

I dati acquisiti dal Consorzio ASI, in termini di livelli medi giornalieri, sono stati opportunamente convertiti in termini di volumi invasati in ogni giorno.

Tali dati sono stati integrati con le registrazioni relative alle manovre allo scarico di fondo, in termini di periodi di apertura e volumi rilasciati, con gli sfiori dallo scarico di superficie a soglia fissa ed alle derivazioni ad uso industriale. Per tutte queste, il Consorzio ASI ha reso disponibili i dati su base giornaliera.

Noti quindi tutti i termini di bilancio in uscita dall'invaso e le relative variazioni di volume, è stato possibile ricostruire la serie delle portate medie giornaliere in arrivo alla diga dal bacino di monte.

La serie così costruita presenta valori di portata modesti, sia in riferimento ai regimi ordinari, quando gli afflussi all'invaso sono fortemente condizionati dagli usi della risorsa nella porzione a monte del bacino, sia durante gli eventi di piena, anche a fronte del carattere pianeggiante del bacino e delle finalità d'uso prevalentemente agricole del territorio.

Figura 4-4 Serie di portata giornaliera in arrivo alla Diga del Cillarese nel periodo da Maggio 2000 a Dicembre 2017.

La serie così costruita è stata utilizzata sia per le finalità di calibrazione del modello idrologico sia per le analisi volte alla scelta della regola del Piano di Laminazione dell'invaso, come dettagliato nei paragrafi successivi.

4.3 Costruzione del modello idrologico

La prima fase di sviluppo della piattaforma modellistica è stata finalizzata alla costruzione e calibrazione del modello idrologico.

Come già richiamato, a fronte della complessità del reticolo di canali che interessa la porzione di bacino a monte dell'invaso del Cillarese, nonché delle finalità dello studio, relativo alla diga ed al tratto di valle, è stata adottata una schematizzazione basata su un unico bacino elementare chiuso in corrispondenza dello sbarramento, come riportato nella Figura 4-1.

Al bacino elementare corrispondono quindi un set di parametri di tipo concettuale atti a rappresentare il comportamento idrologico medio del bacino contribuente. Tali parametri sono stati inizialmente definiti sulla base delle informazioni morfologiche e fisiografiche disponibili e successivamente oggetto di specifica calibrazione sulla base degli apporti alla diga e relativo bilancio di volume.

Sempre coerentemente con la propria natura di tipo "concentrato" il modello numerico richiede in input le serie tempo-varianti di precipitazione, temperatura ed evapotraspirazione potenziale medie sull'intero bacino, nel caso specifico a passo orario, costruite sulla base di una procedura di spazializzazione a partire dai dati puntuali di osservazione alle singole stazioni di misura.

La procedura di preparazione dei dati meteoclimatici storici da utilizzare in input al modello idrologico risulta del tutto uniforme a quanto già oggi operativo in tempo reale per i bacini del Fortore e del Candelaro.

In particolare, le serie di osservazione pluviometrica e termometrica sono state inizialmente spazializzate utilizzando il metodo dei poligoni di Thiessen con riferimento ad una griglia a maglia quadrata di lato 2 Km ottenendo quindi delle mappe tempo-varianti dei campi di precipitazione, sempre a passo orario.

Relativamente alla variabile temperatura, occorre evidenziare come, precedentemente alla procedura di interpolazione, sia stato necessario riportare ad una quota uniforme le serie di osservazione alle diverse stazioni, localizzate a diverse quote altimetriche.

Le serie puntuali osservate alle stazioni sono state quindi riportate alla quota di 0 m s.l.m. mediante un gradiente termico costante pari a 0.6°C ogni 100 m di altitudine.

I campi di precipitazione e temperatura così ottenuti sono stati successivamente mediate considerando quindi le sole celle della griglia di lato 2 Km ricadenti nel singolo bacino attraverso una semplice operazione di media algebrica.

Figura 4-5 Esempio di campo di precipitazione costruito con il metodo di Thiessen su griglia a maglia 2 Km.

Tali serie, elaborate per l'intero periodo di disponibilità dei dati, costituiscono il vero e proprio input al modello numerico.

Le serie di precipitazione sono utilizzate direttamente nel calcolo mentre le serie di temperatura, sempre relative alla quota di 0 m s.l.m., vengono ricondotte in modo automatico dal modello alla quota di ogni singola fascia altimetrica. Tale conversione è evidentemente basata sullo stesso gradiente termico già adottato in precedenza.

Sulla base del confronto tra la temperatura locale ed uno specifico valore soglia, il modello definisce pertanto, per ogni singola fascia altimetrica, se l'apporto di precipitazione corrispondente allo stesso step di calcolo avvenga in forma liquida o di neve. È pertanto possibile che all'interno dello stesso passo di calcolo, in alcune porzioni del bacino elementare si riscontri una precipitazione liquida ed in altre un apporto nevoso.

Relativamente all'evapotraspirazione potenziale, in accordo con quanto proposto in sede di offerta, è stata implementato in questa sede il più complesso algoritmo di calcolo basato sulla formulazione di Hargreaves. Mediante l'applicazione di uno specifico algoritmo, attivato anche nella piattaforma MIKE OPERATIONS, il valore di evapotraspirazione potenziale viene calcolato, oltre che in base ad altri parametri, anche in funzione della temperatura reale

registrata e prevista in ogni bacino. Tale approccio consente una più accurata e puntuale valutazione del potenziale, migliorando sensibilmente l'aderenza del sistema modellistico alla realtà fisica.

A conclusione di questo paragrafo è necessario ricordare come tutte le procedure di preparazione degli input al modello, implementate in questa fase su base manuale, saranno successivamente automatizzate nell'ambito della piattaforma di supporto decisionale operativa presso il Centro Funzionale, includendo anche le procedure di validazione dei dati stessi.

4.4 Calibrazione del modello idrologico

In assenza di stazioni idrometriche all'interno del bacino, la calibrazione del modello idrologico è stata condotta esclusivamente in riferimento al bilancio alla diga.

I parametri del modello NAM sono quindi stati calibrati sia in riferimento alla serie di portate in arrivo all'invaso, ricostruite a partire dal relativo bilancio, sia in termini di variazione complessiva dei volumi invasati.

A tal merito è doveroso evidenziare i numerosi elementi di incertezza che hanno contraddistinto questa fase di calibrazione del modello.

Tra questi risulta particolarmente influente il carattere giornaliero dei dati disponibili a cui si associa la forte incertezza nelle serie di portata ricostruite dal bilancio della diga. Molti degli eventi di sfioro o di manovra allo scarico di fondo presentano infatti una durata ed una variabilità infragiornaliera, da cui l'inevitabile incertezza derivante dall'operazione di bilancio, resa possibile solo a scala giornaliera stante il dettaglio dei dati di livello.

A questo aspetto si sommano le incertezze associate ai termini di bilancio idrologico nel ricostruire i volumi in arrivo all'invaso, in cui l'accuratezza delle serie di precipitazione (basate su un numero limitato di pluviometri fino al 2010) così come le dinamiche di evapotraspirazione risultano elementi prioritari al pari degli usi della risorsa nella porzione montana del bacino.

Complessivamente è stato possibile calibrare il modello in riferimento ai volumi ed alle dinamiche di attivazione del deflusso, prossimo allo zero per lunghi periodi dell'anno a fronte delle caratteristiche e degli usi del bacino sopra richiamati.

Non è invece stato possibile avere riscontro in termini di dinamica degli eventi di piena a scala infragiornaliera in assenza di ogni tipo di informazione a tale dettaglio. Il parametro del modello che regola il tempo di corrivazione e, di conseguenza, il valore della portata di picco, è stato quindi valutato sulla base dell'esperienza maturata su numerosi bacini con caratteristiche similari.

A seguire si presentano alcune immagini di confronto tra il dato di portata media giornaliera ricostruita in arrivo all'invaso ed il dato di portata simulato dal modello idrologico a dettaglio orario. Nell'ambito del periodo di riferimento, l'evento più gravoso è occorso a fine Novembre 2003 con una portata media giornaliera pari a circa 33 m3/s ed un picco simulato dal modello numerico pari a 70 m3/s.

In generale, gli eventi ricostruiti con il bilancio alla diga e con il modello numerico risultano sempre particolarmente contenuti a fronte delle caratteristiche del bacino sopra esposte.

Figura 4-6 Confronto tra la portata simulata dal modello idrologico a passo orario (blu) con il valore medio giornaliero dal bilancio alla diga (verde) per l'evento di fine Novembre 2003.

Figura 4-7 Confronto tra la portata simulata dal modello idrologico a passo orario (blu) con il valore medio giornaliero dal bilancio alla diga (verde) per la successione di eventi tra Ottobre e Novembre 2013.

5 C2 – Costruzione del modello idrodinamico

Il modello idrodinamico relativo al canale Cillarese risulta particolarmente semplice, stanti le caratteristiche ed il breve sviluppo del canale stesso.

Tale modello è in particolare costituito da un primo tratto atto a rappresentare l'invaso e le strutture di regolazione della diga ed un secondo tratto rappresentativo del canale a valle. Il dettaglio di tale modello è presentato nei paragrafi a seguire, preceduti dalla descrizione dell'attività in campo svolta al fine di verificare l'attendibilità delle basi topografiche disponibili.

5.1 Sopralluogo e rilievo del Canale Cillarese

Sul tratto di canale a valle della diga è stata condotta un'attività di campo (nella giornata del 27 Aprile 2018), consistente nel rilievo topografico completo (plano-altimetrico) di un numero discreto di punti ubicati lungo le sponde del canale ed a ridosso degli attraversamenti.

Il rilievo è stato effettuato mediante l'utilizzo di un GPS topografico, strumento che garantisce un'acquisizione veloce della posizione, una precisione della misura centimetrica (soglia massima d'errore posta pari a 5 centimetri).

Lo strumento è provvisto di una funzione Import/Export DXF grazie alla quale i dati rilevati in campo sono stati direttamente trasferiti in ambiente cad. e qui sovrapposti alla carta tecnica regionale correttamente georeferenziati. Questo ha permesso di ricostruire la geometria di alcune sezioni trasversali del canale e la geometria degli attraversamenti. Riguardo questi ultimi va precisato che per due di essi (SS16 e Strada comunale Pittachi) sembra irrilevante l'inserimento nel modello idraulico in quanto presentano una luce netta di diverse decine di metri, e quindi un ordine di grandezza non paragonabile con i restanti attraversamenti che presentano invece luce netta variabile nel range di 2 - 3 metri.

L'attività descritta è stata svolta con la finalità di supportare la scelta della base topografica più adeguata tra le tre a disposizione (DTM, Lidar e Progetto) e di confermare, correggere o integrare le geometrie del canale (sezioni trasversali ed attraversamenti) estratte dalle tre fonti sopra citate.

L'attività di campo ha permesso, inoltre, di constatare lo stato di fatto del canale e della sua funzionalità, documentandolo con delle foto che vengono proposte nel seguito.

Figura 5-1 Planimetria su ortofoto con indicazione dei ponti.

Nella figura sopra viene indicata la posizione in planimetria degli attraversamenti, le cui particolarità vengono mostrate nelle tabelle e foto seguenti.

Attraversamento 1 – Ponte strada locale

n° Luci	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	H estradosso [m s.l.m.]	Spessore impalcato [m]
1	14.28	4.9	4.58	1.15

Figura 5-2 Foto lato valle VM 1 (direzione da valle a monte) – Attraversamento 1 Strada locale

Figura 5-3 Foto lato monte MV 1 (direzione da monte a valle) – Attraversamento 1 Strada locale

Attraversamento 2 – Ponte Strada Statale 16

Figura 5-4 Foto lato monte MV 2 (direzione da monte a valle) – Attraversamento 2 SS16

Attraversamento 3 – Ponte Strada comunale Pittachi

Figura 5-5 Foto lato monte MV 3 (direzione da monte a valle) Attraversamento 3 Strada comunale Pittachi

Attraversamento 4 – Ponte Strada provinciale San Vito

n° Luci	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Estradosso [m s.l.m.]	Spessore impalcato [m]
1	17.56	14	3.8	1.4

Figura 5-6 Foto lato monte VM 4 (direzione da valle a monte) – Attraversamento 4 Strada provinciale San Vito

Figura 5-7 Foto lato monte MV 4 (direzione da monte a valle) – Attraversamento 4 Strada provinciale San Vito

5.2 Schematizzazione della diga del Cillarese

Il tratto “di monte” del modello idrodinamico è stato schematizzato con un numero limitato di sezioni volte a rappresentare l’invaso e la struttura.

La capacità di invaso della diga, in assenza di un rilievo delle geometrie, è stata schematizzata attraverso sezioni a geometria semplificata atte a rappresentare la curva d’invaso disponibile.

Attraverso la specifica funzionalità additional storage area offerta dal codice di calcolo MIKE 11 è stata quindi stata schematizzata un’area di invaso, crescente in funzione del livello, di capacità equivalente all’intera diga.

A tal fine si è fatto riferimento alla curva di invaso della diga, relativamente ai volumi utili, definita dal foglio di condizioni per l’esercizio e manovra reso disponibili dal Centro Funzionale.

Figura 5-8 Diagramma della curva di invaso della diga in termini di volumi e superfici.

A proposito della schematizzazione semplificata dell’invaso è opportuno evidenziare come questa risulti assolutamente adeguata alle finalità del caso, dovendo tali sezioni fittizie rappresentare esclusivamente il bilancio in termini di apporti idrologici (forniti dal modello NAM), livello nella diga e deflussi a valle e non le reali dinamiche che occorrono nell’invaso quali, ad esempio, gradienti di livello lungo il lago.

Il corretto funzionamento del comportamento dell’invaso in termini di variazioni di livello e bilancio di volumi è presentato nel paragrafo a seguire.

Il foglio condizioni ha inoltre consentito di desumere i principali dati delle opere di scarico in termini di geometria e quote di attivazione nonché le loro curve caratteristiche di funzionamento, sulle quali si è basata la verifica dell’accuratezza della schematizzazione modellistica.

La diga del Cillarese è caratterizzata da due scarichi, uno di fondo e uno di superficie a soglia fissa.

Entrambe le opere di regolazione sono state rappresentate tramite il modulo Structure Operations di MIKE 11 che consente di definire regole complesse per il funzionamento di organi di controllo.

Lo scarico di fondo è stato schematizzato attraverso una struttura di tipo Underflow, che consente di adottare un grado di apertura variabile nel tempo e di simulare, in funzione di questo e del livello nell'invaso, istante per istante, le portate esitate.

Attraverso specifiche simulazioni è stato possibile calibrare i parametri specifici della struttura implementata e verificare così il pieno rispetto da parte del modello della curva di rilascio definita nel foglio condizioni e riportata a seguire.

Figura 5-9 Diagramma delle portate esitate dallo scarico di fondo.

Lo scarico di superficie è costituito da un'unica soglia a quota fissa pari a 17.00 m slm e sviluppo pari a 25 m. Il funzionamento della soglia è stato schematizzato mediante una struttura di tipo *discharge* regolata da una scala di deflusso costante nel tempo secondo cui la portata sfiorante è funzione diretta del livello della diga, in accordo a quanto riportato nel foglio condizioni, secondo la relazione nell'immagine a seguire. Anche in questo caso, a seguito di diverse simulazioni di prova è stato appurato il buon funzionamento del modello così implementato.

Figura 5-10 Diagramma delle portate rilasciate dallo scarico di superficie in funzione del livello dell'invaso.

A completamento della schematizzazione dell'invaso, è stata inserita una serie temporale utile a rappresentare le derivazioni. Tale serie è utilizzata quale punto sorgente interno al modello, con valori di portata negativi, al fine di simulare il prelievo di acqua.

5.3 Verifica della capacità di invaso della diga

La verifica della corretta schematizzazione della capacità di invaso della diga è stata condotta sulla base di una simulazione nella quale il modello è stato alimentato da una serie in ingresso a monte costruita su un semplice calcolo algebrico a partire dalla variazione dei volumi invasati che, pur non rappresentando il reale afflusso alla diga, ha comunque permesso di riprodurre la reale oscillazione di livello nell'invaso e, quindi, verificare la corretta schematizzazione modellistica della capacità d'invaso complessiva della struttura.

È opportuno ricordare anche in questa sede come la geometria della diga sia stata rappresentata nel modello idrodinamico attraverso sezioni fittizie, associando ad una di queste la capacità d'invaso complessiva della struttura mediante la specifica funzionalità *additional storage area*.

La figura a seguire, relativa all'intero periodo di analisi, evidenzia come la schematizzazione risulti appropriata, garantendo una rispondenza ottimale tra la serie simulata e quella osservata.

Figura 5-11 Confronto tra la serie di livello registrata all'invaso del Cillarese (in verde) e simulata con il modello numerico (in nero).

5.4 Costruzione del modello idrodinamico per il tratto di valle

Il modello idrodinamico relativo al tratto di Canale a valle della diga è stato costruito sulla base delle sezioni trasversali estratte dal DTM LIDAR Ministeriale e reso disponibile dal Centro Funzionale.

L'estrazione delle sezioni dal DTM, effettuata mediante una specifica funzionalità del modulo MIKE HYDRO RIVER, ha permesso di ottenere un dato caratterizzato da una risoluzione di 2 metri, essendo questo il dettaglio spaziale del DTM a disposizione in tale area. La correttezza delle geometrie è stata confermata dall'attività di rilevamento in campo precedentemente descritta, che ha inoltre permesso di applicare una correzione alle quote spondali laddove necessario.

Le progressive che individuano ogni sezione sull'asse fluviale di riferimento sono state calcolate mediante l'ausilio dell'applicativo MIKE HYDRO RIVER.

Complessivamente, il modello idrodinamico del canale Cillarese si compone di un'unica asta di lunghezza pari a circa 4 km, descritta tramite 22 sezioni topografiche, tre delle quali utilizzate per modellare l'invaso a monte del canale ed una inserita per fini modellistici come chiusura del tratto a mare.

A seguire è presentato lo sviluppo planimetrico del modello idrodinamico inserito nel contesto di studio, unitamente al posizionamento delle sezioni trasversali.

Figura 5-12 Schema del modello idrodinamico con indicazione delle sezioni trasversali di calcolo.

Oltre che dalle sezioni topografiche, gli alvei sono stati caratterizzati in base al parametro di scabrezza, assunto costante lungo la progressiva curvilinea del modello e variabile, trasversalmente, tra alveo inciso e golena, definendone un valore di riferimento generale nel file .hd11 ed opportuni coefficienti divisori nel database delle sezioni (file .xns11).

Non essendo presente alcuna stazione idrometrica utile per la calibrazione, il valore del parametro di scabrezza lungo il canale Cillarese è stato assunto pari a 50 $m^{1/3}/s$, caratteristico per un canale in calcestruzzo come quello in esame, in condizioni di manutenzione non ottimali e presenza di vegetazione rada.

Quale condizione al contorno di monte è stata assunta una portata minima in corrispondenza della prima sezione dell'asta, al fine di garantire un minimo deflusso per la stabilità del modello numerico. Quale condizione al contorno di valle è stato invece impostato un livello costante pari a 0.5 m slm in corrispondenza del mare.

Oltre alle condizioni al contorno, il modello idrodinamico è stato collegato direttamente al modulo idrologico precedentemente descritto. Gli apporti idrologici calcolati sul bacino elementare del modello NAM in termini di deflusso superficiale, ipodermico e di falda sono quindi collegati al tratto del modello idrodinamico in modo concentrato in un'unica sezione posta all'inizio del bacino.

Come anticipato, in assenza di termini di riscontro diretti, non è stato possibile condurre una calibrazione specifica per il modello idrodinamico.

5.5 Risultanze delle simulazioni con il modello idrodinamico

Il modello idrodinamico così come descritto in precedenza è stato utilizzato per svolgere una serie di simulazioni a portata costante, che hanno permesso di valutare la capacità massima, in termini di portata, del canale a valle della diga. Sulla base di queste simulazioni è stato appurato che il canale è in grado di garantire il deflusso con assenza di esondazioni di una portata fino a circa **50 m^3/s**. Per valori di portata superiori a tale soglia, iniziano a verificarsi esondazioni localizzate tali da interferire con infrastrutture strategiche come dettagliato nel capitolo relativo allo studio bidimensionale.

Ulteriori simulazioni hanno consentito di verificare come portate fino a 15 m^3/s garantiscano costantemente un franco di sicurezza pari ad 1 metro; tale valore risulta dimezzato in corrispondenza di un deflusso pari a 30 m^3/s.

Nella seguente immagine si presentano livelli di deflusso per portate pari a 15, 30 e 50 m^3/s unitamente ai profili di fondo ed arginali.

In ultimo, è doveroso ricordare come, non essendo presente alcuna stazione idrometrica e non essendo disponibile alcuna misura di portata nel tratto di studio, non è stato ad oggi possibile procedere con una calibrazione di dettaglio del modello idrodinamico.

Figura 5-13 Profili di corrente ed arginali per il Canale Cillarese (Blu: 15 m^3/s, Arancio: 30 m^3/s, Rosso: 50 m^3/s, nero: profili arginali)

5.6 Soglie di allertamento

Come noto, il sistema di allertamento operativo presso il Centro Funzionale della Regione Puglia si basa, tra le altre cose, su una serie di soglie espresse in termini di portate e livelli in corrispondenza delle principali stazioni strumentate e tratti di corsi d'acqua.

Il termine di confronto delle soglie è definito sia dai dati di osservazione idrometrica sia dai risultati delle simulazioni idrologiche ed idrauliche gestite in tempo reale dalla piattaforma MIKE OPERATIONS.

La definizione delle soglie segue una logica già condivisa e comune a tutti i bacini per i quali è operativa la piattaforma, come segue:

- **Allerta gialla** – portate significative ma acqua solo nell'alveo inciso, senza allagamenti, nemmeno dei campi; in corrispondenza dei tratti arginati o di attraversamenti, tale soglia identifica il raggiungimento di un franco di sicurezza residuo pari a 1 metro;
- **Allerta arancione** - possibili allagamenti dei campi e attraversamenti minori in possibile crisi; in corrispondenza dei tratti arginati o di attraversamenti, tale soglia identifica il raggiungimento di un franco di sicurezza residuo pari a mezzo metro;
- **Allerta rossa** - allagamento di aree ampia con livelli elevati e interessamento delle grandi opere. Rischio per la popolazione. In corrispondenza dei tratti arginati o di attraversamenti, tale soglia identifica il possibile annullamento del franco di sicurezza.

Nel caso specifico del Canale Cillarese a valle dell'invaso, a fronte della limitata estensione e dell'assenza di una stazione di misura, risulta opportuno definire le soglie esclusivamente in termini di portata ed in riferimento al criterio relativo ai tratti arginati.

Sulla base delle risultanze delle analisi idrauliche di cui al paragrafo precedente, peraltro confermate poi dal modello bidimensionale, si propongono pertanto le soglie di cui nella successiva tabella.

Tabella 5.1 Soglie di allertamento proposte per il Canale Cillarese

Soglia	Q [m^3/s]
Gialla	15
Arancione	30
Rossa	50

Tali soglie risultano peraltro coerenti anche con le logiche relative all'interessamento delle infrastrutture, data la presenza del parco nelle aree perifluviali, direttamente interessate in caso di superamento dei livelli arginali nel canale.

Ad integrazione dei valori di portata relativi al canale a valle della diga, nel caso di introduzione di limitazioni ai livelli di invaso per scopi di laminazione, si suggerisce l'adozione di una logica di soglie di allertamento anche per i livelli del lago, quali precursori di possibili condizioni di sfioro a valle.

6 C3 – Analisi degli apporti all'invaso

6.1 Ricostruzione delle portate storiche con il modello idrologico

Al fine di supportare la scelta delle regole di gestione dell'invaso per fini di laminazione, è necessario disporre di una serie di portate e volumi in ingresso all'invaso sufficientemente estesa nel tempo, tale da poterne consentire l'analisi statistica.

Nel caso dell'invaso del Cillarese, le portate in ingresso all'invaso sono state in prima istanza ricostruite a partire dall'analisi del bilancio alla diga come dettagliato nell'ambito dell'attività C1. Tale procedura ha consentito di ricostruire la serie di portate, a passo giornaliero, per il periodo da Maggio 2000 a Dicembre 2017.

Al fine di disporre di una serie più estesa nel tempo, si è successivamente proceduto per via modellistica.

Il modello idrologico sviluppato e calibrato nell'ambito dell'attività C1 è stato infatti utilizzato nuovamente per ricostruire le portate in arrivo alla sezione dell'invaso per il periodo dal 1976 al 2000 sulla base dei dati di precipitazione, a passo giornaliero, per le stazioni di Brindisi, Latiano, San Pancrazio Salentino e San Pietro Vernotico, disponibili dal 1976 al 2013.

I dati di precipitazione storici sono stati in primo luogo interpolati sul bacino al fine di calcolare la serie di precipitazione media da utilizzare in input al modello. Successivamente, tale serie è stata modificata in corrispondenza degli eventi di precipitazione più significativi, assumendo una distribuzione del campo di precipitazione, a pari cumulata, solo su metà giornata, ordine di grandezza del tempo di corrivazione del bacino, ipotizzando quindi una intensità doppia rispetto al valore medio giornaliero registrato.

Tale procedura, poco influente al fine del calcolo dei volumi in arrivo all'invaso, risulta invece utile e ragionevolmente cautelativa ai fini della ricostruzione degli eventi di sfioro teoricamente occorsi in tale periodo, di cui al capitolo successivo, rendendo più verosimili gli idrogrammi di portata in arrivo alla diga.

Ai fini di tale simulazione, si è inoltre proceduto, in assenza di dati specifici, anche ricostruendo una serie di evapotraspirazione potenziale media, su base mensile, a partire dai dati calcolati con la formula di Heargraves nel periodo 2000-2017.

Utilizzando il modello numerico è stato quindi possibile estendere la serie relativa alle portate in arrivo all'invaso all'intero periodo dal 1976 al 2017 per un totale di 42 anni, periodo più che sufficiente per le finalità del caso.

Le serie ricostruite a partire dai due metodi di calcolo (modello idrologico e bilancio all'invaso) sono state confrontate relativamente al periodo di sovrapposizione, dal 2000 al 2013, evidenziando una buona coerenza sia in termini di valori assoluti sia di volumi complessivi, a riprova della adeguatezza dell'approccio adottato.

La figura a seguire presenta la serie complessiva delle portate ricostruite in arrivo all'invaso, che evidenzia valori di picco contenuti, come già anticipato. Il valore massimo in termini di portata al colmo si registra in corrispondenza dell'evento di Marzo 2003 già presentato nell'ambito dell'attività C1, con un picco pari a circa 70 m^3/s.

Figura 6-1 Serie di 42 anni delle portate in arrivo all'invaso.

Ulteriori eventi significativi si registrano nel Novembre 1976, con valore massimo prossimo a 35 m^3/s ed a Febbraio 1996, con picco prossimo a 40 m^3/s. Entrambi questi eventi sono stati ricostruiti sulla base dei valori di precipitazione media giornaliera, sotto l'ipotesi di distribuzione delle piogge sopra esposta.

Anche a fronte degli eventi modesti così ricostruiti, in aggiunta alle analisi modellistiche di cui sopra, si è proceduto a condurre una analisi statistica delle precipitazioni, di cui al paragrafo successivo, nonché ad acquisire i dati derivanti dallo specifico studio dell'Autorità di Bacino, a seguire.

6.2 Analisi statistica delle precipitazioni

Nel seguito si riportano le analisi statistiche delle precipitazioni sul bacino idrografico sotteso alla diga del Cillarese e rappresentato nella figura che segue in cui si riportano anche le curve di livello ogni 25 metri.

Figura 6-2 Bacino idrografico sotteso alla diga del Cillarese

Il bacino oggetto di interesse ha una superficie di circa 152 km2 e interessa i territori comunali di Oria, Torre Santa Susanna, Brindisi e Mesagne; esso è caratterizzato da una quota minima di circa 12 m.s.l.m., da una quota massima di circa 114 m.s.l.m. e da una quota media di circa 60.7 m.s.l.m.; la copertura del suolo è prevalentemente composta da colture annuali associate a colture permanenti (circa il 52%), da vigneti (circa il 25%), da seminativi in aree non irrigue (circa il 8,8 %) e da oliveti (circa il 7.7%).

Per le analisi statistiche si sono scelte le stazioni pluviometriche di: Brindisi, Latiano, San Pietro Vernotico e San Pancrazio Salentino, caratterizzate da serie storiche significative e poligoni di Thiessen interferenti con il bacino oggetto di analisi, come da immagine a seguire.

Figura 6-3 Bacino idrografico e poligoni di Thiessen.

Nei paragrafi che seguono si riportano le curve di pioggia individuate per i tempi di ritorno di 5, 10, 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni ottenute sia seguendo la procedura Vapi l'approccio statistico classico che seleziona la migliore distribuzione tra quelle usualmente utilizzate per lo studio delle precipitazioni, mediante applicazione dei test statistici. Si riporta infine l'analisi dei trend pluviometrici per alcune stazioni significative, localizzate in prossimità del bacino oggetto di studio.

6.2.1 Curve di pioggia mediante procedura regionale Vapi

La valutazione della massima precipitazione al variare del tempo di ritorno è stata svolta rifacendosi alla metodologia proposta nel Progetto Vapi dal Gruppo Nazionale Difesa delle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche nell'ambito degli studi per la "Analisi regionale dei massimi annuali delle precipitazioni di diversa durata" effettuati da Claps et al., 19941per il territorio della Puglia settentrionale.

Il modello statistico utilizzato fa riferimento alla distribuzione TCEV (Rossi et al., 1984)2 con regionalizzazione di tipo gerarchico (Fiorentino et al., 1987)3. Il valore Pd,T del massimo annuale di precipitazione di assegnato tempo di ritorno per una prefissata durata, viene espresso come prodotto tra il suo valore medio m_t ed una quantità K_T, detta fattore probabilistico di crescita, funzione del periodo di ritorno T, definita dal rapporto:

$$K_T = \frac{P_{d,T}}{m_t}$$

La curva di distribuzione di probabilità del suddetto rapporto corrisponde alla curva di crescita, che ha caratteristiche regionali in quanto è unica nell'ambito della regione nella quale sono

costanti i parametri della TCEV legati al coefficiente di asimmetria ed al coefficiente di variazione.

Pertanto, fissati i parametri di forma e di scala della distribuzione di probabilità cumulata, all'interno della zona pluviometrica omogenea previamente identificata al secondo livello di regionalizzazione, è possibile esprimere la relazione tra il tempo di ritorno T ed il fattore di crescita KT, ritenendo trascurabile la sua variabilità con la durata.

Con il terzo livello di regionalizzazione viene analizzata la variabilità spaziale del parametro di posizione delle serie storiche in relazione a fattori locali, consentendo di proporre la stima dei valori medi dei massimi annuali di precipitazione anche in siti sprovvisti di stazioni di misura o con serie storica di lunghezza ridotta.

Nell'analisi delle piogge orarie, per ogni sito è possibile legare il valore medio mt dei massimi annuali della precipitazione media di diversa durata t alle durate stesse, attraverso la relazione:

$$m_t = at^n$$

essendo *a* ed *n* i due parametri della curva di probabilità pluviometrica, variabili da sito a sito.

L'analisi di terzo livello per la Puglia Centro–Settentrionale riportata in Claps et al., 1994[1], e successivamente quella effettuata per la Puglia Centro-Meridionale, riportata in Castorani e Iacobellis, 2001[4], ha portato alla individuazione di sei zone omogenee per il territorio regionale e delle rispettive curve di possibilità climatica espresse nell'unica relazione di seguito riportata:

$$m(t,z) = a\,t^{(C\cdot h + D + \ln\alpha - \ln a)/\ln 24}$$

dove *t* è la durata della precipitazione e z è la quota del sito; i parametri della suddetta relazione sono riportati nella seguente Tabella 6.1 per la puglia settentrionale e meridionale.

Tabella 6.1 Parametri delle curve di pioggia media per la Puglia.

Zona	α	a	C	D	n
1	0.89	28.66	0.00503	3.959	-
2	"	22.23	-	-	0.247
3	"	25.325	0.00053	3.81	-
4	"	24.7	-	-	0.256
5	"	28.2	0.0002	4.08	-
6	"	33.7	0.0022	4.12	-

Come si può evincere osservando la figura successiva, il bacino oggetto di studio così come le stazioni pluviometriche analizzate rientrano nella zona omogenea 6.

Figura 6-4 Zone omogenee e stazioni pluviometriche.

Pertanto è stato possibile ricavare stazione per stazione i valori della precipitazione media m_t in funzione della loro posizione e della quota sul livello del mare. Dal valore di m_t è possibile ricavare il valore della pioggia massima per prefissato tempo di ritorno a partire della conoscenza del fattore probabilistico di crescita K_T per il quale si sono utilizzati i valori riportati nella seguente tabella (valida per la Puglia meridionale e riportata in Castorani and Iacobellis V., 2001[4]), ottenuti invertendo per ciascun tempo di ritorno la distribuzione di probabilità del fattore di crescita.

Tabella 6.2 Valori del fattore di crescita per la puglia settentrionale.

T	5	10	20	30	40	50	100	500	1000
K_T	1.26	1.53	1.82	2.00	2.13	2.23	2.57	3.38	3.73

A questo punto il valore della pioggia massima $P_{d,T}$ è stato calcolato effettuando il prodotto della precipitazione media, m_t, per il fattore di crescita, K_T. Da qui è stato possibile ricostruire le curve di pioggia per le varie stazioni pluviometriche analizzate e per i differenti tempi di ritorno di 5, 10, 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni, riportate a seguire.

Figura 6-5 Curve di pioggia per le differenti stazioni pluviometriche analizzate.

Nella figura che segue si riportano le curve di pioggia del bacino del Cillarese sotteso alla diga, ricavate applicando la procedura sopra descritta all'intero bacino idrografico e considerando che esso ricade interamente nella zona 6.

Figura 6-6 Curve di pioggia per il bacino del Cillarese.

6.2.2 Curve di pioggia mediante procedura classica

Per la valutazione delle curve segnalatrici di possibilità pluviometrica in corrispondenza dei tempi di ritorno di 5, 10, 30, 50, 100, 200, 500 e 1000 anni, è stato necessario effettuare innanzitutto la raccolta dagli Annali Idrologici (messi a disposizione dal Centro Funzionale Decentrato del Settore di Protezione Civile della Regione Puglia della Regione Puglia) delle altezze delle massime precipitazioni annue, rilevate nelle stazioni pluviometriche oggetto di studio i cui poligoni di Thiessen interessano il bacino del Cillarese chiuso alla diga (Brindisi, Latiano, San Pietro Vernotico e San Pancrazio Salentino). Sono state quindi estratte le serie storiche di precipitazione massima annua di durata rispettivamente pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore con cui è stato possibile costruire per ogni stazione pluviometrica analizzata i cinque "vettori campionari" utili all'analisi probabilistica. In particolare, si sono prese in considerazione le serie storiche disponibili fino all'anno 2012.

Applicando i mezzi che la statistica idrologica in questo caso propone è stata individuata la possibile popolazione di appartenenza di ciascun vettore scegliendo opportunamente le particolari distribuzioni di probabilità idonee a meglio rappresentare la frequenza cumulata relativa di ciascun vettore campionario. A riguardo, la statistica idrologica indica proponibili, nel caso che ci occupa, la distribuzione Lognormale, quella di Gumbel, quella di Frechét e la distribuzione Gamma (le cui espressioni sono riportate in tabella), per le quali sono stati individuati i relativi parametri (riportati in tabella successiva) mediante applicazione del metodo della massima verosimiglianza a partire dalla stima dei momenti dei vettori campionari.

Tabella 6.3 Espressioni analitiche delle distribuzioni adottate.

GUMBEL	$F(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x-u))]$
FRECHET	$F(x) = \exp[-(x/u_f)^{-k}]$
LOGNORMALE	$F(x) = \frac{1}{\sigma(\ln(x))\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{x} \exp[-\frac{(\ln(x)-\mu(\ln(x))^2}{2\sigma(\ln(x))^2}] dx$
GAMMA	$F(x) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} \int_0^x x^{a-1} \exp[-\frac{x}{b}] dx$
F rappresenta la probabilità di non superamento associata alla variabile altezza di pioggia, x.	

Tabella 6.4 Parametri delle distribuzioni adottate.

Brindisi						
		t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
GUMBEL	α	0.11	0.08	0.06	0.06	0.05
	u	25.53	33.25	40.57	48.17	56.32
FRECHET	k	2.77	2.76	2.69	2.88	2.70
	u_f	23.87	30.97	37.64	45.17	52.57
LOGNORMALE	μ	3.36	3.63	3.83	4.00	4.15
	σ	0.39	0.40	0.42	0.39	0.38
GAMMA	a	6.74	6.11	5.66	6.72	7.26
	b	4.63	6.71	8.92	8.76	9.40

Latiano						
		t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
GUMBEL	α	0.12	0.09	0.07	0.06	0.05
	u	24.89	32.77	39.40	47.79	57.23
FRECHET	k	2.84	2.67	2.56	2.88	2.73
	u_f	23.39	30.58	36.69	44.94	53.34
LOGNORMALE	μ	3.33	3.60	3.79	3.99	4.17
	σ	0.35	0.34	0.35	0.37	0.40
GAMMA	a	8.28	9.52	8.60	7.01	6.37
	b	3.59	4.07	5.45	8.27	11.02

San Pietro Vernotico						
		t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
GUMBEL	α	0.09	0.06	0.05	0.05	0.04
	u	27.66	39.40	47.20	52.66	63.04
FRECHET	k	2.39	2.36	2.40	2.67	2.76
	u_f	25.33	35.68	43.48	48.59	58.93
LOGNORMALE	μ	3.45	3.80	3.98	4.09	4.27
	σ	0.42	0.47	0.41	0.45	0.40
GAMMA	a	5.87	4.34	6.25	4.73	6.19
	b	5.84	11.65	9.29	14.16	12.51

San Pancrazio Salentino						
		t = 1 ora	t = 3 ore	t = 6 ore	t = 12 ore	t = 24 ore
GUMBEL	α	0.09	0.06	0.05	0.05	0.05
	u	29.66	39.07	47.20	56.56	66.71
FRECHET	k	2.28	2.54	2.40	2.80	3.16
	u_f	27.18	36.12	43.48	52.95	63.31
LOGNORMALE	μ	3.51	3.79	3.98	4.16	4.31
	σ	0.40	0.42	0.41	0.38	0.33
GAMMA	a	6.64	5.71	6.25	7.26	9.38
	b	5.45	8.50	9.29	9.44	8.41

È stato così possibile testare per ogni stazione analizzata, l'ipotesi di appartenenza di ciascuno dei cinque vettori campionari a ciascuna delle quattro distribuzioni proposte utilizzando il test di Pearson. In tabella a seguire si riporta il confronto tra i valori ottenuti (χ^2) applicando il test suddetto alle quattro distribuzioni analizzate ed il limite (χ_o^2) definito applicando il livello di significatività (ovvero la probabilità di rigettare una ipotesi vera) del 5%. Su tale base si è scelta per la distribuzione che statisticamente meglio interpreta le caratteristiche dei campioni delle stazioni analizzate. In particolare, per la stazione di Brindisi è stata scelta la distribuzione di Gumbel, per la stazione di Latiano è stata scelta la distribuzione Lognormale, e per le stazioni di San Pietro Vernotico e San Pancrazio Salentino la distribuzione Gamma.

Tabella 6.5 Confronto tra i valori ottenuti dal test di Pearson ed il valore limite.

Brindisi (Quota: 22 m.s.l.m.)					
Durata (ore)	1	3	6	12	24
media	31.20	40.96	50.48	58.85	68.21
deviazione standard	12.57	18.42	23.47	24.32	26.18
	Test di Pearson (χ^2)				
Distribuzione di Gumbel	10.00	10.40	7.60	6.40	4.80
Distribuzione di Frèchet	8.00	16.40	10.00	12.80	16.80
Distribuzione Lognormale	13.20	10.40	5.60	7.60	7.20
Distribuzione Gamma	8.40	4.80	14.80	9.60	7.20
Soglia χ_o^2	18.31	18.31	18.31	18.31	18.31

Latiano (Quota: 114 m s.l.m.)					
Durata (ore)	1	3	6	12	24
media	29.77	38.69	46.86	57.93	70.24
deviazione standard	10.58	11.95	15.96	24.52	30.22
	Test di Pearson (χ^2)				
Distribuzione di Gumbel	1.50	14.63	6.38	4.50	7.76
Distribuzione di Frèchet	7.88	29.25	20.63	4.88	5.55
Distribuzione Lognormale	1.50	10.50	6.38	6.00	4.45
Distribuzione Gamma	3.75	10.88	4.13	5.63	5.92
Soglia χ_o^2	12.59	12.59	12.59	12.59	12.59

SanPietroVernotico (Quota: 49 m.s.l.m.)					
Durata (ore)	1	3	6	12	24
media	34.27	50.61	58.04	66.95	77.45
deviazione standard	14.58	28.34	24.10	36.32	35.37
	Test di Pearson (χ^2)				
Distribuzione di Gumbel	12.26	3.33	5.26	12.30	6.00
Distribuzione di Frèchet	10.40	8.53	9.17	7.22	1.60
Distribuzione Lognormale	11.51	5.56	4.87	9.17	4.80
Distribuzione Gamma	5.56	2.21	4.09	8.78	10.80
Soglia χ_o^2	11.07	11.07	12.59	12.59	12.59

SanPancrazioSalentino (Quota: 69 m.s.l.m.)					
Durata (ore)	1	3	6	12	24
media	36.21	48.60	58.04	68.53	78.81
deviazione standard	14.00	21.87	24.10	26.58	27.08
	Test di Pearson (χ^2)				
Distribuzione di Gumbel	2.55	7.61	5.26	1.83	9.49
Distribuzione di Frèchet	8.73	4.87	9.17	4.51	9.87
Distribuzione Lognormale	1.82	4.09	4.87	2.21	9.49
Distribuzione Gamma	4.00	5.26	4.09	3.74	8.34
Soglia χ_o^2	11.07	12.59	12.59	12.59	12.59

Definita per ogni stazione di misura la distribuzione di probabilità di appartenenza di ciascuno dei 5 vettori campionari, facendo variare T da 5 a 1000 anni e prendendo in considerazione durate del tempo di pioggia pari a 1, 3, 6, 12 e 24 ore, sono state individuate le "altezze ridotte di pioggia" ossia le particolari altezze che, al variare della durata *d*, hanno tempo di ritorno costante e opportunamente prefissato. Ciò è possibile utilizzando la nota relazione che esprime il tempo di ritorno come l'inverso del complemento ad uno della probabilità di non superamento F. Tutto ciò ha consentito l'individuazione, al variare di T, delle varie curve di possibilità pluviometrica.

Le figure che seguono rappresentano le curve segnalatrici costruite per i differenti tempi di ritorno analizzati per le stazioni meteoriche prese in considerazione, mentre nella figura successiva si riportano le curve di pioggia ottenute per il bacino del Cillarese, calcolate (per ogni tempo di ritorno) come media pesata delle precipitazioni massime orarie delle differenti stazioni pluviometriche in ragione delle aree dei relativi poligoni di Thiessen.

Figura 6-7 Curve di pioggia calcolate per le stazioni pluviometriche afferenti al bacino del Cillarese.

Figura 6-8 Curve di pioggia per il bacino del Cillarese.

6.2.3 Analisi dei trend pluviometrici sulle serie storiche giornaliere

L'analisi statistica dei trend pluviometrici è stata condotta sulle serie storiche dei massimi annuali delle precipitazioni giornaliere disponibili sino al 2016 fornite dal Centro Funzionale Decentrato del Settore di Protezione Civile della Regione Puglia. Di seguito si riportano i dettagli relativi alle stazioni di misura pluviometriche prese in considerazione per il bacino sotteso alla diga del Cillarese.

Tabella 6.6 Caratteristiche delle stazioni pluviometriche analizzate.

Nome stazione	Quota (m s.l.m.)	latitudine	longitudine	Anno inizio registrazioni
Brindisi	22	40° 32' 41" N	17° 55' 37" E	1877
Latiano	114	40° 32' 54,83" N	17° 42' 35,35" E	1925
San Pancrazio Salentino	69	40° 25' 6,74" N	17° 50' 23,59" E	1922
San Pietro Vernotico	49	40° 28' 50,25" N	18° 0' 5,29" E	1922

Si è quindi proceduto ad una caratterizzazione quantitativa della qualità delle serie stesse, associando ad un'analisi visuale (la exploratory data analysis) una serie di misure oggettive, quali la lunghezza, la continuità e la completezza, essendo queste ultime già definite in precedenza. Di seguito si riportano le principali caratteristiche delle serie storiche analizzate:

Tabella 6.7 Principali caratteristiche delle serie storiche analizzate.

Nome stazione	Anno inizio serie	Lunghezza serie	Numero di dati	Dati mancanti	Intervalli di dati mancanti	completezza	continuità
Brindisi	1921	96	80	16	9	83.33%	81.25%
Latiano	1925	92	72	20	13	78.26%	71.74%
San Pancrazio Salentino	1938	79	68	11	8	86.07%	79.75%
San Pietro Vernotico	1923	94	81	13	12	86.17%	74.47%

Come è possibile osservare dalla tabella precedente, solo per la stazione di Brindisi si verificano valori di continuità e completezza superiori all'80%; da ciò, al fine di migliorare l'attendibilità dell'analisi condotta, si è scelto di considerare, per ogni serie storica, la porzione successiva al 1950, con conseguente miglioramento delle loro qualità complessive, come è evidente dalla tabella successiva.

Tabella 6.8 Principali caratteristiche delle serie storiche analizzate.

Nome stazione	Anno inizio serie	Lunghezza serie	Numero di dati	Dati mancanti	Intervalli di dati mancanti	completezza	continuità
Brindisi	1950	67	64	3	3	95.52%	91.04%
Latiano	1950	67	58	9	7	86.57%	79.10%
San Pancrazio Salentino	1950	67	60	7	7	89.55%	79.10%
San Pietro Vernotico	1950	67	62	5	4	92.54%	88.06%

È interessante notare come la qualità delle serie storiche aumenti in maniera marcata, portando ad avere ottime performances nella stazione di Brindisi. Tale sito è stato, quindi, prescelto per condurre l'analisi statistica oggetto del presente paragrafo.

6.2.4 Analisi dei trend e dei change-points

Si riportano di seguito le valutazioni effettuate per la stazione di Brindisi; nella figura seguente si riporta la serie cronologica delle precipitazioni massime giornaliere per la suddetta stazione, con l'indicazione di possibili trend.

Figura 6-9 Serie cronologica delle precipitazioni massime giornaliere per la stazione di Brindisi.

Le analisi di trend e change point effettuate sull'intera serie storica dei massimi annuali di precipitazione giornaliera (1950 – 2016) suggeriscono di accettare l'ipotesi nulla per il test CUSUM; ciò è indicativo di un probabile change point, che considerazioni condotte sui valori medi delle sub-serie portano a ritenere che possa localizzarsi nel 1980.

	Statistica	p-value
CUSUM	216.41	0.001
Pettitt test	231	0.300
Mann-Kendall	0.31	0.759

Si riportano di seguito i parametri del modello GEV non-stazionario per la serie storica di Brindisi 1950-2016:

ζ_0	ζ_1	α	k
50.361	-0.034	15.89	0.19

Le analisi di trend effettuate sulla intera serie storica dei massimi annuali di precipitazione giornaliera (1950 – 2016) confermano il rigetto dell'ipotesi nulla per i test di Mann-Kendall ovvero la presenza di un significativo trend negativo.

	Statistica	p-value
Mann-Kendall	2.058	0.040

Si riportano di seguito i parametri del modello GEV non-stazionario per la serie storica di Brindisi 1980-2016:

ζ_0	ζ_1	α	k
40.740	0.406	15.838	0.244

Le analisi di trend effettuate sulla serie storica parziale dei massimi annuali di precipitazione giornaliera (1980 – 2016) confermano il rigetto dell'ipotesi nulla per i test di Mann-Kendall ovvero la presenza di un significativo trend positivo.

6.3 Analisi delle portate statistiche con il modello idrologico

Le precipitazioni determinate con il metodo VAPI sono state utilizzate in input al modello idrologico sviluppato nell'ambito dell'attività C2 al fine di ricostruire i relativi idrogrammi di piena in arrivo all'invaso.

L'analisi è stata condotta in riferimento a diverse durate dell'evento e tempi di ritorno, individuando la durata pari ad 8 ore come la più critica per il bacino. La seguente figura presenta, a titolo di esempio, i risultati dell'analisi condotta in riferimento a diverse durate ed al tempo di ritorno di 200 anni, in corrispondenza del quale il modello simula una portata al colmo pari a circa 110 m^3/s.

Figura 6-10 Idrogrammi simulati dal modello idrologico sollecitato con le precipitazioni per assegnato tempo di ritorno, per diverse durate dell'evento (nera d=6 ore, blu d=8ore, verde d=10 ore, rosso d=12 ore, azzurro d=14 ore, fucsia d=16 ore).

Gli idrogrammi così calcolati sono risultati inferiori, in termini di portata al picco, rispetto a quelli calcolati dall'Autorità di Bacino, di cui al paragrafo successivo. Tali differenze possono essere ricondotte principalmente alla scarsità di dati utili per la calibrazione del modello e per le analisi idrologiche in genere, come già ampiamente discusso in precedenza. A fronte di tale circostanza, per il proseguo delle attività si è ritenuto più cautelativo procedere facendo riferimento, in termini di eventi statistici, agli idrogrammi calcolati dall'Autorità di Bacino, di cui a seguire.

6.4 Lo studio dell'Autorità di Bacino

Ad integrazione delle attività presentate nei paragrafi precedenti, ed a fronte dei limitati dati di riscontro disponibili per le analisi e simulazioni idrologiche condotte, si è ritenuto importante in questa sede acquisire le risultanze dello "Studio per la definizione delle opere necessarie alla messa in sicurezza del reticolo idraulico interessato dagli eventi alluvionali di ottobre e novembre 2005 nelle province di Bari e Brindisi", condotto dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia, il cui ultimo aggiornamento disponibile risale al Dicembre 2012.

Nell'ambito di tale Studio, sono state condotte una serie di analisi di tipo idrologico e idraulico finalizzate alla valutazione del rischio per numerosi corsi d'acqua minori, tra cui il Canale Cillarese.

In particolare, per quanto di interesse in questa sede, l'analisi ha visto la determinazione delle portate per assegnato tempo di ritorno in corrispondenza di numerose sezioni di riferimento nel bacino del Cillarese, tra le quali lo sbarramento, e l'analisi idraulica, anche con approccio bidimensionale, dei vari tratti del reticolo idraulico, con la relativa valutazione delle condizioni di rischio per le aree perifluviali e le opere di attraversamento.

Nella successiva immagine si riportano quindi gli idrogrammi calcolati dall'Autorità di Bacino per diverso tempo di ritorno in corrispondenza dell'invaso, presi a riferimento nell'ambito dell'attività C4 di cui a seguire.

Tali idrogrammi risultano infatti più cautelativi, in termini di portate al picco, rispetto a quelli calcolati con il modello idrologico sollecitato con le precipitazioni per assegnato periodo di ritorno.

In particolare, l'evento trentennale è stimato con portata al colmo poco superiore a 100 m^3/s. Gli eventi con T= 200 e T=500 anni hanno invece rispettivamente portate di picco pari a 193 e 240 m^3/s.

Tali valori risultano peraltro coerenti con la serie di portate ricostruite con il modello idrologico di cui sopra, con picco di portata pari a circa 70 m^3/s nel periodo di 42 anni di simulazione.

Relativamente a tali valori è inoltre opportuno evidenziare come gli stessi non tengano conto degli interventi di messa in sicurezza per il Comune di Mesagne. Se da un lato tali interventi, in fase di progettazione alla data di redazione del presente elaborato, determineranno una riduzione delle esondazioni a monte e, quindi un incremento delle portate verso valle, dall'altro includono anche la realizzazione di case di laminazione che potranno ridurre i valori al colmo in arrivo all'invaso.

Le risultanze dello stesso studio dell'AdB, in termini di analisi idraulica, sono state utilizzate anche nelle successive fasi di lavoro, ed in particolare nell'ambito delle attività C5 e C6, come dettagliato nel seguito.

Figura 6-11 Idrogrammi per assegnato tempo di ritorno alla sezione della diga, calcolati dall'AdB.

7 C4 – Scenari di gestione dell'invaso

7.1 Analisi dei rilasci dall'invaso allo stato attuale

Al fine di supportare la scelta più appropriata delle regole del Piano di Laminazione, è stata condotta una analisi preventiva relativamente alle dinamiche di riempimento e conseguenti rilasci dall'invaso, in riferimento alle modalità di esercizio attuali, quindi in assenza del Piano di Laminazione.

Come dettagliato a seguire, le valutazioni sono state condotte inizialmente a partire dalle risultanze delle analisi dell'attività C3, nell'ambito della quale è stato possibile ricostruire la serie relativa alle portate in arrivo alla diga per un totale di 42 anni, simulando con l'ausilio del modello numerico, le dinamiche di riempimento e sfioro su tale periodo esteso.

Successivamente sono state condotte le stesse analisi anche in relazione agli eventi sintetici per assegnato tempo di ritorno.

L'analisi delle portate sfiorate, unitamente alle condizioni di rischio a valle, costituisce il punto di partenza per la valutazione delle strategie di laminazione che devono garantire un adeguato compromesso tra la sicurezza idraulica a valle e la perdita di volumi disponibili per l'invaso.

Prima di procedere all'analisi delle dinamiche di riempimento e sfioro è opportuno in questa sede ricordare le caratteristiche ed il funzionamento della soglia di superficie della diga. La diga del Cillarese presenta un'unica soglia sfiorante della larghezza di 25 metri e senza ulteriore possibilità di regolazione.

Come evidenziato dall'immagine a seguire, derivata dal Foglio Condizioni, le portate sfiorate verso valle crescono rapidamente all'aumento del livello di invaso oltre la quota di 17.00 m s.l.m. In corrispondenza di un battente di poco superiore al metro si determinano già condizioni di incipiente esondazione a valle.

I livelli possono essere controllati, oltre che tramite la derivazione, anche mediante lo scarico di fondo, che permette di esitare portate nell'ordine di 15 m^3/s in corrispondenza della quota di massima regolazione.

Figura 7-1 Regola dello scarico di superficie.

7.1.1 Impostazione delle simulazioni "storiche"

Utilizzando il modello idraulico già introdotto nell'ambito dell'attività C1 si è proceduto a simulare il comportamento dell'invaso, in termini di progressivo riempimento e sfioro, sull'intero periodo dal 1976 al 2017 per un totale di 42 anni.

In questo contesto è opportuno evidenziare come:

- le portate in arrivo alla diga per il periodo dal 1976 al 2000 siano state ricostruite mediante applicazione del modello idrologico alimentato con le precipitazioni a scala giornaliera rielaborate in corrispondenza degli eventi più gravosi, come dettagliato nell'ambito dell'attività C3;
- tramite analisi del bilancio della diga, sia stato possibile ricostruire le portate in arrivo all'invaso per il periodo dal 2000 al 2017, su base giornaliera;
- per tale periodo siano stati resi disponibili dal Consorzio ASI anche i dati relativi ai livelli massimi raggiunti durante l'evento ed il dettaglio delle portate sfiorate, sebbene tale serie risulti non completa per l'intero periodo di riferimento;
- per lo stesso periodo sia stato possibile ricostruire le stesse portate del periodo 2000-2017 con il modello idrologico, in questo caso alimentato con precipitazioni a passo orario. Rispetto a quanto sopra, questa seconda serie di portate presenta quindi una maggiore risoluzione temporale ma, nello stesso tempo, l'incertezza derivante dalla simulazione idrologica;
- le incertezze derivanti dal modello idrologico determinano un impatto maggiore in termini di rappresentazione degli sfiori nel condurre una simulazione in continuo alimentata a partire dalle precipitazioni; in tale contesto le inevitabili approssimazioni nella ricostruzione dei volumi in arrivo determinano frequentemente livelli di invaso non coerenti con la realtà storica, da cui eventi di sfioro non sempre realmente verificatisi;
- tale ultimo aspetto si presenta, inevitabilmente, anche in riferimento al periodo storico 1976-2000, antecedente all'entrata in funzione della diga.

Stanti le considerazioni sopra esposte, l'analisi dei rilasci dall'invaso allo stato attuale è stata condotta sotto le seguenti ipotesi.

Per il periodo dal 1976 al 2000:

- la serie di portata in ingresso all'invaso è basata sui valori dall'attività C3, quindi calcolata con il modello idrologico eseguito a passo orario e con in input le precipitazioni giornaliere rielaborate come presentato nell'ambito della stessa attività C3, ipotizzando, in corrispondenza degli eventi più gravosi, la distribuzione della cumulata solo su 12 ore;
- relativamente alla derivazione irrigua, è stato assunto un valore medio costante pari a 0.06 m^3/s, in linea con quanto definito nell'ambito dell'attività C1.

Per il periodo dal 2001 al 2017:

- relativamente al periodo di esercizio dell'invaso è opportuno in primis evidenziare come l'unico evento di sfioro significativo sia occorso a fine Novembre 2003, con un rilascio a valle inferiore alla capacità massima di deflusso nel canale;
- l'analisi è stata condotta inizialmente utilizzando in ingresso le portate medie giornaliere derivanti dal bilancio alla diga; sotto tale assunzione i valori delle portate sfiorate a valle risultano evidentemente coerenti con i dati relativi ai rilasci, sempre a passo giornaliero, resi disponibili dal Consorzio ASI;
- relativamente all'unico evento significativo (Novembre 2003), l'analisi è stata condotta anche utilizzando ingresso la serie di portata a passo orario simulata dal modello idrologico. Per condurre tale simulazione è stato impostato un livello iniziale dell'invaso pari a quello realmente registrato pochi giorni prima dell'evento. Tale analisi è stata condotta la fine di verificare la variazione infragiornaliera delle portate esitate.

7.1.2 Risultati delle simulazioni "storiche"

Sulla base dell'impostazione sopra descritta, si è proceduto a simulare l'intero periodo di 42 anni rispetto al quale, nelle immagini a seguire, si presenta il dettaglio degli eventi di sfioro risultati più significativi.

In tutte le immagini a seguire si presenta in colore nero la portata in arrivo da monte, in blu la portata sfiorata ed in verde, su asse secondario, il livello d'invaso simulato.

Relativamente al periodo 1976-2000, il modello numerico, sotto le assunzioni riportate nel paragrafo precedente, individua diversi eventi di sfioro, pur tutti caratterizzati da valori al colmo ampiamente al di sotto della capacità del canale di scarico a valle. Questo avviene principalmente quale conseguenza delle sempre modeste portate in arrivo da monte nell'intero periodo simulato, con valori al colmo mai superiori a 40 m3/s.

Le dinamiche di laminazione delle onde in arrivo da monte sono fortemente variabili in funzione dei livelli iniziali di invaso, le cui condizioni iniziali simulate dal modello all'arrivo dell'evento sono inevitabilmente soggette ad un forte grado di approssimazione, oltre che riferite al caso puramente teorico di esistenza dell'invaso anche nel periodo 1976-2000.

Tra i vari eventi registrati, i due caratterizzati da valori al colmo più significativi sono relativi a Novembre 1976 e Febbraio 1996 per i quali si riportano a seguire le immagini relative alle dinamiche di invaso e sfioro. In entrambi i casi gli eventi raggiungono l'invaso in condizioni dello stesso già prossime allo sfioro, per cui l'effetto di laminazione risulta molto limitato.

Eventi di più modesta entità, come quello rappresentato nell'immagine all'inizio di novembre 1976, transitano invece senza subire quasi alcun effetto di laminazione.

Figura 7-2 Ricostruzione con il modello dell'evento di Novembre 1976.

Figura 7-3 Ricostruzione con il modello dell'evento di Febbraio 1996.

Relativamente al periodo più recente, come già evidenziato in premessa, l'unico evento significativo risulta essere quello di novembre 2003, per il quale si riporta a seguire l'analisi sia utilizzando in input la serie di portata ricostruita dal bilancio della diga sia la serie derivante dal

modello idrologico. A tal proposito è opportuno evidenziare come il livello dell'invaso al sopraggiungere dell'evento fosse già prossimo alla quota di sfioro, con un franco inferiore a mezzo metro pochi giorni prima dell'evento.

Facendo riferimento alle portate medie giornaliere, il deflusso al picco risulta poco superiore a 30 m^3/s e subisce un effetto di laminazione limitato, con valore al colmo a valle pari a 28 m^3/s.

Figura 7-4 Ricostruzione con il modello dell'evento di Novembre 2003 utilizzando i dati derivanti dal bilancio della diga. La serie di portata in ingresso (nera) è disponibile a passo giornaliero mentre il rilascio a valle (blu) è calcolato a passo orario.

Utilizzando invece in input la serie a passo orario, come da figura a seguire, si può evincere meglio l'effetto di laminazione, con valore al colmo in ingresso pari a 70 m^3/s e portata rilasciata a valle al massimo pari a 45 m^3/s.

Figura 7-5 Ricostruzione con il modello dell'evento di Novembre 2003 utilizzando i dati derivanti dal modello idrologico.

Complessivamente le analisi condotte evidenziano da un lato una limitata capacità di laminazione dell'invaso in corrispondenza di livelli elevati, spesso raggiunti per lunghi periodi nell'anno.

Dall'altro l'analisi idrologica, pur supportata da dati estremamente limitati, evidenzia portate in ingresso alla diga tipicamente molto contenute e sempre compatibili con la capacità di smaltimento del canale a valle.

A fronte delle considerazioni sopra esposte, in accordo con la Committenza, si è quindi proceduto facendo riferimento alle portate statistiche definite dall'Autorità di Bacino, la cui analisi è presentata nel paragrafo 7.3. Prima di questo, nel paragrafo a seguire, viene comunque presentata l'analisi dei livelli massimi di invaso derivante dalla serie di portata storica 1976-2017.

7.2 Calcolo dei livelli di invaso per i 4 Scenari considerati con la serie storica di portata per il periodo 1976-2017

Si descrive nel seguito la verifica effettuata finalizzata alla definizione dei livelli di invaso con riferimento ai quattro scenari ipotizzati che fanno riferimento ad una regola di gestione calcolata con intervalli di aggregazione Δt = 7 e 14 giorni e tempi di ritorno T pari a 5 e 10 anni; il calcolo è stato effettuato utilizzando la serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo 1976-2017 a partire dai livelli registrati per il periodo 2001-2017 ed utilizzando le portate ricavate dal modello idrologico per il periodo 1976-2000, come riportato nel paragrafo 7.1.1. Sulla base di tali dati è quindi possibile pervenire alla regola di gestione dei livelli di invaso del Cillarese.

I quattro scenari considerati sono quindi i seguenti:

Scenario 1: Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni;

Scenario 2: Tempo di ritorno T = 10 anni e intervallo di aggregazione Δt = 7 giorni;

Scenario 3: Tempo di ritorno T = 5 anni e intervallo di aggregazione Δt = 14 giorni;

Scenario 4: Tempo di ritorno T = 5 anni e intervallo di aggregazione Δt = 7 giorni;

Per ciascuno dei 4 scenari individuati, per l'individuazione della regola di gestione si è adottato, in coerenza con il metodo utilizzato per Occhito e Capaccio, un modello probabilistico di tipo log-normale dei volumi affluiti all'invaso; è utile precisare che l'individuazione del tempo di ritorno associato allo scenario non è da intendersi come tempo di ritorno della fallanza del medesimo scenario ma un parametro necessario alla elaborazione dello scenario e riferito a volumi cumulati su periodi di più giorni consecutivi.

Esso non è quindi direttamente riferibile alla pericolosità di singolo evento di piena la cui criticità invece dipende, oltre che dall'entità della piena stessa (in termini sia di portata istantanea al colmo di piena che di volume dell'onda di piena), dalle condizioni di riempimento dell'invaso nel giorno in cui la piena si verifica.

Fissato il tempo di ritorno di 10 o 5 anni è stato possibile quindi ricavare per ogni giorno dell'anno i massimi volumi invasabili ricavati a partire dai volumi di piena attesi, affinché, per un periodo prefissato Δt = 7 o 14 giorni successivo a quello considerato, il volume disponibile sia sufficiente ad accumulare gli afflussi alla diga (per laminare le onde di piena) con un prefissato rischio di fallanza corrispondente ad una probabilità di non superamento pari a 0,9 o 0,8.

7.2.1 Scenario 1: T = 10 anni, Δt = 14 giorni

In figura a seguire si riportano le quote di minima regolazione 5 m.s.l.m. (linea nera) e di massima regolazione 17 m.s.l.m. (linea blu), nonché la quota decadale di massimo invaso (linea rossa) ricostruita alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-6 Quota decadale massimo invaso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

Successivamente si riportano invece i volumi di invaso corrispondenti rispettivamente alla quota di minima regolazione (linea azzurra) e massima regolazione (linea verde), nonché il massimo volume invasabile (linea rossa) ricostruito alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-7 Massimo volume invasabile atteso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

La regola di gestione viene sinteticamente riportata nella successiva Tabella 7.1 dove per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso, il volume disponibile e il volume max invasabile.

Tabella 7.1 Regola di gestione: per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso e il volume disponibile.

Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]
I° Gennaio - 10 Gennaio	14.32	1.37	2.91	1 maggio - 10 maggio	16.12	0.48	3.80	1 Settembre - 10 Settembre	16.12	0.48	3.80
11 Gennaio - 20 Gennaio	14.32	1.37	2.91	11 Maggio - 20 Maggio	16.12	0.48	3.80	11 Settembre - 20 Settembre	16.26	0.41	3.87
21 Gennaio - 30 Gennaio	14.32	1.37	2.91	21 Maggio - 31 Maggio	16.12	0.48	3.80	21 Settembre - 30 Settembre	16.26	0.41	3.87
31 Gennaio - 9 Febbraio	14.32	1.37	2.91	1 Giugno - 10 Giugno	16.12	0.48	3.80	1 Ottobre - 20 Novembre	13.04	1.94	2.34
10 Febbraio - 20 Febbraio	14.32	1.37	2.91	11 Giugno - 20 Giugno	16.12	0.48	3.80	21 Novembre - 30 Novembre	13.16	1.88	2.39
21 Febbraio - 28/29 febbraio	14.74	1.17	3.11	21 Giugno - 30 Giugno	16.12	0.48	3.80	1 Dicembre - 31 Dicembre	14.32	1.37	2.91
I° Marzo - 10 Marzo	15.05	1.03	3.25	1 Luglio - 10 Luglio	16.12	0.48	3.80				
11 Marzo - 20 Marzo	15.54	0.78	3.50	11 Luglio - 20 Luglio	16.12	0.48	3.80				
21 Marzo - 31 Marzo	15.74	0.68	3.60	21 Luglio - 31 luglio	16.12	0.48	3.80				
1 Aprile - 10 Aprile	16.12	0.48	3.80	1 Agosto - 10 Agosto	16.12	0.48	3.80				
11 Aprile - 20 Aprile	16.12	0.48	3.80	11 Agosto - 20 Agosto	16.12	0.48	3.80				
21 Aprile - 30 Aprile	16.12	0.48	3.80	21 Agosto - 31 Agosto	16.12	0.48	3.80				

Il periodo in cui deve essere garantito il maggior volume disponibile (di circa 1.9 Mm^3) ricade tra il 1° ottobre ed il 30 novembre; a partire dal giorno successivo a tale data e fino al 20 febbraio deve essere garantito un volume di circa 1.37 Mm^3; a partire dal 21 febbraio il lago può invasare un volume maggiore di acqua, variabile da circa 3.11 Mm^3 fino a circa 3.87 Mm^3 al 30 settembre; dal 1° ottobre l'invaso deve essere parzialmente svuotato per contenere un volume max invasabile di circa 2.34 Mm^3.

7.2.2 Scenario 2: T = 10 anni, Δt = 7 giorni

A seguire si riportano le quote di minima regolazione 5 m.s.l.m. (linea nera) e di massima regolazione 17 m.s.l.m. (linea blu), nonché la quota decadale di massimo invaso (linea rossa) ricostruita alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-8 Quota decadale massimo invaso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

Successivamente si riportano invece i volumi di invaso corrispondenti rispettivamente alla quota di minima regolazione (linea azzurra) e massima regolazione (linea verde), nonché il massimo volume invasabile (linea rossa) ricostruito alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-9 Massimo volume invasabile atteso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

La regola di gestione, viene sinteticamente riportata nella Tabella 7.2 dove per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso, il volume disponibile e il volume max invasabile.

Tabella 7.2 Regola di gestione: per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso e il volume disponibile.

Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]
I° Gennaio - 10 Gennaio	15.39	0.85	3.42	1 maggio - 10 maggio	16.57	0.24	4.04	1 Settembre - 10 Settembre	16.57	0.24	4.04
11 Gennaio - 20 Gennaio	15.39	0.85	3.42	11 Maggio - 20 Maggio	16.57	0.24	4.04	11 Settembre - 20 Settembre	16.61	0.22	4.06
21 Gennaio - 30 Gennaio	15.39	0.85	3.42	21 Maggio - 31 Maggio	16.57	0.24	4.04	21 Settembre - 30 Settembre	16.61	0.22	4.06
31 Gennaio - 10 Febbraio	15.39	0.85	3.42	1 Giugno - 10 Giugno	16.57	0.24	4.04	1 Ottobre - 30 Novembre	14.91	1.10	3.18
11 Febbraio - 20 Febbraio	15.57	0.76	3.51	11 Giugno - 20 Giugno	16.57	0.24	4.04	1 Dicembre - 31 Dicembre	15.39	0.85	3.42
21 Febbraio - 28/29 febbraio	15.76	0.67	3.61	21 Giugno - 30 Giugno	16.57	0.24	4.04				
I° Marzo - 10 Marzo	15.76	0.67	3.61	1 Luglio - 10 Luglio	16.57	0.24	4.04				
11 Marzo - 20 Marzo	16.23	0.42	3.86	11 Luglio - 20 Luglio	16.57	0.24	4.04				
21 Marzo - 31 Marzo	16.25	0.41	3.87	21 Luglio - 31 luglio	16.57	0.24	4.04				
1 Aprile - 10 Aprile	16.53	0.26	4.02	1 Agosto - 10 Agosto	16.57	0.24	4.04				
11 Aprile - 20 Aprile	16.56	0.24	4.03	11 Agosto - 20 Agosto	16.57	0.24	4.04				
21 Aprile - 30 Aprile	16.57	0.24	4.04	21 Agosto - 31 Agosto	16.57	0.24	4.04				

Il periodo in cui deve essere garantito il maggior volume disponibile (di circa 1.10 Mm^3) ricade tra il 1° ottobre ed il 30 novembre; a partire dal giorno successivo a tale data e fino al 10 febbraio deve essere garantito un volume di circa 0.85 Mm^3, inferiore rispetto al caso precedente n.1; a partire dall'11 febbraio il lago può invasare un volume maggiore di acqua, superiore rispetto al caso precedente, variabile da circa 3.51Mm^3 fino a circa 4.06 Mm^3 al 30 settembre, dal 1° ottobre l'invaso deve essere parzialmente svuotato per contenere un volume max invasabile di circa 3.18 Mm^3.

7.2.3 Scenario 3: T = 5 anni, Δt = 14 giorni

Nella seguente immagine si riportano le quote di minima regolazione 5 m.s.l.m. (linea nera) e di massima regolazione 17 m.s.l.m. (linea blu), nonché la quota decadale di massimo invaso (linea rossa) ricostruita alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-10 Quota decadale massimo invaso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

A seguire si riportano invece i volumi di invaso corrispondenti rispettivamente alla quota di minima regolazione (linea azzurra) e massima regolazione (linea verde), nonché il massimo volume invasabile (linea rossa) ricostruito alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-11 Massimo volume invasabile atteso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

La regola di gestione, viene sinteticamente riportata nella seguente tabella dove per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso, il volume disponibile e il volume max invasabile.

Tabella 7.3 Regola di gestione: per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso e il volume disponibile.

Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]
I° Gennaio - 10 Gennaio	15.70	0.70	3.58	1 maggio - 10 maggio	16.62	0.21	4.06	1 Settembre - 10 Settembre	16.62	0.21	4.06
11 Gennaio - 20 Gennaio	15.70	0.70	3.58	11 Maggio - 20 Maggio	16.62	0.21	4.06	11 Settembre - 20 Settembre	16.65	0.19	4.08
21 Gennaio - 30 Gennaio	15.70	0.70	3.58	21 Maggio - 31 Maggio	16.62	0.21	4.06	21 Settembre - 30 Settembre	16.65	0.19	4.08
31 Gennaio - 10 Febbraio	15.70	0.70	3.58	1 Giugno - 10 Giugno	16.62	0.21	4.06	1 Ottobre - 20 Novembre	15.33	0.89	3.39
11 Febbraio - 20 Febbraio	15.70	0.70	3.58	11 Giugno - 20 Giugno	16.62	0.21	4.06	21 Novembre - 30 Novembre	15.36	0.87	3.41
21 Febbraio - 28/29 febbraio	15.90	0.60	3.68	21 Giugno - 30 Giugno	16.62	0.21	4.06	1 Dicembre - 31 Dicembre	15.70	0.70	3.58
I° Marzo - 10 Marzo	16.03	0.53	3.75	1 Luglio - 10 Luglio	16.62	0.21	4.06				
11 Marzo - 20 Marzo	16.26	0.41	3.87	11 Luglio - 20 Luglio	16.62	0.21	4.06				
21 Marzo - 31 Marzo	16.38	0.34	3.94	21 Luglio - 31 luglio	16.62	0.21	4.06				
1 Aprile - 10 Aprile	16.54	0.26	4.02	1 Agosto - 10 Agosto	16.62	0.21	4.06				
11 Aprile - 20 Aprile	16.61	0.22	4.06	11 Agosto - 20 Agosto	16.62	0.21	4.06				
21 Aprile - 30 Aprile	16.62	0.21	4.06	21 Agosto - 31 Agosto	16.62	0.21	4.06				

Il periodo in cui deve essere garantito il maggior volume disponibile (di circa 0.88 Mm^3) ricade tra il 1° ottobre ed il 30 novembre; a partire dal giorno successivo a tale data e fino al 20 febbraio deve essere garantito un volume di circa 0.7 Mm3, inferiore rispetto ai casi precedenti; a partire dal 21 febbraio il lago può invasare un volume maggiore di acqua, superiore rispetto ai casi precedenti, variabile da circa 3.68 Mm^3 fino a circa 4.08 Mm^3 al 30 settembre; dal 1° ottobre l'invaso deve essere parzialmente svuotato per contenere un volume max invasabile di circa 3.39 Mm^3.

7.2.4 Scenario 4: T = 5 anni, Δt = 7 giorni

Nella figura seguente si riportano le quote di minima regolazione 5 m.s.l.m. (linea nera) e di massima regolazione 17 m.s.l.m. (linea blu), nonché la quota decadale di massimo invaso (linea rossa) ricostruita alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-12 Quota decadale massimo invaso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

Successivamente si riportano invece i volumi di invaso corrispondenti rispettivamente alla quota di minima regolazione (linea azzurra) e massima regolazione (linea verde), nonché il massimo volume invasabile (linea rossa) ricostruito alla scala decadale, considerando la possibilità di effettuare una manovra ogni dieci giorni assegnando a ciascuna decade una quota pari alla minima quota giornaliera della stessa decade.

Figura 7-13 Massimo volume invasabile atteso sulla base della serie di portata ricostruita in ingresso all'invaso nel periodo.

La regola di gestione viene sinteticamente riportata nella seguente tabella dove per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso e il volume disponibile e il volume max invasabile.

Tabella 7.4 Regola di gestione: per ogni decade presa in considerazione si riporta la quota di invaso e il volume disponibile.

Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]	Periodo	Quota di invaso [m. s.l.m.m]	Volume disponibile [Mm^3]	Volume max invasabile [Mm^3]
I° Gennaio - 10 Gennaio	16.31	0.38	3.90	1 maggio - 10 maggio	16.81	0.11	4.17	1 Settembre - 10 Settembre	16.81	0.11	4.17
11 Gennaio - 20 Gennaio	16.31	0.38	3.90	11 Maggio - 20 Maggio	16.81	0.11	4.17	11 Settembre - 20 Settembre	16.81	0.11	4.17
21 Gennaio - 30 Gennaio	16.31	0.38	3.90	21 Maggio - 31 Maggio	16.81	0.11	4.17	21 Settembre - 30 Settembre	16.81	0.11	4.17
31 Gennaio - 10 Febbraio	16.31	0.38	3.90	1 Giugno - 10 Giugno	16.81	0.11	4.17	1 Ottobre - 20 Novembre	16.15	0.47	3.81
11 Febbraio - 20 Febbraio	16.34	0.36	3.92	11 Giugno - 20 Giugno	16.81	0.11	4.17	21 Novembre - 30 Novembre	16.15	0.47	3.81
21 Febbraio - 28/29 febbraio	16.42	0.32	3.96	21 Giugno - 30 Giugno	16.81	0.11	4.17	1 Dicembre - 31 Dicembre	16.31	0.38	3.90
I° Marzo - 10 Marzo	16.42	0.32	3.96	1 Luglio - 10 Luglio	16.81	0.11	4.17				
11 Marzo - 20 Marzo	16.62	0.21	4.06	11 Luglio - 20 Luglio	16.81	0.11	4.17				
21 Marzo - 31 Marzo	16.64	0.20	4.08	21 Luglio - 31 luglio	16.81	0.11	4.17				
1 Aprile - 10 Aprile	16.76	0.14	4.14	1 Agosto - 10 Agosto	16.81	0.11	4.17				
11 Aprile - 20 Aprile	16.76	0.14	4.14	11 Agosto - 20 Agosto	16.81	0.11	4.17				
21 Aprile - 30 Aprile	16.81	0.11	4.17	21 Agosto - 31 Agosto	16.81	0.11	4.17				

Il periodo in cui deve essere garantito il maggior volume disponibile (di circa 0.47 Mm^3) ricade tra il 1° ottobre ed il 30 novembre; a partire dal giorno successivo a tale data e fino al 10 febbraio deve essere garantito un volume di circa 0.36 Mm^3, inferiore rispetto ai casi precedenti; a partire dall'11 febbraio il lago può invasare un volume maggiore di acqua, superiore rispetto ai casi precedenti, variabile da circa 3.92 Mm^3 fino a circa 4.17 Mm^3 al 30 settembre; dal 1° ottobre l'invaso deve essere parzialmente svuotato per contenere un volume max invasabile di circa 3.81Mm^3.

7.3 Analisi dei rilasci dall'invaso rispetto agli eventi "statistici"

Ad integrazione delle simulazioni basate sugli eventi storici, si è proceduto a verificare la risposta dell'invaso anche in riferimento agli eventi statistici caratterizzati dalle portate definite nello studio dell'Autorità di Bacino, presentati al paragrafo 6.3.

Queste simulazioni presentano quindi una estensione temporale limitata e si basano sulla sola componente idrodinamica, utilizzando gli idrogrammi statistici come condizione al contorno di monte.

7.3.1 Analisi di livelli di invaso, derivazioni e impostazione delle simulazioni

Al fine di valutare le condizioni di riempimento dell'invaso all'occorrere degli eventi per assegnato periodo di ritorno, è stata condotta una prima valutazione basata sui dati di osservazione forniti dal Consorzio ASI.

Nelle immagini a seguire si ripropone per completezza la figura relativa alla serie storica dei livelli di invaso dal 2000 al 2017 ed a seguire l'analisi dei livelli medi a cadenza mensile, condotta a partire dal 2003 al fine di escludere il periodo caratterizzato dall'esercizio provvisorio.

In merito ai dati è inoltre doveroso ricordare la limitazione sui livelli introdotta recentemente a seguito dei lavori in atto, alla data di redazione del presente elaborato, relativi allo scarico di fondo, da cui la non disponibilità dello stesso.

Figura 7-14 Serie di livello di invaso per la Diga del Cillarese.

Figura 7-15 Livelli medi di invaso a cadenza mensile.

Le figure evidenziano come, sulla base dell'esercizio storico, i livelli di invaso oscillino sostanzialmente in un intervallo molto limitato, compreso tra 15.50 e 16.50 m s.l.m., con livelli inferiori nella stagione autunnale-invernale e massimi in primavera. A tale intervallo corrisponde un volume di invaso nell'ordine di 0.5 Mm^3, volume circa equivalente ad un afflusso medio di 25 m^3/s per 6 ore, che risulta essere una frazione modesta della sola fase di crescita degli eventi presi in esame.

Ad integrazione dell'analisi sui livelli è stata condotta anche una valutazione sui volumi di portata derivata dall'invaso, resi disponibili dal Consorzio ASI e sintetizzati nella tabella a seguire. In particolare, la tabella evidenzia un valore medio di portata derivata sull'anno pari a circa 1.8 Mm^3, equivalente a circa il 45% del volume complessivo dell'invaso. Il volume massimo derivato sull'anno è risultato poco superiore ai 3 Mm^3, pari al 70% del volume di invaso complessivo.

Tabella 7.5 Volumi annui derivati dall'invaso

Anno	Volume [Mm^3]
2000	1.158
2001	1.977
2002	1.506
2003	1.332
2004	1.426
2005	1.101
2006	0.780
2007	0.888
2008	2.025

Anno	Volume [Mm^3]
2009	2.029
2010	1.484
2011	2.293
2012	2.171
2013	1.959
2014	1.778
2015	2.670
2016	3.010
2017	2.673
MEDIA	**1.790**

Dalle considerazioni sopra esposte relative sia ai livelli di esercizio sia ai volumi derivati, che esprimono una indicazione diretta delle esigenze idriche complessive per le utenze, è possibile evidenziare come l'invaso sia complessivamente dimensionato in modo più che adeguato rispetto alle necessità di derivazione e come lo stesso venga esercito tipicamente con gradi di riempimento elevati.

Una gestione ordinaria in riferimento a livelli inferiori, potrebbe quindi consentire la disponibilità di un volume utile alla laminazione senza pregiudicare in alcun modo la piena disponibilità dei volumi rispetto alle utenze a valle.

Le simulazioni "statistiche", relative agli eventi di piena definiti dall'Autorità di Bacino, sono state quindi condotte in riferimento a diverse ipotesi di livelli di invaso, al fine di verificarne la possibilità li laminazione parziale o, quantomeno, di ritardo temporale dello sfioro a valle.

In particolare, sono state condotte le simulazioni sempre relative ai 3 tempi di ritorno già introdotti (30, 200 e 500 anni), ipotizzando valori di livello iniziale variabile. I risultati delle simulazioni sono presentati nel paragrafo a seguire.

7.3.2 Risultati delle simulazioni "statistiche"

In questo paragrafo sono presentati i risultati delle simulazioni condotte considerando in arrivo alla diga gli eventi per assegnato periodo di ritorno in corrispondenza di diversi livelli iniziali di invaso.

L'obiettivo principale delle simulazioni è quello di identificare quali debbano essere le condizioni iniziali dell'invaso, quindi i relativi livelli, per poter laminare in parte od interamente, gli eventi per assegnato periodo di ritorno. È infatti evidente come al diminuire del livello dell'invaso sia disponibile un maggior volume che consenta di laminare l'onda nella sua fase crescente, eventualmente fino al picco.

Oltre alla riduzione dei volumi, i minori livelli iniziali nell'invaso determinano anche il ritardo temporale dello sfioro a valle, a beneficio dell'organizzazione della struttura di Protezione Civile. I risultati delle simulazioni sono quindi presentati anche in tale ottica.

A fronte dei limitati volumi disponibili nell'invaso rispetto ai deflussi per assegnato periodo di ritorno, è possibile anticipare come gli eventi estremi, quali quelli con tempo di ritorno 200 e 500 anni non possano essere laminati in corrispondenza del picco nemmeno sotto l'ipotesi di invaso vuoto.

Per completezza, tutte le simulazioni sono state effettuate sotto le ipotesi di scarico sia sempre chiuso sia sempre aperto.

Nelle figure a seguire si presenta sempre con linea più sottile l'idrogramma in ingresso ed a pari colore, con linea più spessa, l'idrogramma di portata rilasciata a valle come somma dello sfioro e, se aperto, dello scarico di fondo. Il colore nero fa riferimento al tempo di ritorno di 30 anni mentre le linee blu e verde si riferiscono rispettivamente a T= 200 e T = 500 anni.

7.3.2.1 Simulazioni con livello iniziale 16 m s.l.m.

Le immagini a seguire evidenziano l'effetto di laminazione pressoché nullo dell'invaso rispetto alle onde di piena statistiche nel caso di livello di invaso pari a 16 m s.l.m..

I valori al colmo risultano invariati mentre si assiste ad un ritardo del picco pari a circa 3 ore. Il superamento del valore soglia di 50 m^3/s rilasciato a valle viene ritardato di circa 4 ore.

La seconda immagine, relativa all'ipotesi di scarico di fondo aperto, evidenzia un lieve incremento del ritardo dell'onda e valori al picco invariati.

Figura 7-16 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 16 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-17 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 16 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.1.1 Simulazioni con livello iniziale 14 m s.l.m.

Anche nel caso di livello iniziale pari a 14 m s.l.m., i valori al colmo relativi alle onde rilasciate a valle non beneficiano di un effetto di laminazione, se non modesto.

Il ritardo dell'onda a valle assume invece valori più significativi, in particolare sotto l'ipotesi di scarico di fondo aperto, di cui alla seconda immagine. Relativamente all'evento trentennale, il superamento della portata di 50 m^3/s viene ritardato di circa 7 ore con scarichi chiusi e 8 ore con scarichi aperti.

Figura 7-18 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 14 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-19 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 14 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.2 Simulazioni con livello iniziale 12 m s.l.m.

Nello scenario con livello iniziale pari a 12 m s.l.m., le onde con T= 200 e T=500 anni continuano a non beneficiare in alcun modo significativo della presenza dell'invaso, se non in termini di ritardo dei tempi di sfioro che, relativamente al superamento della portata soglia di 50 m^3/s risulta comunque considerevole, nell'ordine delle 11 ore con scarico aperto.

L'onda trentennale inizia a subire anche un parziale effetto di laminazione del picco nell'ipotesi di scarico di fondo aperto oltre, nuovamente, al ritardo temporale.

Figura 7-20 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 12 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-21 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 12 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.3 Simulazioni con livello iniziale 10 m s.l.m.

Nello scenario caratterizzato da un livello iniziale pari a 10 m s.l.m. si ottiene un ritardo del tempo di superamento della portata soglia a valle pari a 12 ore con riferimento all'evento trentennale e scarico aperto. Il valore al colmo nello scenario con scarico aperti e tempo di ritorno di 30 anni viene laminato del 20% circa.

Gli effetti sulle onde più estreme sono similari ai casi precedenti.

Figura 7-22 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 10 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-23 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 10 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.4 Simulazioni con livello iniziale 8 m s.l.m.

Nello scenario con livello iniziale pari a 8 m s.l.m., i benefici aumentano sempre in riferimento al ritardo dell'onda rilasciata verso valle e, limitatamente al tempo di ritorno 30 anni, anche in termini di laminazione del colmo.

Sotto l'ipotesi di apertura dello scarico, il colmo di piena risulta di poco superiore a 70 m^3/s.

Figura 7-24 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 8 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-25 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 8 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.5 Simulazioni con livello iniziale 6 m s.l.m.

L'ipotesi di livello iniziale pari a 6 m s.l.m. è pressoché rappresentativa della condizione di invaso vuoto, stanti i limitati volumi disponibili in corrispondenza del fondo dell'invaso. L'effetto risulta infatti pressoché analogo al caso con livello iniziale pari a 8 m s.l.m..

Figura 7-26 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 6 m s.l.m. e scarico di fondo chiuso.

Figura 7-27 Effetto di laminazione della diga rispetto agli eventi per assegnato tempo di ritorno definiti dall'AdB (nero: T=30 anni, blu: T= 200 anni, verde: T=500 anni). La linea spessa indica l'onda in uscita e la sottile di pari colore l'onda in ingresso. Livello iniziale 6 m s.l.m. e scarico di fondo aperto.

7.3.2.5.1 Sintesi dei risultati delle simulazioni statistiche

L'insieme delle analisi condotte in riferimento agli eventi estremi, per assegnato periodo di ritorno, porta alle considerazioni di cui a seguire:

- stanti i volumi degli eventi considerati rispetto a quello della diga, l'efficacia dello sbarramento per scopi di laminazione risulta in generale limitato;
- in termini di valore della portata al colmo, l'invaso presenta benefici parziali rispetto al solo evento trentennale, che non risulta in ogni caso possibile contenere al di sotto della portata soglia per le esondazioni a valle. L'effetto sul colmo di piena per gli eventi con tempo di ritorno superiore risulta quasi sempre trascurabile;
- la presenza dell'invaso porta invece un beneficio in termini di ritardo dell'onda di piena verso valle, offrendo margini temporali significativi per l'organizzazione delle operazioni di Protezione Civile in caso di allerta. Tale effetto è crescente all'aumentare del volume disponibile e, quindi, al diminuire dei livelli iniziali;
- l'apertura dello scarico di fondo nel caso di evento estremo risulta sempre benefico in termini di portate sfiorate e ritardo dell'onda.

Nella tabella a seguire si sintetizzano i principali risultati delle simulazioni con riferimento all'evento con T = 30 anni nell'ipotesi di scarico di fondo aperto, configurazione di maggiore interesse per le successive valutazioni funzionali al Piano di Laminazione.

Tabella 7.6 Sintesi dell'effetto di laminazione della diga al variare del livello iniziale, T=30 anni e scarico aperto

Livello iniziale [m s.l.m.]	**Picco di piena a valle [m^3/s]**	**Ritardo del picco [h]**	**Ritardo del raggiungimento della portata soglia rossa (50 m^3/s) [h]**
16	98	3	5
14	92	4	8
12	85	7	11
10	79	9	12
8	72	10	14
6	69	11	17

8 C6 – Individuazione degli esposti vulnerabili

Le risultanze dell'attività C6, relativa agli esposti vulnerabili, sono presentate in anticipo rispetto all'attività C5 (modello bidimensionale) al fine di rendere più coerente l'esposizione dei risultati di quest'ultima.

8.1 Obiettivi e riferimenti normativi

L'analisi degli elementi esposti nel territorio inondabile a valle dello sbarramento ha l'obiettivo di produrre uno strato informativo di supporto per il confronto degli scenari di evento alluvionale considerati per l'aggiornamento del Piano di Laminazione dell'invaso.

La mappatura del territorio a valle della diga in termini di classi di danno potenziale consente infatti di analizzare e confrontare, mediante intersezione con le aree di esondazione, gli effetti prodotti dagli eventi significativi studiati per l'aggiornamento del Piano di Laminazione e dagli eventi estremi (collasso dello sbarramento) considerati per la protezione del territorio.

L'attività è stata condotta in conformità ai vigenti strumenti normativi in materia, che discendono dalla Direttiva Europea n. 2007/60/CE del 23 ottobre 2007 e dal relativo atto nazionale di recepimento D.Lgs. n. 49 del 2010 "Attuazione della Direttiva 200//60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvione", dove (art.6, comma 5) viene in particolare specificato che le potenziali conseguenze negative derivanti dalle alluvioni vengono espresse in termini di:

- numero indicativo degli abitanti potenzialmente interessati;
- tipo di attività economiche insistenti sull'area potenzialmente interessata;
- impianti di cui all'allegato I della direttiva 96/61/Ce del Consiglio, del 24 settembre 1996, sulla prevenzione e la riduzione integrate dell'inquinamento, che potrebbero provocare inquinamento accidentale in caso di alluvione e aree protette potenzialmente interessate, individuate nell'allegato IV, paragrafo 1, punti i), iii) e v) della direttiva 2000/60/Ce;
- altre informazioni considerate utili dagli Stati membri, come l'indicazione delle aree in cui possono verificarsi alluvioni con elevato volume di sedimenti trasportati e colate detritiche e informazioni su altre notevoli fonti di inquinamento.

Per l'individuazione delle categorie degli elementi esposti e la determinazione delle classi di danno potenziale si fa riferimento al documento conclusivo del Tavolo Tecnico Stato – Regione emesso dal MATTM, relativo agli "Indirizzi Operativi per l'attuazione della direttiva 2007/60CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni".

In questo modo l'analisi svolta per l'aggiornamento del Piano di Laminazione è assolutamente coerente con quelle eseguite dalle competenti Autorità di Bacino e di Distretto per la redazione delle mappe del rischio idraulico.

8.2 Fonti informative di base

La mappatura degli elementi esposti deriva dall'accorpamento e armonizzazione di strati informativi presenti in archivi storici e cartografie già esistenti in Regione Puglia e Autorità di bacino della Puglia.

La base di dati utilizzata è derivata pertanto da archivi eterogenei e diversificati sia per la natura dei dati archiviati (dati ambientali, dati socio-economici, dati idraulici ed altri ancora) che per i formati.

Per la digitalizzazione del suolo con strumenti GIS, sono stati utilizzati i seguenti strati informativi:

- Uso del Suolo della Carta Tecnica Regionale della Puglia (UdS CTR Puglia) del 2011, fonte SIT PUGLIA;
- Corine Land Cover 2012 (4° livello) (CLC);
- Carta Idrogeomorfologica della Puglia del 2009;
- Impianti di depurazione, impianti IPPC-AIA, impianti assimilabili a discarica (compostaggi, biostabilizzazione, messa in riserva...) forniti dall'ARPA in formato vettoriale puntuale;
- Stabilimenti a rischio di incidente rilevante (ARIR), di cui al D.Lgs 334/99 e s.m.i., forniti da Servizio Rischio Industriale dell' ISPRA in formato vettoriale puntuale;
- Registro Italiano Dighe;
- Piano Paesaggistico Territoriale della Regione Puglia (PPTR). Sono stati utilizzati immobili e aree di notevole interesse pubblico, zone di interesse archeologico inclusi gli immobili sottoposti a vincolo archeologico e le aree individuate successivamente all'amministrazione competente, aree protette e siti naturalistici tra cui i parchi nazionali, naturali statali e regionali, siti di interesse comunitario (SIC e SIC Mare) e zone di protezione speciale (ZPS);
- Insediamenti produttivi o impianti tecnologici potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale (ai sensi di quanto individuato nell'allegato I del D.L. 59/2005) forniti dall'Ufficio Rischio Ambientale della Regione Puglia;
- Impianti di depurazione, Serbatoi idrici, Partitori dell'Autorità Idrica Pugliese e Regione Puglia.

8.3 Sintesi metodologica

Le categorie di elementi indicate dalla normativa sopra citata individuate, sulla base dei dati conoscitivi e cartografici sopra specificati, all'interno di una fascia di territorio costituita dall'inviluppo della fascia C (così delimitato per coprire l'estensione delle aree esondabili relative a tutte le simulazioni di scenario) sono state raccolte all'interno delle 4 classi di danno potenziale previste dal D.Lgs. n. 49 del 2010: D4 = molto elevato, D3 = elevato, D2 = medio, D1 = moderato o nullo.

In coerenza con quanto previsto dal documento conclusivo del Tavolo Tecnico Stato – Regione relativo agli "Indirizzi Operativi per l'attuazione della direttiva 2007/60CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi da alluvioni con riferimento alla predisposizione delle mappe della pericolosità e del rischio di alluvioni" del MATTM, le classi di danno potenziale sono state pertanto definite con gli elementi sotto specificati:

D4 - Danno potenziale molto elevato:

Zone urbanizzate (agglomerati urbani, nuclei abitati con edificazione diffusa e sparsa) con indicazione sul numero di abitanti potenzialmente interessati da possibili eventi alluvionali – corrispondenza con la classe A del D.P.C.M. 29.09.98 e parzialmente con quanto riportato alla lettera a, comm.5, art. 6 del D.Lgs. 49/2010);

Zone interessate da attività economiche e produttive di rilevante interesse (zone commerciali, industrie, centri di ricerca, etc. non potenzialmente pericolose dal punto di vista ambientale);

Strutture Strategiche (ospedali e centri di cura pubblici e privati, centri di attività collettive civili, sedi di centri civici, centri di attività collettive militari – corrispondenza con la classe E del D.P.C.M. 29.09.98 e con quanto riportato alla lettera b, comm.5, art. 6 del D.Lgs. 49/2010);

Infrastrutture strategiche e principali (linee elettriche, metanodotti, oleodotti, gasdotti e acquedotti, vie di comunicazione di rilevanza strategica sia carrabili che ferrate, porti e aeroporti, invasi idroelettrici, grandi dighe. Per le strade carrabili andranno riportate almeno tre tipologie:

autostrade, strade di grande comunicazione e le strade di interesse regionale, tralasciando i tronchi, anche asfaltati, di interesse locale – corrispondenza con la classe C ed E del D.P.C.M. 29.09.98 e con quanto riportato alla lettera b, comm.5, art. 6 del D.Lgs. 49/2010);

Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interesse (aree naturali, aree boscate, aree protette e vincolate, aree di vincolo paesaggistico, aree di interesse storico e culturale, zone archeologiche di cui al Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n.42 del Ministero per i Beni e le Attività Culturali – MIBAC; aree Protette Nazionali e Regionali di cui alla Legge Quadro 394/91 e Siti della Rete Natura 2000 (SIC, ZSC e ZPS) di cui alle Direttive 92/43/CEE "Habitat" e 2009/147/CE, ex 79/409/CEE "*Uccelli*"; *– corrispondenza con la classe D del D.P.C.M. 29.09.98 e con quanto riportato alla lettera c, comm.5, art. 6 del D.Lgs. 49/2010, da individuare d'intesa o su indicazione delle amministrazioni competenti statali e regionali, ciascuna per il proprio ambito);*

Zone interessate da insediamenti produttivi o impianti tecnologici, potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale (ai sensi di ai sensi di quanto individuato nell'allegato I del D.L. 59/2005), zone estrattive, discariche, depuratori, inceneritori – e aree protette potenzialmente interessate (corrispondenza parziale con le classi B e E del D.P.C.M. 29.09.98 e totale con quanto riportato alla lettera e, comm.5, art. 6 del D.Lgs. 49/2010.

D3 - Danno potenziale elevato:

Discariche, depuratori, inceneritori;

Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati come **Cimiteri, cave, discariche** anche se non in esercizio;

Beni ambientali, paesaggistici e storico-archeologici che racchiudono potenziali valori, ma non riconosciuti in termini normativi.

D2 - Danno potenziale medio:

Zone agricole specializzate;

Zone estrattive;

Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati come ad esempio, **verde urbano e parchi urbani, borghi rurali**;

Infrastrutture secondarie: intese come strade secondarie, linee ferroviarie e stazioni nel caso in cui il danno non provochi l'isolamento di uno o più centri urbani.

D1 – Danno potenziale moderato o nullo:

Aree incolte o di scarso valore ambientale;

Aree agricole non specializzate (prati, pascoli, etc.);

Aree umide (zone umide, corpi idrici, boschi igrofili, lanche e meandri abbandonati, ecosistemi sito-specifici, etc.);

Superfici costruite, a bassa densità di edificazione in stato di abbandono o degrado riconosciuto. Il valore è principalmente legato alla perdita dell'elemento costruito.

Viene sotto descritta la classificazione del danno eseguita nel caso specifico, con indicazione degli strati informativi utilizzati per la mappatura degli elementi esposti appartenenti ad ogni classe:

D4 - Danno potenziale molto elevato:

1. **Zone urbanizzate** (agglomerati urbani, nuclei abitati con edificazione diffusa e sparsa):

   UdS Puglia: Tessuto residenziale continuo antico e denso; Tessuto residenziale continuo, denso, più recente e basso; Tessuto residenziale continuo, denso, recente, alto; Tessuto residenziale discontinuo; Tessuto residenziale rado e nucleiforme; Tessuto residenziale sparso; Cantieri e spazi in costruzione e scavi.

2. **Zone interessate da attività economiche e produttive di rilevante interesse** (zone commerciali, industrie, centri di ricerca, etc. non potenzialmente pericolose dal punto di vista ambientale):

   UdS Puglia: Insediamenti commerciali; Insediamenti di impianti tecnologici; Insediamenti industriali o artigianali con spazi annessi.

3. **Strutture Strategiche** (ospedali e centri di cura pubblici e privati, centri di attività collettive civili, sedi di centri civici, centri di attività collettive militari):

   UdS Puglia: Insediamenti ospedalieri; Aree sportive; Campeggi strutture ricettive e bungalow o simili; Parchi divertimento; Insediamenti di grandi impianti di servizi pubblici e privati.

4. **Infrastrutture strategiche** (Autostrade, Tangenziali, Grandi Strade e/o Strade a Scorrimento Veloce, Strade Statali, Provinciali e Comunali principali, Stazioni FS, Linee Ferroviarie, Aeroporti, Eliporti, Porti, invasi idroelettrici, grandi dighe, Elettrodotti, Gasdotti, Acquedotti, Metanodotti, Linee Elettriche, Oleodotti):

   UdS Puglia: Reti stradali e spazi accessori; Grandi impianti di concentramento e smistamento merci; Aree aeroportuali ed eliporti; Aree per gli impianti delle telecomunicazioni; Aree portuali; Superfici annesse alla rete ferroviarie; Reti ed aree per la distribuzione, produzione e trasporto dell'energia.

5. **Beni ambientali, storici e culturali di rilevante interess**e (aree naturali, aree boscate, aree protette e vincolate, aree di vincolo paesaggistico, aree di interesse storico e culturale, zone archeologiche):

   PPTR Puglia: Parchi e Riserve (parchi nazionali, riserve naturali statali, parchi naturali regionali, riserve naturali regionali integrali e orientate); Siti di rilevanza naturalistica (Zone di protezione speciale - ZPS, Siti di interesse comunitario - SIC e zone speciali di conservazione - ZSC); Testimonianze della stratificazione insediativa (siti interessati dalla presenza di beni storico-culturali); Aree a vincolo paesaggistico (istituite con L1497/39 e L.431/85); Aree a vincolo archeologico (istituite con L.364/1909, L. 1089/1939, L.490/1999, L. 42/2004).

   UdS Puglia: Aree archeologiche;

6. **Zone interessate da attività economiche, industriali o impianti tecnologici, potenzialmente pericolosi dal punto di vista ambientale** (ai sensi di ai sensi di quanto individuato nell'allegato I del D.L. 59/2005):

   Stabilimenti a rischio di incidente *rilevante* (ARIR), di cui al D.Lgs 334/99 e s.m.i., forniti da Servizio Rischio Industriale dell'ISPRA;

   Insediamenti produttivi o impianti tecnologici *potenzialmente* pericolosi dal punto di vista ambientale (ai sensi di quanto individuato nell'allegato I del D.Lgs. 59/2005) forniti dall'Ufficio Rischio Ambientale della Regione Puglia;

   Impianti IPPC-AIA (D.Lgs. 59/2005) forniti *dall'ARPA* Puglia.

D3 - Danno potenziale elevato:

1. **Discariche, depuratori, inceneritori:**

   Discariche non soggette ad AIA da UdS Puglia,
   Carta Idrogeomorfologica, ARPA Puglia;
   Impianti di depurazione da ARPA Puglia e AIP, con digitalizzazione da UdS Puglia.

2. **Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati** come Cimiteri, cave, discariche anche se non in esercizio:

   UdS Puglia: Cimiteri; Aree estrattive; Depositi di rottami a cielo aperto, cimiteri di autoveicoli.

3. **Beni ambientali, paesaggistici e storico-archeologici** che racchiudono potenziali valori, ma non riconosciuti in termini normativi.

D2 - Danno potenziale medio:

1. **Zone agricole specializzate:**

   UdS Puglia: Uliveti; Vigneti; Frutteti e frutteti minori; Insediamenti produttivi agricoli; Seminativi semplici in aree non irrigue; Seminativi semplici in aree irrigue; Colture orticole in pieno campo in serra e sotto plastica; Aree agroforestali; Sistemi colturali e particellari complessi; Colture temporanee associate a colture permanenti; Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti; Altre colture permanenti; Acquacolture* (* per similitudine con gli insediamenti produttivi agricoli)

2. **Zone estrattive**

3. **Zone omogenee presenti negli strumenti urbanistici comunali e individuati** come ad esempio, verde urbano e parchi urbani, borghi rurali:

   UdS Puglia: *Aree verdi urbane.*

D1 – Danno potenziale moderato o nullo:

1. **Aree incolte o di scarso valore ambientale:**

   UdS Puglia: Rocce nude, falesie e affioramenti; Suoli rimaneggiati e artefatti; Spiagge, dune e sabbie.

2. **Aree agricole non specializzate** (prati, pascoli, etc.):

   UdS Puglia: Aree a pascolo naturale, praterie, incolti; Aree a ricolonizzazione naturale; Aree a ricolonizzazione artificiale; Aree a vegetazione sclerofilla; Aree interessate da incendi o altri eventi dannosi; Aree con vegetazione rada; Boschi di conifere; Boschi di latifoglie; Boschi misti di conifere e latifoglie; Cespuglieti e arbusteti; Superfici a copertura erbacea densa; Prati alberati e pascoli alberati.

3. **Aree umide** (zone umide, corpi idrici, boschi igrofili, lanche e meandri abbandonati, ecosistemi sito-specifici, etc.):

   UdS Puglia: Bacini con prevalente utilizzazione per scopi irrigui; Canali ed idrovie; Estuari; Fiumi torrenti e fossi; Lagune, laghi e stagni costieri; Paludi interne; Paludi salmastre; Saline.

4. **Superfici costruite, a bassa densità di edificazione in stato di abbandono o degrado riconosciuto**:

   UdS Puglia: *Insediamenti in disuso.*

8.4 Risultati dell'individuazione degli elementi esposti

L'immagine sottostante (Figura 8-1) riporta la mappa delle classi di danno degli elementi esposti presenti nell'area in esame nella quale sono stati indicati i principali.

Figura 8-1 Mappa delle classi di danno con la localizzazione degli elementi esposti principali presenti lungo il canale Cillarese (aree tratteggiare in rosso).

Vengono sotto evidenziati alcuni elementi rilevanti emersi dall'analisi svolta

Le aree esondabili limitrofe al canale Cillarese interessano, nel settore adiacente al canale in destra idrografica e nel tratto terminale su entrambe le sponde, elementi esposti ad elevato danno potenziale, costituiti:

- dal parco pubblico del Cillarese, che costeggia buona parte dello sviluppo del canale in destra e che è stato cautelativamente classificato in classe di danno molto elevato D4 (anche se a rigore la normativa indicherebbe una classe D2) per la sua collocazione in un contesto urbano intensamente frequentato, a ridosso del canale (pertanto con ridottissimi tempi di esondazione in caso di tracimazione della sponda sinistra) e in un settore di territorio la cui morfologia favorisce il rapido allagamento dell'intera area attrezzata;
- da aree portuali ed insediamenti dei grandi impianti di servizi pubblici e privati che ricadono all'interno della classe di danno D4. Nello specifico si segnalano i seguenti elementi esposti: zone interessate da attività economiche e produttive di rilevante interesse (quali la Brindisi Multiservizi S.r.l, Santa Teresa S.p.A., Naval Balsamo S.r.l.), aree sportiva (Circolo Tennis Brindisi), rete stradale e spazi accessori (parcheggio parco Cillarese, Via Provinciale S. Vito

con attraversamento del canale, via Ettore Ciciriello e Strada dei Pittachi), strutture strategiche come la zona militare portuale.

Figura 8-2 Localizzazione degli attraversamenti presenti lungo il tracciato in esame del canale Cillarese su base Ortofoto (foto satellitare Google). In blu il tracciato del canale Cillarese e in rosso il bacino del Cillarese. In magenta è indicata l'area di esondazione più estesa tra le simulate relativa allo scenario di dambreak.

Il canale Cillarese incontra un unico attraversamento rilevante costituito dal ponte con la SS16 e tre attraversamenti minori (Figura 8-2): della pista ciclabile (a monte del ponte della SS16), della strada comunale via dei Pittachi (a valle del ponte della SS16) e della strada provinciale S.Vito (poco prima dello sbocco a mare del canale Cillarese).

9 C5 – Modello bidimensionale

Per le analisi idrodinamiche finalizzate all'individuazione delle aree allagabili lungo il T. Cillarese è stato allestito un modello MIKE FLOOD con il seguente schema:

- modello MIKE 21 bidimensionale per la rappresentazione delle aree allagabili esterne all'alveo;
- modello MIKE 11 monodimensionale del T. Cillarese descritto nell'ambito dell'attività C5;
- connessione dinamica dei modelli MIKE 21 e MIKE 11.

Il modello monodimensionale dell'alveo è stato collegato dinamicamente alle adiacenti aree esterne alle sponde che sono state modellate mediante il codice di calcolo MIKE 21 con approccio bidimensionale su griglia di calcolo a celle quadrate di lato 1,62x1,62 m, mediante le speciali funzioni di MIKE FLOOD e nel rispetto delle reali quote spondali, come meglio descritto nel seguito.

9.1 Costruzione della griglia di calcolo

In un modello bidimensionale alle differenze finite, come MIKE 21, la descrizione geometrica è eseguita definendo la quota media del terreno in ogni cella di calcolo. Tale valore è usualmente calcolato, a partire dai rilievi topografici, mediante tecniche di interpolazione.

Nel caso in esame è stato necessario un processo di interpolazione per passare dalla griglia dei punti quotati dei due rilievi LiDAR che coprono l'area interessata (il LiDAR ministeriale a maglia equivalente a circa 1 m e il LiDAR della costa a maglia circa 2 m) a una griglia di calcolo a maglia regolare da impiegare come base topografica del modello bidimensionale.

Fondamentale è stata la definizione della dimensione del passo della griglia regolare da utilizzare per la messa a punto del modello, che influenza direttamente i tempi di calcolo e l'accuratezza spaziale della soluzione. All'aumentare del passo della griglia diminuiscono i tempi di calcolo, ma diminuisce l'accuratezza spaziale. La scelta deve quindi essere un compromesso tra le due esigenze.

Nel caso in esame la scelta è stata dettata dall'esigenza di rappresentare bene la geometria delle aree allagabili, delle strade e delle possibili vie di deflusso delle portate di esondazione. Vista la modesta estensione dell'area da indagare, si è deciso di adottare una griglia numerica a maglia 1,62x1,62 m derivante dalla scelta ottimale condotta da ArcGis per l'interpolazione dei due differenti LiDAR di base disponibili. Tale maglia, pur fornendo un grado di dettaglio e precisione elevato, determina una griglia di calcolo non particolarmente onerosa dal punto di vista computazionale, essendo costituita complessivamente da 545 righe x 1039 colonne (poco più di mezzo milione di punti di calcolo).

Nella figura a seguire è riportata la batimetria (o geometria di input) complessiva del modello. In marrone sono evidenziate le zone escluse dal calcolo (celle inattive) perché considerate sicuramente non allagabili. In verde scuro sono evidenziate le aree a quote inferiori mentre in giallo e marrone chiaro sono distinguibili le aree a quote maggiori. Nella figura, sovrapposto alla rappresentazione della batimetria, è riportato il tracciato dell'asse dell'alveo inciso inserito nel modello MIKE 11.

L'intero alveo inciso del T. Cillarese è stato escluso dalla simulazione con il modello bidimensionale MIKE 21, perché il suo contributo al deflusso degli idrogrammi simulati è già rappresentato con il modello monodimensionale MIKE 11 nell'ambito del codice MIKE FLOOD.

Figura 9-1 Batimetria del modello 2D a maglia 1,62x1,62 m.

9.2 Parametri e condizioni al contorno del modello MIKE FLOOD

Il modello di simulazione, oltre alla descrizione geometrica e alle condizioni al contorno idrodinamiche (portate, livelli), necessita la definizione di un'altra serie di parametri: passo di tempo di integrazione del sistema, coefficienti di scabrezza e coefficiente di viscosità turbolenta ("eddy viscosity").

Come passo di tempo di integrazione, per garantire la stabilità numerica in termini di vincoli sul numero di Courant della corrente, è stato utilizzato un valore pari a 0,5 secondi.

La viscosità turbolenta, legata alla non uniforme distribuzione del campo delle velocità, viene generalmente simulata nel modello tramite il coefficiente di "eddy viscosity". Nel caso in esame al coefficiente di eddy viscosity è stato assegnato un valore costante pari a 0,5 m^2/s sull'intera estensione del modello: tale parametro risulta di scarsa rilevanza in quanto simulando deflussi di esondazione con scorrimento superficiale gli aspetti legati alla formazione di vortici sono senza dubbio trascurabili rispetto ai prevalenti termini di resistenza idraulica al moto per attrito sul fondo.

La scabrezza rappresenta, all'interno delle equazioni del moto, il parametro che regola le perdite di energia distribuite, in primo luogo quelle per attrito sul fondo di scorrimento. Tale parametro è difficilmente valutabile con precisione ed è abitualmente utilizzato per tarare il modello. Nel caso in esame, cautelativamente, si è deciso di adottare un coefficiente medio di scabrezza di Strickler pari a 15 $m^{1/3}/s$, uniformemente distribuito su tutta l'area di analisi bidimensionale.

Al modello sono state assegnate le seguenti condizioni al contorno idrodinamiche:

- condizione al contorno di monte sul T. Cillarese (codice MIKE 11): idrogrammi di portata in ingresso in base allo scenario di simulazione considerato;
- condizione al contorno di valle allo sbocco in mare del T. Cillarese (in entrambi i codici MIKE 11 e MIKE 21): livello costante pari 0,5 m s.m.;
- condizioni al contorno "interne" di collegamento tra i due modelli MIKE 11 e MIKE 21: in corrispondenza di tutte le celle lungo le sponde destra e sinistra vengono applicate equazioni tipo "stramazzo a larga soglia" con quote di sfioro pari ai valori maggiori tra quelli delle celle del modello 2D e quelli corrispondenti delle quote di sponda delle sezioni d'alveo di MIKE 11, opportunamente interpolate.

9.3 Descrizione delle simulazioni e delle analisi idrauliche condotte

9.3.1 Scenari di rottura diga – simulazione SIM1

9.3.1.1 Collasso dello sbarramento - simulazione SIM1/1

Definizione dell'onda di piena di rottura diga

Per la determinazione dell'onda di piena indotta dall'ipotetico collasso dello sbarramento di Cillarese si è fatto riferimento alle "Raccomandazioni per la mappatura delle aree a rischio di inondazione conseguente a manovre degli organi di scarico o ad ipotetico collasso delle dighe" allegate alla Circolare P.C.M. 13 dicembre 1995, n. DSTN/2/22806, che riportano testualmente quanto segue in riferimento alle dighe in materiali sciolti.

> *Nelle dighe di materiali sciolti l'asportazione del rilevato avviene con modalità di sviluppo della breccia nel corpo diga dipendenti dall'intensità dell'azione erosiva dell'acqua tracimante lo sbarramento. Da quanto suddetto ne consegue che l'asportazione del rilevato risulta praticamente sempre parziale e progressiva.*

Per le dighe di materiali sciolti si ipotizza che il collasso sia dovuto ad una piena di carattere eccezionale, non smaltita dagli organi di scarico della diga, e che causi perciò il completo riempimento del serbatoio ed il sormonto dello sbarramento. Come condizione idraulica iniziale è dunque da assumersi un livello del serbatoio pari alla quota del coronamento della diga.

Salvo casi particolari, …, le portate in ingresso al serbatoio durante lo svolgersi del fenomeno di efflusso per brecciatura della diga possono essere trascurate, risultando il loro effetto contenuto nei riguardi del processo di generazione dell'onda di piena artificiale da rottura. Le portate rilasciate attraverso gli organi di scarico superficiale sono valutate in relazione ai livelli idrici presenti nel serbatoio. Trattandosi di livelli superiori a quelli di progetto, occorre verificare la reale capacità di smaltimento delle portate da parte delle opere di scarico. Le portate rilasciate attraverso gli scarichi di mezzofondo e di fondo possono invece essere trascurate.

Per le dighe di materiali sciolti l'idrogramma delle portate effluenti va determinato utilizzando modelli matematico-numerici che permettono di riprodurre l'interazione tra la corrente defluente attraverso la breccia ed il materiale solido costituente il rilevato. È raccomandato il confronto tra i risultati forniti dai modelli matematico-numerici con le formule empiriche basate su analisi statistiche dei dati relativi ai casi storici di rottura.

Seguendo tali raccomandazioni, si è proceduto come segue:

- sono state applicate formule empiriche per valutare la portata massima al colmo dell'idrogramma di rottura diga e la larghezza della breccia in funzione del volume massimo invasato dallo sbarramento e dell'altezza di quest'ultimo;
- è stato applicato un modello numerico basato sul codice di calcolo MIKE 11 del DHI – modulo DAMBREAK – per la determinazione dell'evoluzione temporale della breccia nel corpo diga in funzione della capacità erosiva dell'onda di piena fuoriuscente, al fine di calcolare l'idrogramma di piena risultante, tarando il modello in modo da ottenere una portata al colmo e una larghezza finale della breccia congruenti con i valori forniti dalle formule empiriche.

Sono state applicate le seguenti formule empiriche:

Formula di Costa 1: $Q_p = 325\left(\frac{HV}{10^6}\right)^{0,42}$

Formula di Costa 2: $Q_p = 10,5H^{1,87}$

Formula di Costa 3: $Q_p = 961\left(\frac{V}{10^6}\right)^{0,48}$

Formula di Molinaro e Fenaroli: $\frac{Q_p}{H^{5/2}\sqrt{g}} = 0,116\left(\frac{V}{H^3}\right)^{0,221}$

Formula di Webby: $\ln\left[\frac{Q_p}{\left(gV^{5/3}\right)^{1/2}}\right] = 1,6746 \cdot \ln\left[0,2265\left(\frac{H}{V^{1/3}}\right)\right]$

Formule basate su considerazioni energetiche: $E_c = 1,32H^{0,46}\left(V^{1/3}\right)^{0,06}$

$L_b = 1,85H^{1,06}\left(\frac{V}{H^3}\right)^{0,061}$

$Q_p = \frac{2}{3}E_cL_b\sqrt{\frac{2}{3}gE_c}$

dove:

Q_p = portata di picco (m^3/s);

H = altezza dello sbarramento (m);

V = volume di invaso (m^3);

E_c = energia critica sulla breccia (m);

L_b = larghezza della breccia (m).

L'invaso di Cillarese è caratterizzato dai seguenti parametri di interesse:

- quota del piano di coronamento 22,50 m s.m.;
- quota minima di regolazione 5,00 m s.m.;
- altezza diga sul piano campagna H=17,50 m;
- volume di invaso alla quota del piano di coronamento, desunto dalla curva area-volumi, $V=9{,}12 \cdot 10^6$ m^3.

Nella Tabella 9.1 sono riassunti i valori delle portate al colmo di rottura della diga di Cillarese calcolati con le 6 formule empiriche sopra indicate, il valore medio degli stessi e il valore medio più una volta lo scarto quadratico medio.

Tabella 9.1 Portate al colmo (m^3/s) di rottura diga in base alle formule empiriche.

COSTA 1	COSTA 2	COSTA 3	MOLINARO	WEBBY	ENERGIA	MEDIA	MEDIA+SQM
2736	2217	2777	2409	2584	1824	2424	2785

Alla luce di tali risultati, si è deciso di tarare il modello numerico di simulazione della formazione della breccia considerando un valore di portata al colmo compreso tra la media e la media più una volta lo scarto quadratico medio dei valori ottenuti applicando le formule empiriche, ovvero compreso tra 2400 e 2800 m^3/s.

Per le dimensioni della breccia si è invece considerato come valore massimo quello ottenuto applicando le formule basate su considerazioni energetiche, pari a 60,52 m.

Per la messa a punto e successiva taratura del modello numerico basato sul codice di calcolo MIKE 11 – modulo DAMBREAK – sono stati introdotti i seguenti parametri, condizioni al contorno ed ipotesi di calcolo:

- volume di invaso della diga rappresentato mediante la curva "livelli-aree" del Foglio condizioni;
- corpo diga caratterizzato dai seguenti parametri:
  - larghezza del coronamento pari a 6,00 m;
  - scarpe di monte e di valle pari a 2,5:1;
  - quota di coronamento 22,50 m s.m.;
  - lunghezza del coronamento 300 m;
  - diametro medio rappresentativo del materiale di riempimento $1 \cdot 10^{-6}$ m;
  - rapporto tra densità del materiale e densità dell'acqua pari a 2,6;
  - porosità del materiale 0,4;

- parametro di Shields 0,06 per il calcolo del trasporto solido effettuato applicando la formulazione di Engelund-Hansen;
- indice di erosione laterale 1,08 (rapporto tra velocità di erosione laterale e velocità di erosione verticale nel corso di formazione della breccia);
- minima quota di fondo finale della breccia 5,00 m s.m. (pari alla quota minima di regolazione);
- massima larghezza di fondo finale della breccia pari a 60,00 m;
- pendenza delle scarpe della breccia 1:1;

• condizioni al contorno e ipotesi di formazione della breccia:

- livello iniziale nel lago pari alla quota di coronamento della diga 22,50 m s.m.;
- portata in ingresso nel lago trascurabile (pari a 0,1 m^3/s);
- scarico di superficie attivo dall'istante iniziale della simulazione;
- formazione della breccia a partire dall'istante iniziale della simulazione;
- quota di fondo iniziale della breccia pari a 20,00 m s.m.;
- larghezza di fondo iniziale della breccia pari a 2,00 m.

Nella Figura 9-2 è rappresentato l'idrogramma di rottura diga calcolato con il modello numerico: nei primi 10 minuti circa risulta evidente l'effetto di svuotamento dell'invaso causato dallo scarico di superficie (la portata, a partire da un valore massimo prossimo a 700 m^3/s, diminuisce al decrescere del livello di invaso) al quale si somma il ramo crescente indotto dalla formazione della breccia che per erosione si approfondisce e si allarga nel corpo diga. La portata massima al colmo dell'idrogramma risultante è pari a **2866** m^3/s.

Nella Figura 9-3 è riportato il diagramma di evoluzione della breccia nel corpo della diga che mostra come la larghezza della breccia inizialmente aumenti più lentamente, per poi progredire rapidamente entro la prima ora per effetto del grande potere erosivo indotto dagli elevati valori di portata defluente; dopo la prima ora si assiste infine ad un ulteriore modesto aumento della larghezza della breccia che tende a stabilizzarsi al diminuire delle portate del ramo di esaurimento dell'idrogramma.

Figura 9-2 Idrogramma di rottura della diga di Cillarese.

Figura 9-3 Diagramma di evoluzione della breccia nel corpo della diga di Cillarese.

Propagazione dell'onda di piena di rottura diga

L'idrogramma di piena indotto dalla rottura della diga di Cillarese, rappresentato nella Figura 9-2, è stato inserito come condizione al contorno di monte nel modello MIKE Flood al fine di valutare gli effetti di esondazione ed allagamento causati da tale scenario catastrofico (scenario SIM1).

Nella Figura 9-4, sull'intera estensione del modello, è riportata la distribuzione calcolata con il codice di calcolo MIKE 21 delle massime altezze d'acqua rispetto al piano campagna verificatesi nel corso dell'evento di propagazione dell'onda di piena artificiale: le tonalità di giallo-arancio-rosso evidenziano le aree di esondazione con tiranti idrici maggiori. Le aree interne all'alveo

inciso del canale Cillarese non sono rappresentate perché, come sopra detto, il loro contributo al deflusso è stato già preso in conto nell'ambito del modello MIKE 11.

Nella Figura 9-5 è riportata anche la distribuzione areale delle massime velocità di deflusso raggiunte nel corso dell'evento di piena artificiale ipotizzato, a prescindere dall'istante in cui si sono verificate.

Nella Figura 9-6 è infine riportata una mappa che mostra le isocrone del fronte di avanzamento dell'onda di collasso per tempi successivi dall'istante di rottura previsto: 5, 10, 20, 30, 45 e 60 minuti. Da questa mappa risultano pertanto evidenti i tempi di propagazione dell'onda di piena artificiale, che interessa in modo molto rapido la maggior parte delle aree adiacenti al canale.

Figura 9-4 Scenario SIM1. Mappa delle massime altezze idriche simulate nel corso della propagazione dell'onda di piena artificiale indotta dall'ipotetico collasso della diga di Cillarese.

Figura 9-5 Scenario SIM1. Mappa delle massime velocità di deflusso simulate nel corso della propagazione dell'onda di piena artificiale indotta dall'ipotetico collasso della diga di Cillarese.

Figura 9-6 Scenario SIM1. Isocrone del fronte di avanzamento dell'onda di collasso della diga di Cillarese per tempi successivi dall'istante di rottura previsto.

Nella Figura 9-7 è rappresentato il profilo longitudinale di inviluppo delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso lungo il canale Cillarese fino alla foce in mare. La linea rossa evidenzia il profilo longitudinale delle portate massime al colmo defluite in alveo nel corso dell'evento.

Il collasso dello sbarramento genera pertanto un'onda dinamica con valore di portata al colmo sulla prima sezione a valle dello sbarramento pari a circa 2800 m^3/s che, procedendo verso valle, si lamina solo parzialmente a causa del breve tragitto verso la foce e delle limitate esondazioni che in parte rientrano successivamente in alveo. La Figura 9-8 dimostra chiaramente questo aspetto.

Nella Figura 9-9 è rappresentato il profilo longitudinale lungo il canale Cillarese delle massime portate dell'onda di rottura.

Nella Figura 9-10 è riportato il profilo longitudinale delle massime velocità dell'onda di rottura.

Nella Figura 9-11 è riportato il profilo dei massimi tiranti idrici generati dall'onda di rottura nell'alveo del canale Cillarese.

Nella Figura 9-12 è infine rappresentato il profilo longitudinale dei tempi di arrivo dell'onda di rottura, che evidenzia come la propagazione del colmo si sviluppi molto rapidamente.

Figura 9-7 Scenario SIM1. Profilo longitudinale delle massime quote di pelo libero all'interno dell'alveo inciso lungo il canale Cillarese fino alla foce in mare. La linea rossa rappresenta l'andamento delle portate massime defluite in alveo.

Figura 9-8 Scenario SIM1. Idrogrammi di propagazione dell'onda di rottura ottenuti sommando i contributi di portata defluenti in alveo e quelli defluenti in golena.

Figura 9-9 Scenario SIM1. Profilo longitudinale lungo il canale Cillarese delle massime portate dell'onda di rottura.

Figura 9-10 Scenario SIM1. Profilo delle massime velocità dell'onda di rottura nell'alveo del canale Cillarese.

Figura 9-11 Scenario SIM1. Profilo dei massimi tiranti idrici generati dall'onda di rottura nell'alveo del canale Cillarese.

Figura 9-12 Scenario SIM1. Profilo dei tempi di arrivo dell'onda di rottura.

9.3.1.2 Apertura istantanea dello scarico di fondo – simulazione SIM1/2

L'onda che transita nel canale in seguito all'apertura brusca della paratoia che intercetta lo scarico di fondo è sempre contenuta nell'alveo del canale artificiale posto a valle in quanto la portata al colmo risulta inferiore a 15 m^3/s con livello di invaso alla quota massima di regolazione.

Non è stata pertanto condotta una specifica simulazione con il modello idrodinamico bidimensionale.

9.3.2 Risultati dell'analisi degli elementi esposti per lo scenario di Dambreak (scenario SIM1/1)

Per caratterizzare l'effetto delle esondazioni sul territorio circostante la diga e il canale del Cillarese è stata esaminata la regione composta dall'inviluppo delle aree di esondazioni della simulazione di rottura dello sbarramento (eseguita con modello numerico MIKE 21) individuando e classificando gli elementi vulnerabili presenti al suo interno.

Per la descrizione dell'analisi svolta al fine dell'individuazione degli elementi esposti vulnerabili e l'attribuzione delle classi di danno in base alla normativa vigente, si rimanda alla precedente descrizione dell'attività C6 paragrafo 8 e alla mappa degli esposti vulnerabili dell'area di esondazione riportate in Figura 9-13.

Figura 9-13 Mappa degli esposti vulnerabili all'interno dell'area di esondazione relativa allo scenario di collasso della diga del Cillarese.

L'area di esondazione si presenta di dimensioni contenute grazie alla particolare morfologia del settore di territorio coinvolto, che concentra le zone allagate nelle aree adiacenti il corso del canale.

Vengono sotto evidenziati i principali elementi emersi dall'analisi:

- Gli elementi esposti classificati all'interno della classe di danno D4 compresi all'interno dell'area allagata si localizzano prevalentemente lungo la sponda destra e nella parte terminale del canale in Figura 9-14 (prossimo allo sbocco a mare). Questi sono costituiti da: aree a parco pubblico (meglio presentato nel punto successivo); aree portuali (in destra e sinistra), insediamenti dei grandi impianti di servizi pubblici e privati (in destra e sinistra), aree sportive (in sinistra) e insediamento industriale o artigianale con spazi annessi (in destra).
- In sponda destra del canale Cillarese, diversamente da quanto indicato all'interno degli strati informativi utilizzati per l'analisi degli esposti (Carta dell'uso del suolo della regione Puglia), è presente il parco pubblico. Vista la vicinanza con l'alveo del canale, l'appartenenza ad un contesto urbano e la particolare morfologia che caratterizza la regione in cui è inserita la zona a parco, si è scelto di elevare la relativa classe di danno da D2 (come da normativa) a D4. A ulteriore motivazione della scelta vanno considerati i tempi rapidissimi di allagamento da quando inizia la tracimazione del canale Cillarese, con evidente forte rischio per gli eventuali fruitori dell'area.
- Appartenenti alla classe di danno elevato sono presenti all'interno dell'area allagata, oltre agli elementi sopra segnalati, alcuni tratti della rete stradale e spazi accessori quali: Via Provinciale S. Vito (in sinistra e destra) con attraversamento del canale, via Ettore Ciciriello (in sinistra) e Strada dei Pittachi (in sinistra);

Figura 9-14 Dettaglio degli elementi esposti (in viola D4 e arancione D2) all'interno dell'area di esondazione dello scenario di Dambreak (in ciano) limitrofi allo sbocco del canale Cillarese nel Seno di Ponente del Porto di Brindisi.

9.3.3 Scenari con eventi di assegnato tempo di ritorno

Con il modello MIKE FLOOD sono stati condotti i seguenti scenari di simulazione che ipotizzano il deflusso, a partire dalla diga di Cillarese, degli idrogrammi di assegnato tempo di ritorno calcolati dall'AdB introdotti in precedenza:

- portata con tempo di ritorno 30 anni e portata al colmo pari a 101 m^3/s (scenario **SIM2**);
- portata con tempo di ritorno 200 anni e portata al colmo pari a 193 m^3/s (scenario **SIM3**);
- portata con tempo di ritorno 500 anni e portata al colmo pari a 240 m^3/s (scenario **SIM4**).

Nelle figure seguenti sono riportate per ciascun evento le mappe delle massime altezze idriche raggiunte nel corso dell'evento e delle massime velocità di deflusso.

Figura 9-15 Scenario SIM2. Mappa delle massime altezze idriche dell'evento con TR=30 anni e portata al colmo pari a 101 m^3/s.

Figura 9-16 Scenario SIM2. Mappa delle massime velocità di flusso dell'evento con TR=30 anni e portata al colmo pari a 101 m^3/s.

Figura 9-17 Scenario SIM3. Mappa delle massime altezze idriche dell'evento con TR=200 anni e portata al colmo pari a 193 m^3/s.

Figura 9-18 Scenario SIM3. Mappa delle massime velocità di flusso dell'evento con TR=200 anni e portata al colmo pari a 193 m^3/s.

Figura 9-19 Scenario SIM4. Mappa delle massime altezze idriche dell'evento con TR=500 anni e portata al colmo pari a 240 m^3/s.

Figura 9-20 Scenario SIM4. Mappa delle massime velocità di flusso dell'evento con TR=500 anni e portata al colmo pari a 240 m^3/s.

9.3.4 Risultati dell'analisi degli elementi esposti per gli scenari con eventi di assegnato tempo di ritorno.

Di seguito sono riportate le mappe degli elementi esposti vulnerabili derivanti dagli scenari con assegnato tempo di ritorno (TR30; TR200; TR500).

Figura 9-21 Scenario SIM2 (TR30). Mappa degli esposti vulnerabili (classi di danno: in giallo D1; arancione D2; rosso D3; viola D4) sull'impronta dell'area di esondazione (in magenta).

Figura 9-22 Scenario SIM3 (TR200). Mappa degli esposti vulnerabili (classi di danno: in giallo D1; arancione D2; rosso D3; viola D4) sull'impronta dell'area di esondazione (in magenta).

Figura 9-23 Scenario SIM4 (TR500). Mappa degli esposti vulnerabili (classi di danno: in giallo D1; arancione D2; rosso D3; viola D4) sull'impronta dell'area di esondazione (in magenta).

Dalla loro analisi si osserva che sostanzialmente in tutti gli scenari sono presenti gli stessi elementi esposti di classe D4 localizzati sia in sponda destra lungo il corso del canale (parco del Cillarese), sia nelle aree circostanti allo sbocco del canale nel Seno di Ponente del Porto di Brindisi. Questa analogia, che comporta una situazione di forte rischio già per il tempo di ritorno

trentennale, particolarmente nella zona a parco in destra idrografica, è dovuta dalle caratteristiche morfologiche del territorio che determinano solo piccole differenze nelle aree di esondazione dei vari scenari simulati.

Nello specifico si rimanda al paragrafo 9.3.2 per la loro identificazione nel dettaglio vista l'analogia tra gli esposti vulnerabili individuati all'interno delle aree allagate simulate per eventi di assegnato tempo di ritorno e per l'ipotetico collasso della diga.

10 C7 – Proposte per il Piano di Laminazione della diga del Cillarese

Sulla base delle risultanze delle elaborazioni descritte nei precedenti capitoli, vengono sotto presentate le possibili opzioni, ritenute significative tra i diversi scenari analizzati, per la definizione da parte degli enti competenti del Piano di Laminazione della diga.

Le proposte delle possibili modalità di gestione dell'invaso sono precedute da una sintetica ricapitolazione dei principali dati di riferimento a supporto delle valutazioni.

Caratteristiche dell'invaso

I principali dati di supporto per la valutazione e gestione degli effetti di laminazione possono essere così sintetizzati.

- quota di massimo invaso 20,50 m s.l.m.;
- quota massima di regolazione 17,00 m s.l.m.;
- quota minima di regolazione 5,00 m s.l.m.;
- volume utile di regolazione 4,2 Mmc,
- volume di laminazione 2,2 Mmc
- portata esitata dallo scarico di superficie con livello d'invaso a 20,50 m s.l.m. 325 mc/s.
- portata esitata dallo scarico di fondo con livello d'invaso a 17,00 m s.l.m. 15 mc/s

In particolare, la struttura sfiorante dello scarico di superficie è costituita da un'unica soglia di lunghezza 25 m.

Volumi utilizzati

In base ai dati storici di prelievo del periodo 2001 – 2017 risultano i seguenti valori di riferimento dei volumi idrici utilizzati annualmente.

- Volume utilizzato medio: **1,8** Mmc/anno
- Volume utilizzato massimo: **3,0** Mmc/anno
- Volume utilizzato minimo: **0,8** Mmc/anno

Capacità di deflusso dell'alveo a valle dell'invaso

Le condizioni di deflusso nell'alveo del canale Cillarese a valle dell'invaso sono state simulate con modello idrodinamico mono - bidimensionale nell'intero campo di deflussi fino alla portata di dam break; le aree esondabili sono state confrontate con la dislocazione sul territorio degli elementi esposti vulnerabili.

Data la presenza in adiacenza alla sponda destra del canale di aree a parco pubblico cautelativamente considerate in classe di danno potenziale D4 (molto elevato), la portata di soglia di allerta rossa deve essere posizionata sulla capacità di smaltimento dell'alveo prima della tracimazione; di conseguenza le soglie di allerta arancione e gialla possono essere definite considerando rispettivamente il franco di 0,5 m e di 1 m rispetto alla quota spondale nel punto di inizio tracimazione.

Con il suddetto criterio, in base alle verifiche idrauliche del canale risultano i valori sotto riportati.

- **Allerta gialla**: **Q = 15 m^3/s**; effetti sul territorio: portata interamente contenuta in alveo con franco minimo 1,0 m.

- **Allerta arancione**: **Q = 30 m^3/s**; effetti sul territorio: portata interamente contenuta in alveo con franco minimo 0,5 m.

- **Allerta rossa: Q= 50 m^3/s**; effetti sul territorio: portata interamente contenuta in alveo con franco minimo 0,0 m.

Per la determinazione della portata **QAMax** potrà essere fatto riferimento, seguendo il criterio ordinario, alla portata corrispondente alla soglia di allerta rossa: **QAmax = 50 m^3/s.**

Tale valore potrebbe peraltro essere ridotto, fino eventualmente alla portata di allerta arancione (30 m^2/s) in relazione alle modalità che saranno previste per la gestione dello stato di allerta diga, in considerazione del fatto che la presenza di aree vulnerabili in classe di danno molto elevato adiacenti al canale comporta di fatto una situazione di rischio idraulico grave già in fase di inizio esondazione.

Apporti all'invaso

Gli apporti all'invaso del bacino idrografico (superficie 152 kmq) sono stati ricostruiti con il modello idrologico a partire dai dati pluviometrici disponibili nel periodo 1976-2000 e dai dati di gestione dell'invaso negli ultimi 17 anni, per un periodo complessivo di 42 anni.

Gli eventi di piena storici in ingresso all'invaso coprono un *range* di portate al colmo piuttosto basse (valore massimo 70 m^3/s, poco superiore alla capacità di deflusso del canale Cillarese (50 m^3/s).

Pertanto, data la limitata rappresentatività della serie storica, è stato fatto riferimento agli idrogrammi sintetici di tempo di ritorno 30, 200 e 500 anni elaborati dall'Autorità di Bacino della Regione Puglia, a cui competono rispettivamente le portate al colmo di 101 m^3/s, 193 m^3/s e 240 m^3/s.

Scenari di laminazione

L'obiettivo primario del Piano di Laminazione consisterebbe nel far defluire a valle della diga gli idrogrammi di piena in ingresso riducendo le portate al colmo al disotto della soglia di allertamento rossa, evitando l'esondazione in aree ad elevato rischio idraulico.

Le analisi di scenario eseguite per l'invaso del Cillarese hanno evidenziato che tale obiettivo non è pienamente perseguibile in riferimento agli eventi considerati.

È stata infatti verificata sia sulla serie ricostruita degli eventi storici in ingresso all'invaso sia sugli idrogrammi statistici di assegnato tempo di ritorno una capacità di laminazione dei colmi di piena molto limitata, dovuta alla conformazione della soglia fissa dello scarico di superficie e alla scarsa capacità dello scarico di fondo, qualora utilizzato con funzione di attenuazione dei picchi di piena.

Complessivamente le analisi condotte evidenziano da un lato una limitata capacità di laminazione dell'invaso in corrispondenza di livelli elevati, spesso raggiunti per lunghi periodi nell'anno, dall'altro l'analisi idrologica evidenzia portate in ingresso alla diga tipicamente molto contenute e sempre compatibili con la capacità di smaltimento del canale a valle.

L'effetto di laminazione più marcato del colmo di piena prodotto dalle simulazioni con gli idrogrammi di assegnato tempo di ritorno è costituito da una riduzione del colmo dell'evento trentennale da 101 mc/s a 70 mc/s (portata che determina comunque consistenti esondazioni dal canale Cillarese), ottenibile in una condizione di gestione estrema, con invaso quasi vuoto e scarico di fondo aperto (cioè sostanzialmente utilizzando l'invaso come una cassa d'espansione in linea).

Considerando questi risultati, il Piano di Laminazione dovrebbe essere più utilmente mirato a supportare le procedure di protezione del territorio in caso di piena incrementando i tempi di propagazione delle portate critiche a valle della diga.

Si pone pertanto un obiettivo di estensione dei tempi di laminazione incrementando per quanto possibile lo sfasamento tra l'idrogramma in ingresso e quello in uscita dall'invaso in modo da aumentare i margini di tempo disponibili per l'allertamento e per l'evacuazione delle aree a rischio.

Le simulazioni eseguite con questo obiettivo (descritte in dettaglio nel par. 7.3.2.7) hanno consentito di valutare i **tempi di ritardo nel raggiungimento della portata di allerta rossa nel canale Cillarese**, rispetto alla situazione senza diga, con varie ipotesi di limitazione di invaso.

Vengono sotto ripresi gli scenari ritenuti più significativi.

QUOTA LIMITAZIONE INVASO (m s.l.m.)	VOLUME UTILE RESIDUO (Mmc)	RITARDO DEL RAGGIUNGIMENTO DELLA PORTATA DI ALLERTA ROSSA (50 mc/s) CON EVENTO TRENTENNALE (ore)
14,00	2,8	**8**
12,00	1,9	**11**
10,00	1,2	**12**
8,00	0,7	**14**

Il primo scenario, con quota d'invaso limitata a 14 m s.l.m., è quasi compatibile con il volume di utilizzo massimo dell'invaso nel periodo 2001-2017 (3 Mmc), pur comportando una riduzione della capacità utile di circa 1,4 Mmc.

Il secondo scenario è teoricamente compatibile con la condizione di utilizzo medio dell'invaso, mentre gli scenari successivi, con limitazioni a 10 e a 8 m s.l.m., si collocano a cavallo della condizione di utilizzo minimo dell'invaso.

Con riferimento alla definizione statistica delle quote di limitazione di invaso descritta in dettaglio nel par. 7.2, il solo scenario con limitazione a 14 m s.l.m. sopra riportato trova riscontro nello scenario statistico n. 1, corrispondente al tempo di ritorno di 10 anni e all'intervallo di calcolo dei volumi di 14 giorni. Esso prevede infatti l'adozione di quote intorno a 14 m s.l.m. nel periodo ottobre – febbraio. Tutti gli altri scenari di regolazione die livelli analizzati su base statistica sono meno gravosi di quelli sopra prospettati.

Nella valutazione dello scenario più opportuno tra quelli sopra riportati per gestire i tempi di intervento a valle, tenendo conto anche delle esigenze di utilizzo dell'invaso, va considerata la possibilità di ottenere un significativo supporto dall'adozione di una modalità di gestione dinamica.

Ipotizzando di disporre, in base a un modello di previsione idrologica, di un anticipo di 48 ore nella previsione di arrivo dell'onda di piena all'invaso e di azionare lo scarico di fondo per aumentare il volume di laminazione disponibile, va considerato che:

- partendo dalla limitazione a quota 14 m s.l.m. in 48 ore può essere scaricato un volume di circa 1,9 Mmc, che consentirebbe di portarsi prima dell'arrivo della piena, con apporti all'invaso in regime ordinario, su uno scenario intermedio tra la limitazione a 10 m s.l.m. e a 8 m s.l.m.;
- partendo dalla limitazione a quota 12 m s.l.m. o inferiori, in 48 ore può essere scaricato, sempre in presenza di apporti ordinari all'invaso, un volume sufficiente a portarsi, prima dell'arrivo della piena, nella condizione di invaso pressoché vuoto.

Infine, per assicurare l'affidabilità dei dati di previsione da utilizzare per la gestione delle emergenze è opportuno prevedere un adeguamento del sistema di monitoraggio:

- sia sul canale Cillarese in corrispondenza della sezione di deflusso limitante a monte del primo attraversamento (ponticello della strada locale denominato "attraversamento 1" nel par. 5.1), con la rilevazione/evidenziazione dei livelli di soglia;
- sia sulla diga, con una accurata rilevazione topografica della curva di invaso attraverso la quale potranno essere valutate, in associazione alla rilevazione idrometrica, le portate in ingresso su cui si baseranno le soglie di attivazione degli stati di allerta; sarà inoltre opportuna la verifica/ritaratura sperimentale della scala di deflusso dello scarico di fondo.