CONSORZIO DEL TICINO
MILANO

Prof. Ing. Ugo Maione[1]
Prof. Ing. Paolo Mignosa[2]

CONSEGUENZE DI UNA MODIFICA DELL'INCILE DEL LAGO MAGGIORE SUGLI ALTI LIVELLI LACUALI E SULLE PORTATE DI PIENA DEL TICINO EMISSARIO

[1]Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (DIIAR), Politecnico di Milano.
[2]Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma

Pubblicazione n. 20

Milano, novembre 1997

CONSORZIO DEL TICINO
MILANO

Prof; Ing. Ugo Maione[1]
Prof. Ing. Paolo Mignosa[2]

CONSEGUENZE DI UNA MODIFICA DELL'INCILE DEL LAGO MAGGIORE SUGLI ALTI LIVELLI LACUALI E SULLE PORTATE DI PIENA DEL TICINO EMISSARIO

[1] Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (DIIAR), Politecnico di Milano
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma

Pubblicazione n. 20

Milano, novembre 1997

Conseguenze di una modifica dell'incile del Lago Maggiore sugli alti livelli lacuali e sulle portate di piena del Ticino emissario.

Sommario. A seguito della piena eccezionale dell'autunno 1993 si è rinnovata l'attenzione da parte di ricercatori ed autorità pubbliche italiani e svizzere circa la possibilità di modificare, con opportuni interventi di natura idraulica, il regime delle piene del Lago Maggiore, senza peggiorare sensibilmente quello del Ticino emissario.
Scopo del presente lavoro è appunto quello di valutare le ripercussioni che potrebbe avere sugli stati di piena del Verbano e del Ticino un aumento della capacità di deflusso dell'incile di circa 300 m^3/s quando la quota idrica a Sesto Calende è pari a 195.80 m s.l.m., valutandone le influenze sul decorso di tutte le piene che si sono verificate dall'entrata in esercizio dello sbarramento ad oggi.
Dalle elaborazioni svolte è stato possibile quantificare i consistenti miglioramenti indotti al regime di piena del Lago Maggiore dall'aumento di capacità di deflusso prospettato. Essi si configurano, essenzialmente, con il decremento di circa 50 cm sui livelli di colmo per le piene di maggiore tempo di ritorno, e con una riduzione di oltre il 50% delle permanenze complessive; ma si è potuto altresì valutare il peggioramento che contemporaneamente si realizzerebbe nel Ticino emissario, dove sono prevedibili incrementi delle portate al colmo di più di 100 m^3/s.

Effects of an increasing capacity of Lake Maggiore outlet on flood levels an peak discharges in the Ticino River

Abstract. Following the exceptional flood of autumn, 1993, renewed attention of italian and switzerland researchers and public authorities has then been focused on the possibility to reduce, by means of hydraulic works at its outlet, the higher levels of Maggiore Lake, without increasing too much in the meantime the peak discharges in the downstream Ticino river.
Aim of the present work is to evaluate the effects on lake levels and river discharges of an increasing outflowing capacity of about 300 m^3/s (when the water level at Sesto Calende is equal to 195.80 m s.l.m.). This has been done simulating the historical serie of floods occurring in the regulated period 1943-1995.
Comparig the two series (the historical and the modified) it was possible to quantify the reduction of peak levels in the lake caused by the increased rating curve. For high return periods the reduction was about 50 cm and the total duration of high water levels was reduced of more than 50%. Conversely peak discharges in the Ticino River were increased of more than 100 m^3/s.

Ugo Maione [1] e Paolo Mignosa [2]

Conseguenze di una modifica dell'incile del Lago Maggiore sugli alti livelli lacuali e sulle portate di piena del Ticino emissario.

[1] Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale e del Rilevamento (DIIAR), Politecnico di Milano.
[2] Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma.

1. Introduzione

Nell'autunno del 1993 il Lago Maggiore è stato interessato da un evento di piena eccezionale: il livello di colmo ha raggiunto i +4.27 m sullo zero di Sesto Calende, mentre nel Ticino emissario si sono verificate portate superiori a 2500 m^3/s. Eccezionale è stata anche la durata complessiva dell'esondazione dal Lago, che ha raggiunto i 25 giorni consecutivi (Maione e Mignosa, 1995), provocando ingenti danni alle popolazioni ed alle attività rivierasche, quantificabili in quasi 400 miliardi di lire (Pervangher, 1993). Alla piena può essere attribuito un tempo di ritorno più che centenario. Al di là di questo evento eccezionale, il Verbano è comunque in generale interessato da un regime di piene che presenta, con una frequenza pari a quasi una volta ogni 2 anni, livelli al colmo superiori a +2.50 m sullo zero di Sesto Calende [1].

Negli ultimi anni è così cresciuta l'attenzione da parte di studiosi ed autorità pubbliche italiani e svizzere circa la possibilità di modificare, con opportuni interventi di natura idraulica, il regime delle piene del Verbano, o quanto meno di ridurne i danni con la predisposizione di idonei piani di preallarme e protezione civile.

Le proposte strutturali elaborate sono principalmente volte alla realizzazione di un consistente aumento della capacità di deflusso dell'incile, ottenibile con diverse modalità: dragaggio di un tratto dell'alveo a monte ed a valle della traversa, apertura della conca di navigazione alla Miorina al fine di aumentare la luce di deflusso attualmente disponibile, costruzione di una galleria o di un canale sussidiario [2]. Rientrano in questa logica le proposte di modifica dell'incile recentemente avanzate da parte della Delegazione Svizzera per la Regolazione del Lago Maggiore (U.F.E.A., 1993, 1994a, 1994b).

---

[1] L'esondazione inizia a Pallanza quando il Lago raggiunge i 195.50 m s.l.m., corrispondenti a +2.48 m rispetto allo zero dell'idrometro di Sesto Calende (Ambrosetti et al., 1994).

[2] Quest'ultima ipotesi era stata peraltro già presa in considerazione nel progetto originario della sbarramento, seppure non per ridurre i livelli di colmo delle piene, ma per garantire le portate minime necessarie alle utenze (Verbale della Conf. dei Delegati tecnici italiani e svizzeri, 1938).

Scopo del presente lavoro è appunto quello di valutare le ripercussioni che potrebbe avere il dragaggio dell'alveo nel primo tratto di emissario, a monte ed a valle della traversa della Miorina, in modo da ottenere un aumento della capacità di deflusso di circa 300 m^3/s quando il livello idrico a Sesto Calende è pari a 195.80 m s.l.m..

L'analisi è stata svolta identificando preliminarmente tutte le piene che si sono verificate dall'entrata in esercizio dello sbarramento ad oggi. Ricostruiti, per ciascuna di esse, gli afflussi al Lago si sono determinati poi, per mezzo di una simulazione numerica, gli andamenti dei livelli lacuali e delle portate nel Ticino emissario nell'ipotesi che l'incile venisse modificato secondo le previsioni del progetto in esame. Il confronto delle due serie di piene ha poi consentito di trarre delle conclusioni sull'efficacia di un simile intervento.

2. Le scale di deflusso storiche

La conoscenza della scala di deflusso dell'incile del Lago Maggiore è determinante poiché permette, noti i livelli del Lago, di calcolare gli afflussi al Verbano durante gli eventi di piena presi in considerazione. Poiché la morfologia dell'incile può mutare per l'effetto della naturale erosione esercitata dalla corrente in occasione delle piene più importanti o per interventi di sistemazione, anche la scala di deflusso può subire scostamenti non trascurabili nel tempo.

Ufficialmente, dall'entrata in esercizio dello sbarramento della Miorina ad oggi, il Servizio Idrografico Italiano ha pubblicato due scale di deflusso per la sezione dell'idrometro di Sesto Calende, valide in regime libero, quando cioè lo sbarramento della Miorina è completamente abbattuto e le portate erogate sono determinate solo dalla configurazione naturale dell'incile (Marchetti e Raffa, 1965). Esse sono rappresentate in Figura 1.

La scala di deflusso del 1946 è stata determinata dal S.I. interpolando un numero consistente di misure eseguite dal 1946 al 1953, di cui alcune relative ad eventi considerevoli di piena (h=3.67 m per Q=1896 m^3/s il 12/11/51). Se confrontata con la scala del '38-'39, che rappresenta la capacità di deflusso dell'incile del Lago a *regime naturale*, così cioè come si trovava prima dell'inizio dei lavori per la realizzazione dello sbarramento, si nota come per effetto della regolarizzazione della soglia fluviale della Miorina e della sistemazione locale dell'alveo, si sia realizzato un aumento di *officiosità* dell'incile dell'ordine di qualche decina di m^3/s.

Consistente è anche l'aumento di capacità di deflusso all'incile complessivamente realizzato con i lavori di sistemazione al Dosso dei Murazzi, e confermato dalle misure eseguite dal S.I. dal novembre del 1968 fino a metà '73. In particolare, la verifica che l'intervento di dragaggio non ha solo aumentato l'officiosità negli stati di magra, come era tra l'altro allora auspicabile, ma anche negli stati di piena, ha indotto ad interpolare una nuova scala delle portate, che è stata adottata a partire dal 1° gennaio del 1968. Da essa si rileva come i lavori di sistemazione abbiano messo a disposizione della regolazione, e quindi delle utenze, maggiori possibilità di erogazione, soprattutto negli stati critici di magra.

Ai fini della ricostruzione degli afflussi al Lago si può ritenere che la validità della scala del 1946 si possa estendere per tutto il periodo che va dal 1943, anno in cui sono terminati i lavori alla Miorina, alla primavera del 1963, termine della sistemazione al Dosso dei Murazzi, senza temere di incorrere in imprecisioni tali da compromettere la validità dei risultati delle successive elaborazioni. Contemporaneamente, alla luce di quanto rilevato con le prime misure del 1964 (Marchetti e Raffa, 1965) sembra logico anticipare "l'entrata in vigore" della scala del 1968 all'inizio dell'estate del 1963.

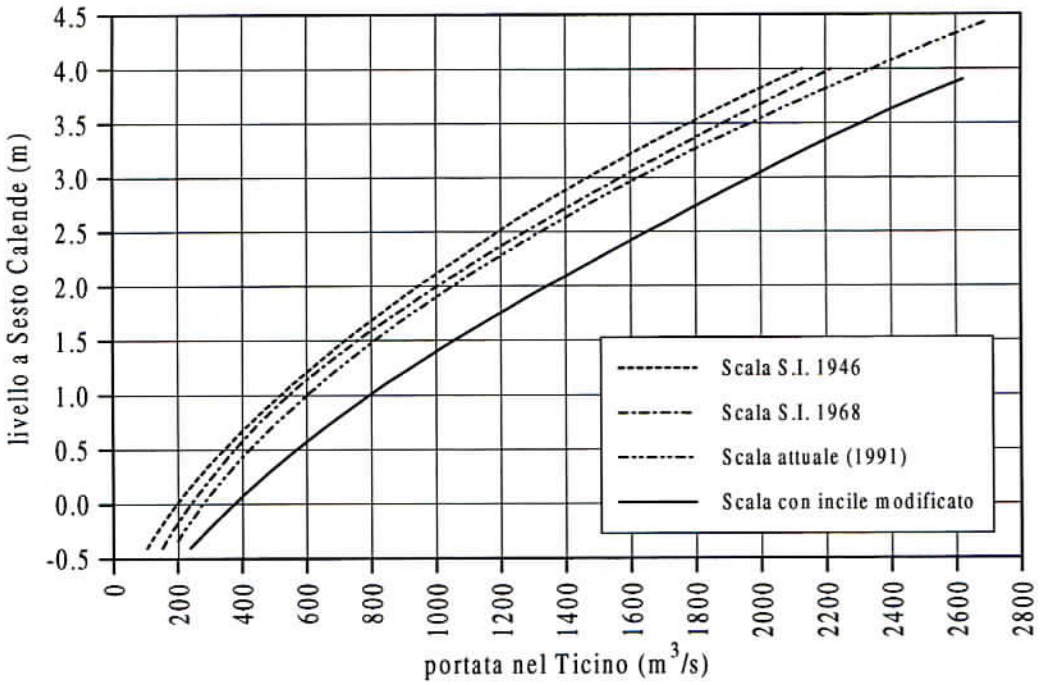

Fig.1. Scale di deflusso storiche e nuova scala nell'ipotesi di modifica dell'incile.

Durante gli eventi di piena del 1991 e del 1993 sono state eseguite dall'Ufficio Idrografico del Po (I) e dall'Ufficio Federale dell'Economia delle Acque (CH) cinque misure di portata, i cui principali risultati sono riportati in Tab.1: da essi si evince che l'attuale capacità di deflusso dell'incile è maggiore di quella fornita dalla scala fino ad oggi adottata (S.I. 1968).

La definizione dell'attuale funzionamento dell'incile del Lago è stata oggetto di studio da parte di Maione e Mignosa (1995). La scala di deflusso ricavata, riportata nella medesima Figura 1 [3], mostra un non trascurabile aumento della capacità di portata rispetto alla scala del S.I. del 1968. Nel seguito essa sarà considerata valida a decorrere dal 1° gennaio 1991.

Data	Altezza idrometrica a Sesto Calende [m]	Portata misurata [m³/s]	Portata scala S.I. 1968 [m³/s]
2/10/91	+2.79 (U.I.)	1487	1443
2/10/91	+2.74 (U.F.E.A.)	1489	1414
4/10/91	+2.27 (U.F.E.A.)	1193	1145
8/10/91	+1.60 (U.F.E.A.)	852	802
18/10/93	+3.38 (U.I.)	1856	1808

Tab. 1. Recenti misure di portata eseguite dall'Ufficio Idrografico del Po (U.I.) e dall'Ufficio Federale dell'Economia delle Acque (U.F.E.A.)

3. La scala di deflusso nell'ipotesi di modifica dell'incile

La valutazione, in linea di massima, del migliore intervento da realizzare al fine di aumentare il deflusso dal Lago di circa 300 m³/s quando il livello idrico a Sesto Calende è pari a 195.80 m s.l.m. (circa 2.78 m rispetto allo zero dell'idrometro) è stata effettuata dallo Studio d'Ingegneria Anastasi su commissione dell'Ufficio Federale dell'Economia delle Acque di Bellinzona.

Le conclusioni dello studio (U.F.E.A., 1993), ed in particolare la scala di deflusso rappresentativa della auspicabile sistemazione futura dell'incile (e che sarà utilizzata nelle prossime elaborazioni), meritano qualche puntualizzazione, per cui sembra opportuno, innanzi

[3]Nello studio citato si è evidenziata l'influenza della quota di ritenuta di Porto della Torre sulla scala di deflusso a Sesto Calende, a sbarramento della Miorina totalmente abbattuto. La scala qui riportata è quella relativa alla quota di ritenuta a Porto della Torre pari a 191.35 m s.l.m., poiché tutte le piene considerate si sono formate ed esaurite nel periodo 1° aprile - 30 novembre, durante il quale viene mantenuto tale livello. Nel medesimo studio si è altresì verificato che i *cappi di piena* sono di ampiezza assolutamente trascurabile e pertanto l'adozione di una scala di deflusso di moto permanente è del tutto lecita.

tutto, riassumere i risultati ottenuti dagli ingegneri svizzeri, basati sulla simulazione tramite modello del comportamento del primo tratto del Ticino[4].

In sostanza, lo studio ha riguardato inizialmente la definizione di un modello matematico di moto permanente sulla base delle 57 sezioni trasversali rilevate nel 1990, e nella sua successiva taratura con la misura di portata eseguita dall'Ufficio Idrografico del Po il 2 ottobre del '91 e del contemporaneo rilievo, in tutte e 57 le sezioni, del reale livello del pelo d'acqua: agendo sulla scabrezza sezione per sezione, e ponendo come condizione di valle la quota di ritenuta a Porto della Torre, si è imposta la coincidenza tra livelli misurati e ricostruiti. Tarato il modello, è stato tra l'altro possibile definire l'attuale scala di deflusso libero, risultata pressoché coincidente con quella ottenuta successivamente da Maione e Mignosa (1995).

Terminata la definizione del modello, è stata valutata l'entità degli scavi da realizzare nell'alveo del Ticino per ottenere il voluto aumento di capacità di deflusso: in questa fase, partendo dalla sezione 39 [5] e procedendo verso monte, si sono regolarizzate le sezioni dell'alveo, operando cioè in modo da ridurre le irregolarità e le sinuosità del fondo, aumentare la sezione liquida scavando soprattutto lungo le zone laterali senza pregiudicare la stabilità delle sponde, il tutto per aumentare il raggio idraulico delle sezioni senza modificarne, tranne alcune eccezioni, le quote minime. L'opera di regolarizzazione è stata arrestata alla sezione n°10, corrispondente alla posizione dell'idrometro di Sesto Calende, ed è terminata quando è stato raggiunto l'incremento di portata voluto: il volume totale da asportare dall'alveo è stato così approssimativamente valutato in ben 570000 m^3 (circa 12 volte quanto complessivamente scavato al Dosso dei Murazzi durante le 4 fasi dei lavori svolte negli anni 1954-1963).

A questo punto è stato possibile definire la scala di deflusso dell'incile così modificato: essa è riportata in Figura 1, assieme alla scala di deflusso attuale ed alle due scale del Servizio Idrografico.

[4] Lo studio ha valutato diverse possibilità d'intervento: esecuzione di una galleria, abbassamento del disciplinare di Porto della Torre, dragaggio dell'alveo. Poichè proprio quest'ultimo è parso quello ottimale, in termini di realizzabilità e di rapporto costi-benefici, solo ad esso verrà fatto riferimento.

[5] Per la collocazione delle sezioni si rimanda al lavoro citato (U.F.E.A., 1993) od a Maione e Mignosa (1995).

4. Le portate nel Ticino emissario in condizioni di regolazione

Le scale prima riportate si riferiscono alla condizione di deflusso libero, che si verifica quando lo sbarramento della Miorina è completamente abbattuto e quindi non intervengono condizionamenti al deflusso da parte dell'opera di regolazione. Ma nell'intervallo di quote compreso tra il limite inferiore (fisso) e superiore (variabile) di ritenuta attiva, il regolatore può influenzare, agendo sulle portine dello sbarramento, le portate defluenti, usualmente tra il valore minimo richiesto dalle utenze e quello massimo concesso dalla officiosità dell'incile. In sostanza, in fase di esercizio della regolazione, la situazione dell'incile non è più caratterizzata da un punto della scala di deflusso, ma da un punto appartenente alla regione del piano (Q, h) tratteggiata in Figura 2 e delimitata:

1. dalla retta di equazione $h=h_{sup}$, intendendo con h_{sup} il limite superiore di ritenuta attiva, variabile durante l'anno;
2. dalla curva che esprime la capacità di deflusso libero;
3. dalla retta di equazione $Q=Q_{min}$, intendendo con Q_{min} il valore di portata minima garantita alle utenze dal Consorzio [6], anch'esso variabile durante l'anno in funzione delle richieste.

Durante la ricostruzione delle piene con la nuova scala proposta può capitare che il livello del Lago scenda, per un certo periodo di tempo, sotto il limite superiore del disciplinare di concessione; si presenta dunque il problema di valutare se, e come, il regolatore sarebbe in quel caso intervenuto. Tale previsione è in pratica irrealizzabile, poiché nella definizione dell'intervento di regolazione concorrono molteplici fattori e circostanze che non è possibile ricostruire; è certo, però, che la regolazione deve operare entro la regione innanzi definita, per cui è presumibile che ogni intervento debba essere *contenuto* entro due situazioni limite:

a) assenza assoluta di regolazione, anche quando il livello del Lago scende sotto il limite di concessione: in questo caso è valida la scala di deflusso libero rappresentata a tratteggio in Fig.2;
b) schema di regolazione *rigido* che prevede (tutte le volte che i vincoli fisici e quelli derivanti dal disciplinare lo consentano) la conservazione del livello del Lago prossimo al massimo consentito, ed il mantenimento della portata defluente non inferiore alla minima

[6] In realtà questo limite non è sempre garantito, poichè situazioni di magra prolungata possono consigliare al Consorzio la riduzione drastica delle portate defluenti, per preservare l'invaso del Lago. Ma il presente studio è teso all'analisi dei regimi di piena, per cui questa eventualità non sarà presa in considerazione.

garantita: in questo caso è valida la scala di deflusso rappresentata a tratto e punto in Fig.2[7].

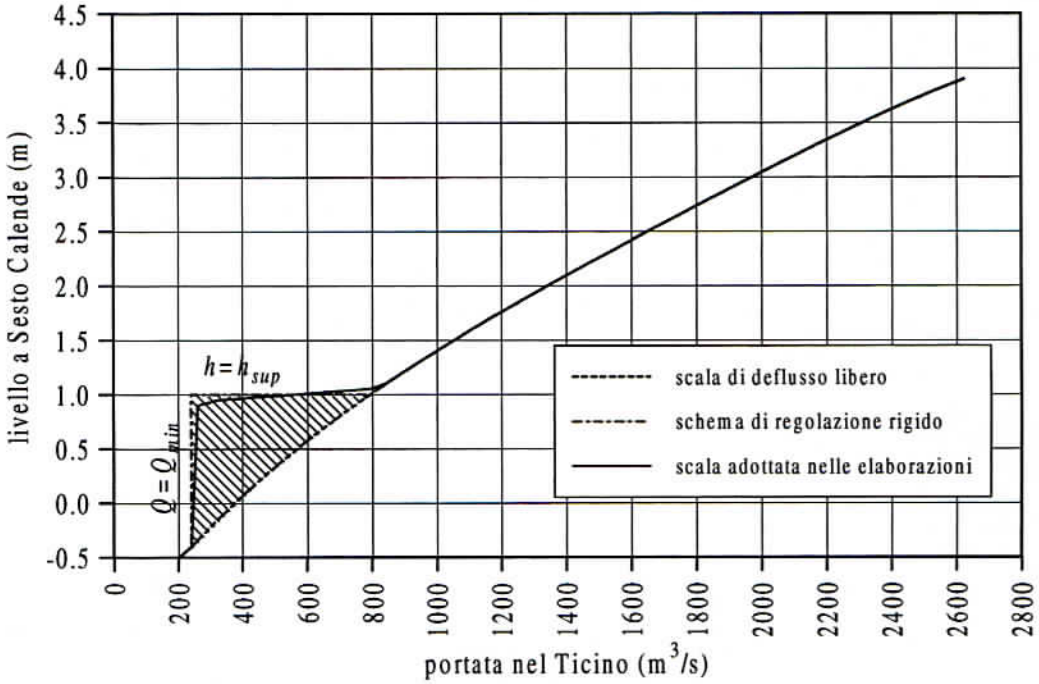

Fig.2. Scala di deflusso libero e area di possibile regolazione.

Nella ricostruzione delle piene si terrà conto di queste considerazioni, eseguendo una simulazione per entrambe le situazioni limite. Occorre altresì precisare che nell'ipotesi di regolazione non sarà utilizzato lo schema rigido suddetto, ma uno leggermente modificato (linea continua di Figura 2), in cui le discontinuità in corrispondenza del disciplinare sono leggermente attenuate, al fine di smorzare l'instabilità che esse causano nei risultati dell'elaborazione numerica, e per tener conto delle pratiche possibilità di manovra dello sbarramento, ed evitare quindi un passaggio, troppo brusco e del tutto irrealistico, dalla portata libera a quella di regolazione o viceversa.

5. Le piene del Verbano dall'inizio della regolazione ad oggi

Dall'inizio dell'esercizio della regolazione, è cura dell'Ufficio Tecnico del Consorzio del Ticino pubblicare mensilmente i dati relativi all'andamento dei livelli del Lago Maggiore,

[7]In figura è riportata la scala relativa al periodo che va dal 1° maggio al 15 agosto, quando il disciplinare di concessione è pari a +1.00 m sullo zero di Sesto Calende e la portata minima garantita dal Consorzio alle utenze è pari a 240 m³/s; le scale relative agli altri periodi dell'anno sono facilmente ottenibili in maniera analoga.

misurati giornalmente all'idrometro di Sesto Calende alle ore 8.00, unitamente al cosiddetto *regime naturale dell'incile*, che rappresenta la successione dei livelli e delle portate che si sarebbero verificati in assenza dello sbarramento mobile della Miorina e dei lavori ai Murazzi. Questi ultimi dati, ottenibili attraverso l'applicazione dell'equazione di continuità dei laghi, sono stati utilizzati (Citrini, 1973; Citrini e Cozzo, 1982) per valutare le conseguenze che il mutato regime dei deflussi, indotto dall'esercizio della regolazione, ha operato sui livelli e sulle portate di piena[8].

Per *piena* si intenderà nel seguito qualunque evento che si è manifestato con almeno un colmo non inferiore a +2.00 m sullo zero dell'idrometro di Sesto Calende: essa inizia nel momento in cui lo sbarramento alla Miorina è completamente abbattuto, e termina quando riprende la regolazione. In base a questa definizione, quindi, una piena può presentare anche più di un colmo sopra il limite fissato, ma ai fini del presente studio essa sarà considerata come un unico evento. La scelta di +2.00 m è fondamentalmente motivata dalla coerenza con il valore adottato precedentemente da De Marchi (1950) e da Citrini (1973). A quel livello, inoltre, con la attuale scala di deflusso, corrisponde una portata nel Ticino emissario di circa 1050 m^3/s ed una quota del Lago superiore a +2.10 m [9], prossima al livello di guardia: si ricorda, infatti, che a +2.48 m inizia l'esondazione in Piazza Garibaldi a Pallanza, mentre a +2.44 m il Verbano esce sul Lungolago a Locarno [10].

Individuate preliminarmente sui registri del Consorzio le coordinate temporali delle piene, sarebbe stato utile eseguire la lettura della successione dei livelli direttamente dalle strisce registrate in modo da definire più precisamente l'evoluzione temporale di ciascun evento. Purtroppo, tutte le strisciate dell'idrometro di Sesto Calende antecedenti al 1968 sono andate smarrite, e di esse non si è trovato traccia nemmeno alla Sezione di Milano dell'Ufficio Idrografico del Po.

Nonostante questo inconveniente, si è proceduto, per le piene che si sono verificate dal 1968 al 1995, a leggere i livelli dalle strisce con una scansione temporale variabile, multipla di tre

---

[8] Questi dati sono altresì tuttora importanti per determinare, in sede di verifica, il beneficio che la regolazione del Lago ha prodotto in termini di *acque nuove*, oppure, in sede progettuale, per valutare gli effetti sulle fallanze di un diverso disciplinare di concessione.

[9] La differenza tra la quota all'idrometro di Sesto Calende e la quota nel Lago è dovuta essenzialmente alle perdite nel primo tratto fluviale ed all'acquisto di altezza cinetica della corrente. Per maggiori approfondimenti si rimanda a Citrini (1973) e Maione e Mignosa (1995).

[10] Il valore di +2.44 tiene conto della differenza tra i riferimenti delle quote italiane e svizzere, valutabile in 34.45 cm (UFEA, 1993)

ore e comunque mai superiore alle 24, rilevando i punti tra cui il tracciato presentasse un andamento pressoché rettilineo, e facendo in modo di leggere sempre il dato delle ore 8.00 di ogni giorno. Si è così constatato che il valore di colmo effettivo delle piene può essere anche 5÷6 cm superiore a quello rilevabile analizzando le serie giornaliere.

Per le piene del periodo dal 1943 al 1967, invece, ci si è dovuti accontentare dei dati forniti dal Consorzio: per questo risulterà in parte compromessa l'omogeneità del campione complessivo, che presenterà delle piene caratterizzate da serie temporali con scansioni differenti.

Infine, per tutte le piene si è identificato nei registri della regolazione, dove sono riportate le manovre operate allo sbarramento, l'istante in cui si è proceduto al totale abbattimento delle portine, che nel seguito segna l'inizio della piena. Nella Tab.2 sono riportati i dati ottenuti.

N°	Anno	Data di inizio	Data del colmo	h_{max} [m]	Q_{max} [m³/s]	N°	Anno	Data di inizio	Data del colmo	h_{max} [m]	Q_{max} [m³/s]
1	1945	30-ott 8.00	02-nov 17.00	2.14	1015	23	1973	15-lug 2.00	18-lug 14.00	2.47	1257
2	1946	14-mag 8.00	03-giu 14.00	2.14	1015	24	1975	15-set 11.00	17-set 17.00	2.61	1339
3	1948	04-set 14.00	06-set 5.00	2.65	1278	25	1976	28-set 23.00	05-ott 11.00	2.94	1535
4	1951	08-apr 8.00	28-mag 23.00	2.77	1342	26	1977	29-apr 11.00	05-mag 11.00	3.51	1893
5	1951	08-ago 14.00	09-ago 17.00	2.15	1016	27	1977	28-lug 11.00	01-ago 11.00	2.05	1030
6	1951	08-nov 14.00	12-nov 17.00	3.70	1815	28	1977	18-ago 8.00	31-ago 23.00	2.90	1511
7	1953	15-ott 20.00	30-ott 14.00	2.72	1315	29	1977	07-ott 14.00	10-ott 14.00	3.46	1859
8	1954	21-ago 17.00	23-ago 8.00	2.65	1278	30	1978	01-ago 17.00	08-ago 23.00	2.33	1178
9	1955	08-giu 5.00	10-giu 17.00	2.30	1096	31	1979	14-ott 2.00	17-ott 14.00	3.66	1991
10	1956	27-ago 20.00	04-set 14.00	2.21	1050	32	1981	25-mag 20.00	28-mag 2.00	2.08	1043
11	1957	07-giu 20.00	26-giu 2.00	2.80	1355	33	1981	22-set 20.00	28-set 5.00	3.88	2139
12	1960	17-mag 5.00	20-mag 17.00	2.35	1119	34	1982	26-set 17.00	27-set 23.00	2.10	1055
13	1960	16-set 20.00	20-set 14.00	3.15	1537	35	1983	22-apr 2.00	23-mag 11.00	3.37	1804
14	1963	02-set 4.00	06-set 23.00	2.10	1054	36	1986	06-apr 14.00	26-apr 23.00	3.18	1683
15	1963	04-nov 11.00	07-nov 17.00	3.38	1805	37	1987	17-lug 23.00	20-lug 2.00	2.84	1473
16	1965	01-set 23.00	11-set 14.00	2.81	1454	38	1987	08-ott 17.00	16-ott 23.00	2.46	1253
17	1965	27-set 8.00	02-ott 17.00	3.00	1571	39	1988	12-ott 11.00	15-ott 11.00	2.83	1469
18	1966	15-ott 20.00	20-ott 17.00	2.35	1191	40	1991	29-set 9.00	01-ott 12.00	2.99	1620
19	1968	05-mag 5.00	07-mag 23.00	2.17	1091	41	1993	23-set 6.00	14-ott 21.00	4.27	2560
20	1968	02-nov 5.00	04-nov 17.00	3.48	1875	42	1994	14-mag 18.00	22-mag 11.00	2.06	1078
21	1969	24-giu 8.00	25-giu 14.00	2.02	1013	43	1994	04-nov 17.00	07-nov 17.00	2.30	1212
22	1972	06-giu 20.00	13-giu 14.00	2.01	1007						

TAB.2: Elenco delle piene che hanno raggiunto o superato l'altezza +2.00 m a Sesto fra il 1943 ed il 1995

6. La ricostruzione delle piene con l'incile modificato

La metodologia di ricostruzione delle piene consiste in una duplice applicazione dell'equazione di continuità: per ottenere dapprima, dalle successioni note delle portate di deflusso e dei livelli a Sesto Calende, l'andamento delle portate di afflusso; e successivamente, da questo, l'andamento dei livelli e dei deflussi per l'incile modificato. La ricostruzione si svolge, quindi, in due differenti fasi, durante le quali, per ogni piena, si procede in questo modo:

a) nella prima fase, nota la successione storica dei livelli a Sesto Calende, si ricavano, tramite la scala di deflusso valida all'epoca della piena, le contemporanee portate defluite dall'incile. Utilizzando un'opportuna scala di espansione lacuale, si integra poi l'equazione di continuità, ottenendo così l'andamento temporale delle portate di afflusso efficace.

b) Nella seconda fase, utilizzando le portate di afflusso precedentemente determinate, si ricostruisce, attraverso l'integrazione dell'equazione di continuità ed adottando la nuova scala di deflusso, la successione temporale dei livelli al Lago e delle portate defluenti dall'incile modificato. Il calcolo consiste, in sostanza, in un'operazione di laminazione, in cui il livello d'invaso iniziale è assunto pari a quello storicamente misurato al momento del totale abbattimento delle portine, istante che rappresenta, quindi, anche l'inizio della piena ricostruita [11]. In questa fase, a causa della maggiore capacità di deflusso dell'incile modificato, il Lago può assumere per qualche periodo un livello inferiore al massimo valore del disciplinare di concessione. Secondo quanto già evidenziato, si è allora proceduto a ricostruire le piene utilizzando due diverse scale di portata, che simulino i due comportamenti limite del regolatore: se questi non interviene a disciplinare il deflusso o se, all'opposto, applica uno schema di regolazione rigido.

Qualche accortezza occorre dedicarla alla prima fase, evitando possibilmente di introdurre discontinuità nella derivata del livello idrico rispetto al tempo dh/dt che si possono ripercuotere negativamente sull'andamento degli afflussi ricostruiti, generando delle

[11] L'aumento della capacità di deflusso dell'incile potrebbe indurre il regolatore a modificare la politica di gestione storicamente adottata. In sostanza, liberato dal rischio di contribuire alla formazione di alti livelli nel lago, grazie alla nuova scala, il regolatore potrebbe concentrare maggiormente l'attenzione sul solo obiettivo di ottimizzare la gestione dell'invaso nel lago al fine di soddifare le utenze. Il lago potrebbe quindi trovarsi, all'inizio della piena, ad una quota diversa, e presumibilmente superiore, da quella storicamente verificatasi. L'assunzione adottata in questo studio, che presuppone che all'inizio della piena l'invaso si trovi alla medesima

oscillazioni numeriche. A questo scopo si è proceduto ad interpolare, per ogni piena, i punti rilevati dell'andamento dei livelli all'idrometro di Sesto Calende con delle *splines cubiche*, che garantiscono la continuità fino alla derivata seconda. L'integrazione dell'equazione di continuità è stata poi effettuata con la formula di quadratura numerica di Simpson, che permette appunto di integrare in modo esatto qualsiasi polinomio fino al terzo ordine. La procedura nel suo insieme consente, anche nel caso si adottino passi temporali relativamente brevi, di ottenere un andamento delle portate di afflusso privo di irregolarità "ad alta frequenza" che nulla hanno a che fare con il fenomeno reale[12][13].

7. Risultati ed analisi delle ricostruzioni

Nella Tab.3 sono riportati, in sintesi, i risultati delle ricostruzioni. Occorre ricordare che ogni piena è stata simulata due volte, in relazione alla modalità di intervento del regolatore qualora il Lago scendesse sotto il massimo livello di concessione: i valori relativi all'ipotesi di assenza di regolazione intermedia sono contraddistinti da un apice, mentre il doppio apice caratterizza le grandezze calcolate supponendo un intervento rigido. Per ogni piena sono riportati, oltre alla data ed al livello di inizio, i valori del colmo principale: osservato, ricostruito senza regolazione intermedia e ricostruito con regolazione intermedia.

Tali dati sono già indicativi delle ripercussioni che l'aumento di capacità di deflusso avrebbe sul regime delle piene del Lago Maggiore e del Ticino emissario. Sono evidenziate, in particolare, le differenze tra i valori di colmo osservati e quelli ricostruiti: per tutte le piene (per entrambe le ipotesi di ricostruzione) si denota un decremento delle quote massime raggiunte dal Lago, ed un aumento delle portate defluenti [14], a conferma che l'aumento di officiosità dell'incile comporta, in generale, un miglioramento delle condizioni di piena lacuali, peggiorando altresì quelle del Ticino.

Occorre infine precisare che frequentemente la data del colmo della piena ricostruita (in entrambi i casi) non coincide con quella della piena osservata. Le variazioni sono in generale dell'ordine di poche ore, ma a volte raggiungono valori consistenti (1956, ottobre del 1987; nel 1946 si presenta una variazione di 18 giorni): ciò significa che, nelle piene ricostruite che

---

quota verificatasi storicamente, consente comunque di valutare il solo effetto della modifica dell'incile, a parità di politica di regolazione.

[12] Per maggiori dettagli sulla metodologia di ricostruzione delle piene si rimanda a Campi (1995).

[13] Nel caso in esame si è adottato un intervallo di integrazione pari a tre ore.

[14] Fa eccezione la piena del 1993 (massimo evento di questo secolo) che presenta, per entrambe le ricostruzioni, un valore di portata al colmo inferiore (seppur di soli 15 m^3/s) rispetto al relativo valore osservato.

presentano più colmi, quello principale si è verificato in corrispondenza di un'intumescenza che storicamente ha rappresentato solo un colmo secondario. Anche in questo caso, le variazioni dei valori di colmo si sono calcolate facendo riferimento ai valori massimi assoluti delle piene, anche se relativi a due colmi differenti.

Identificazione della piena				Valori osservati			Valori ricostruiti senza regolaz. intermedia					Valori ricostruiti con regolaz. intermedia				
N.	Anno	Data di inizio	h_0 (m)	Data del colmo	h_{max} (m)	Q_{max} (m^3/s)	Data del colmo	h'_{max} (m)	Δh (m)	Q'_{max} (m^3/s)	ΔQ (m^3/s)	Data del colmo	h''_{max} (m)	Δh (m)	Q''_{max} (m^3/s)	ΔQ (m^3/s)
1	1945	30/10 8.00	1.28	02/11 17.00	2.14	1012	02/11 11.00	1.80	-0.34	1224	212	02/11 11.00	1.80	-0.34	1224	212
2	1946	14/05 8.00	1.48	03/06 14.00	2.14	1012	16/05 14.00	1.79	-0.35	1219	207	16/05 17.00	1.79	-0.35	1219	207
3	1948	04/09 14.00	1.51	06/09 5.00	2.65	1268	05/09 23.00	2.43	-0.22	1609	341	05/09 23.00	2.43	-0.22	1609	341
4	1951	08/04 8.00	0.41	28/05 23.00	2.77	1335	28/05 23.00	2.12	-0.65	1413	78	28/05 23.00	2.27	-0.50	1509	174
5	1951	08/08 14.00	1.24	09/08 17.00	2.15	1013	09/08 17.00	2.00	-0.15	1339	326	09/08 17.00	2.00	-0.15	1339	326
6	1951	08/11 14.00	1.49	12/11 17.00	3.70	1914	12/11 14.00	3.24	-0.46	2129	215	12/11 14.00	3.24	-0.46	2132	218
7	1953	15/10 20.00	1.06	30/10 14.00	2.72	1307	30/10 11.00	2.04	-0.68	1369	62	30/10 11.00	2.06	-0.66	1377	70
8	1954	21/08 17.00	1.50	23/08 8.00	2.65	1268	23/08 2.00	2.44	-0.21	1614	346	23/08 2.00	2.44	-0.21	1614	346
9	1955	08/06 5.00	1.52	10/06 17.00	2.30	1091	10/06 14.00	2.02	-0.28	1352	261	10/06 14.00	2.02	-0.28	1352	261
10	1956	27/08 20.00	1.26	04/09 14.00	2.21	1046	29/08 17.00	1.85	-0.36	1249	203	29/08 17.00	1.85	-0.36	1249	203
11	1957	07/06 20.00	1.11	26/06 2.00	2.80	1348	26/06 2.00	2.10	-0.70	1400	52	26/06 2.00	2.10	-0.70	1406	58
12	1960	17/05 5.00	1.14	20/05 17.00	2.35	1113	20/05 14.00	2.01	-0.34	1345	232	20/05 14.00	2.01	-0.34	1347	234
13	1960	16/09 20.00	1.70	20/09 14.00	3.15	1558	20/09 11.00	2.69	-0.46	1770	212	20/09 11.00	2.69	-0.46	1770	212
14	1963	02/09 5.00	1.10	06/09 23.00	2.10	1054	06/09 17.00	1.73	-0.37	1181	127	06/09 17.00	1.73	-0.37	1181	127
15	1963	04/11 11.00	1.47	07/11 17.00	3.38	1805	07/11 14.00	3.06	-0.32	2009	204	07/11 14.00	3.07	-0.31	2014	209
16	1965	01/09 23.00	1.12	11/09 14.00	2.81	1454	11/09 14.00	2.30	-0.51	1525	71	11/09 14.00	2.30	-0.51	1525	71
17	1965	27/09 8.00	1.39	02/10 17.00	3.00	1571	02/10 17.00	2.58	-0.42	1704	133	02/10 17.00	2.58	-0.42	1704	133
18	1966	15/10 20.00	1.08	20/10 17.00	2.35	1191	20/10 14.00	1.97	-0.38	1324	133	20/10 14.00	1.97	-0.38	1324	133
19	1968	05/05 5.00	1.14	07/05 23.00	2.17	1091	07/05 17.00	1.92	-0.25	1296	205	07/05 17.00	1.92	-0.25	1296	205
20	1968	02/11 5.00	1.45	04/11 17.00	3.48	1875	04/11 11.00	3.21	-0.27	2112	237	04/11 14.00	3.23	-0.25	2121	246
21	1969	24/06 8.00	1.23	25/06 14.00	2.02	1013	25/06 8.00	1.89	-0.13	1274	261	25/06 8.00	1.89	-0.13	1274	261
22	1972	06/06 20.00	1.04	13/06 14.00	2.01	1007	13/06 2.00	1.60	-0.41	1111	104	13/06 2.00	1.74	-0.27	1190	183
23	1973	15/07 2.00	1.16	18/07 14.00	2.47	1257	18/07 14.00	2.16	-0.31	1442	185	18/07 14.00	2.16	-0.31	1442	185
24	1975	15/09 11.00	1.24	17/09 17.00	2.61	1339	17/09 14.00	2.38	-0.23	1578	239	17/09 14.00	2.38	-0.23	1578	239
25	1976	28/09 23.00	1.15	05/10 11.00	2.94	1535	05/10 11.00	2.48	-0.46	1637	102	05/10 11.00	2.48	-0.46	1637	102
26	1977	29/04 11.00	1.03	05/05 11.00	3.51	1893	05/05 8.00	3.05	-0.46	2005	112	05/05 8.00	3.05	-0.46	2006	113
27	1977	28/07 11.00	1.00	01/08 11.00	2.05	1030	01/08 5.00	1.75	-0.30	1192	162	01/08 5.00	1.81	-0.24	1229	199
28	1977	18/08 8.00	1.00	31/08 23.00	2.90	1511	31/08 23.00	2.34	-0.56	1551	40	31/08 23.00	2.34	-0.56	1553	42
29	1977	07/10 14.00	1.05	10/10 14.00	3.46	1859	10/10 11.00	3.15	-0.31	2067	208	10/10 11.00	3.15	-0.31	2067	208
30	1978	01/08 17.00	0.99	08/08 23.00	2.33	1178	08/08 23.00	1.92	-0.41	1293	115	08/08 20.00	2.27	-0.06	1505	327
31	1979	14/10 2.00	0.90	17/10 14.00	3.66	1991	17/10 14.00	3.32	-0.34	2185	194	17/10 14.00	3.34	-0.32	2196	205
32	1981	25/05 20.00	1.29	28/05 2.00	2.08	1043	27/05 23.00	1.86	-0.22	1258	215	27/05 23.00	1.86	-0.22	1258	215
33	1981	22/09 20.00	1.05	28/09 5.00	3.88	2139	28/09 5.00	3.45	-0.43	2271	132	28/09 5.00	3.45	-0.43	2271	132
34	1982	26/09 17.00	1.03	27/09 23.00	2.10	1055	27/09 17.00	1.97	-0.13	1324	269	27/09 17.00	1.97	-0.13	1324	269
35	1983	22/04 2.00	1.08	23/05 11.00	3.37	1804	23/05 8.00	2.76	-0.61	1816	12	23/05 8.00	2.90	-0.47	1906	102
36	1986	06/04 14.00	0.91	26/04 23.00	3.18	1683	26/04 23.00	2.61	-0.57	1721	38	26/04 23.00	2.80	-0.38	1841	158
37	1987	17/07 23.00	1.02	20/07 2.00	2.84	1473	19/07 20.00	2.61	-0.23	1721	248	19/07 20.00	2.61	-0.23	1722	249
38	1987	08/10 17.00	0.90	16/10 23.00	2.46	1253	13/10 2.00	2.05	-0.41	1374	121	13/10 2.00	2.26	-0.20	1503	250
39	1988	12/10 11.00	1.14	15/10 11.00	2.83	1469	15/10 5.00	2.54	-0.29	1676	207	15/10 5.00	2.54	-0.29	1676	207
40	1991	29/09 9.00	0.98	01/10 12.00	2.99	1620	01/10 6.00	2.81	-0.18	1846	226	01/10 6.00	2.82	-0.17	1852	232
41	1993	23/09 6.00	1.12	14/10 21.00	4.27	2560	14/10 21.00	3.81	-0.46	2545	-15	14/10 21.00	3.81	-0.46	2545	-15
42	1994	14/05 18.00	1.20	22/05 11.00	2.06	1078	20/05 17.00	1.70	-0.36	1164	86	20/05 17.00	1.70	-0.36	1164	86
43	1994	04/11 17.00	0.88	07/11 17.00	2.30	1212	07/11 5.00	2.09	-0.21	1398	186	07/11 5.00	2.28	-0.02	1515	303

Tab.3. Risultati delle ricostruzioni delle piene storiche con l'incile modificato.

7.1 Effetti sugli alti livelli del Lago

Il decremento medio dei livelli del Lago, ottenibile con la nuova scala di deflusso, è pari a circa 37 cm nelle piene ricostruite senza regolazione intermedia, e di oltre 33 cm nelle simulazioni con regolazione intermedia. In entrambi i casi, il massimo decremento si è verificato per la piena del 1957 (Fig.3), con un abbassamento del livello di colmo di ben 70 cm, mentre il decremento minimo è stato, nel primo caso, di 13 cm nelle piene del 1969 e 1982, sostanzialmente identiche (Figg.4 e 5). I decrementi più consistenti si raggiungono chiaramente nelle piene che presentano il massimo ritardo tra l'inizio ed il colmo principale. L'incidenza della eventuale regolazione intermedia assume una consistenza rilevante per sole 7 piene, in cui il decremento di livello è ridotto, dal primo al secondo caso, di 15÷20 cm: da menzionare è la piena del 1978, in cui la differenza del colmo tra le due ricostruzioni è di ben 35 cm (Fig.6).

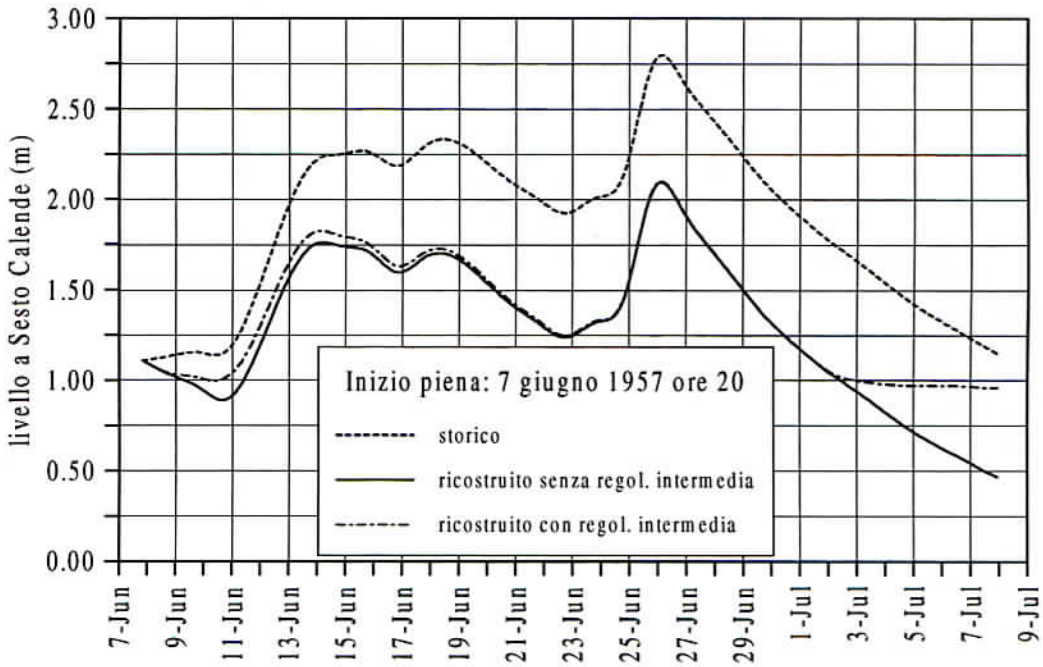

Fig.3. Livelli idrici per la piena del giugno 1957.

La Tab.4 riporta, per il caso storico e per gli scenari prospettati, il numero di colmi che hanno uguagliato o superato determinati livelli a Sesto Calende (scalati di 50 cm): essa fornisce una prima indicazione di carattere statistico sugli effetti che le modifiche proposte possono esercitare sulle frequenze dei colmi di livello.

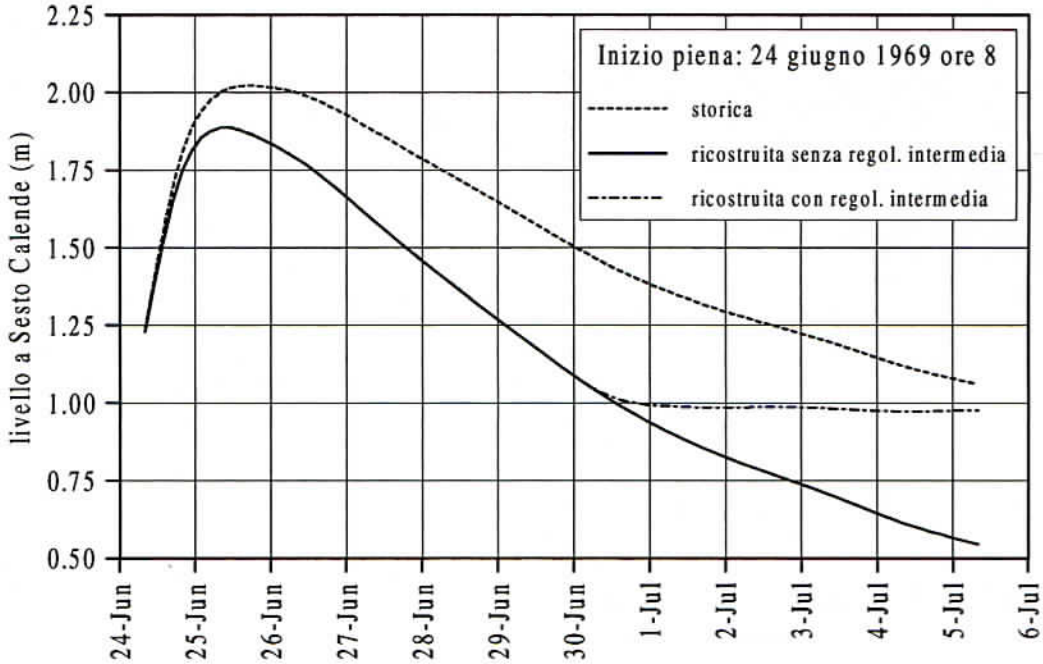

Fig.4. Livelli idrici per la piena del giugno 1969.

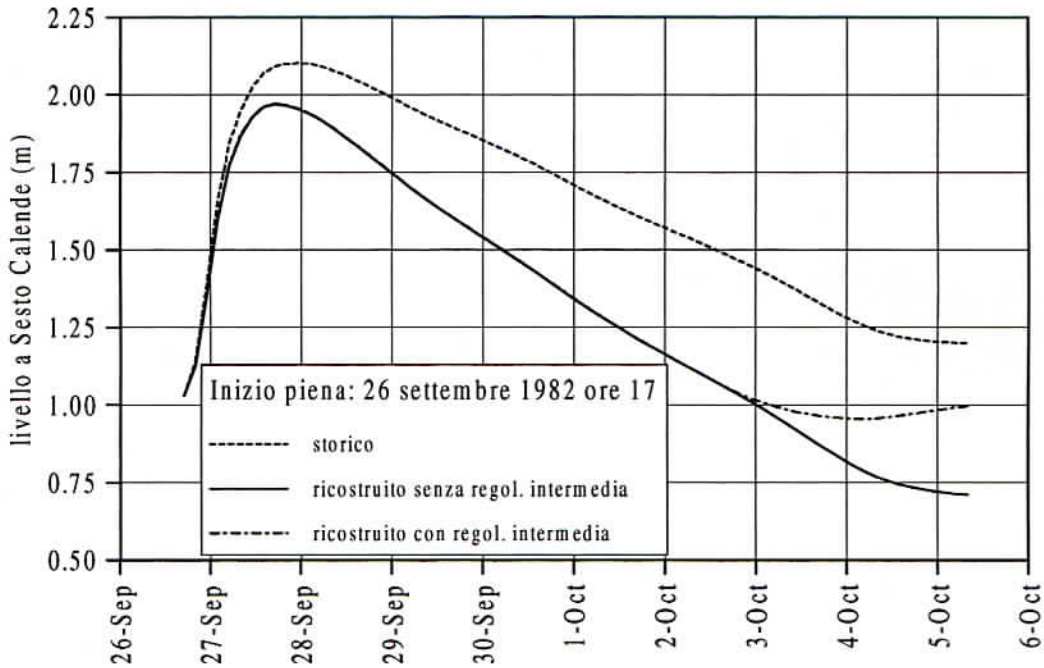

Fig.5. Livelli idrici per la piena del settembre 1992.

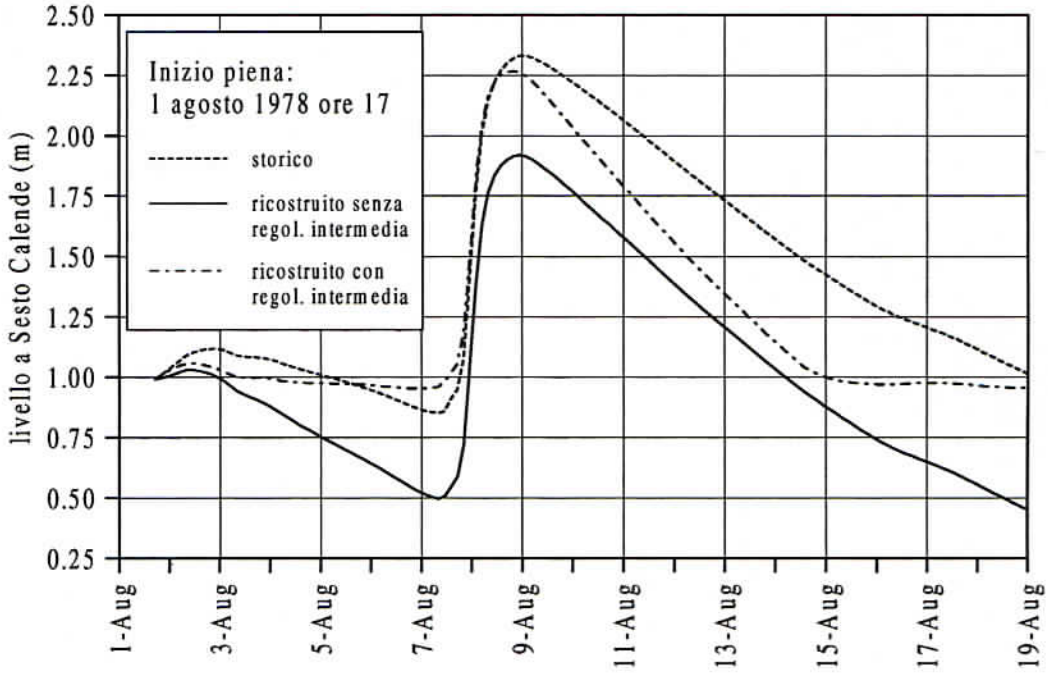

Fig.6. Livelli idrici per la piena dell'agosto 1978.

Altezze di colmo non inferiori a (m)	NUMERO DEI CASI		
	Storici	Ricostruiti senza regol. intermedia	Ricostruiti con regol. intermedia
4.00	1	0	0
3.50	5	1	1
3.00	12	8	8
2.50	24	15	15
2.00	43	31	31

Tab.4. Numero di piene con livelli idrici a Sesto Calende eccedenti prefissate soglie.

Un'altra utile indicazione delle conseguenze sul regime di piena lacuale della modifica dell'incile, è fornita dall'elaborazione delle permanenze complessive [15], ottenute sommando, per le altezze che partono da +2.00 m, e distano tra loro 25 cm, le singole durate relative a tutte le piene del periodo considerato. I risultati sono riportati nel diagramma di Figura 7, in cui le ascisse riportano i giorni complessivi in cui, dal 1943 al 1995, il Lago ha presentato a Sesto Calende un livello uguale o superiore a quello riportato in ordinata. Dall'analisi del grafico si nota chiaramente come il nuovo regime delle piene lacuali è caratterizzato, in

[15] I danni procurati dalle esondazioni dal Verbano, infatti, sono principalmente funzione del massimo livello raggiunto, ma crescono chiaramente al perdurare nel tempo degli allagamenti.

entrambi i casi di ricostruzione, da una consistente riduzione delle permanenze complessive, largamente superiore al 50%.

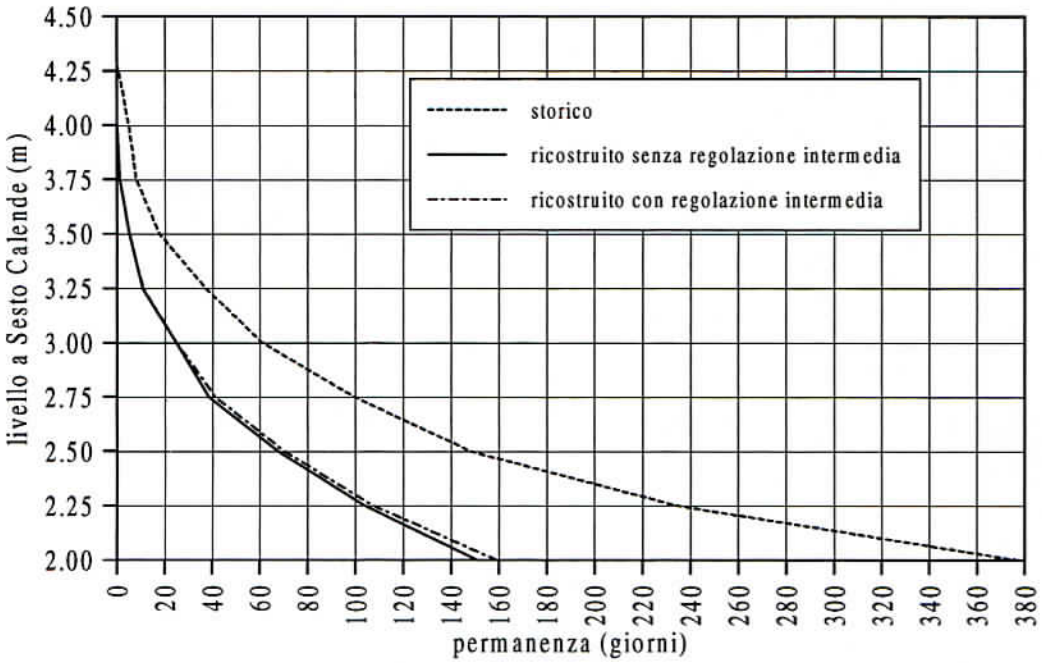

Fig.7. Permanenze degli alti livelli lacuali.

7.2 Effetti sulle portate di piena nel Ticino emissario

La nuova scala di deflusso incide fortemente sul regime delle piene fluviali, comportando un aumento medio delle portate di colmo pari a 170 m³/s nelle ricostruzioni senza regolazione intermedia, e a 190 m³/s nelle simulazioni con regolazione intermedia. In entrambi i casi di ricostruzione, il massimo incremento di portata si verifica nella piena del 1954, aumentando il valore di colmo (peraltro relativamente modesto) di ben 346 m³/s (Fig.8); l'incremento minimo assume invece il valore negativo (configurandosi quindi come un decremento) di -15 m³/s, e si è verificato nella piena del 1993 (Fig.9).

Gli incrementi di portata più consistenti si verificano, a differenza dei decrementi di livello, nelle piene che presentano massima velocità di formazione, per le quali, a fronte di elevati valori di portata di afflusso, è evidentemente minore l'influenza esercitata dall'aumento di officiosità dell'incile.

L'incidenza della eventuale regolazione intermedia assume una consistenza rilevante per sole 7 piene, in cui l'incremento di portata è ridotto, dal primo al secondo caso, di 80÷120 m³/s: tale valore diviene di ben 212 m³/s per la piena del 1978 (Fig.10).

Analogamente a quanto già visto per i livelli, nella Tab.5 è riportato il numero delle piene che hanno uguagliato o superato determinate portate nel Ticino emissario: i risultati confermano il consistente peggioramento del regime di piena fluviale indotto dalla nuova scala di portate.

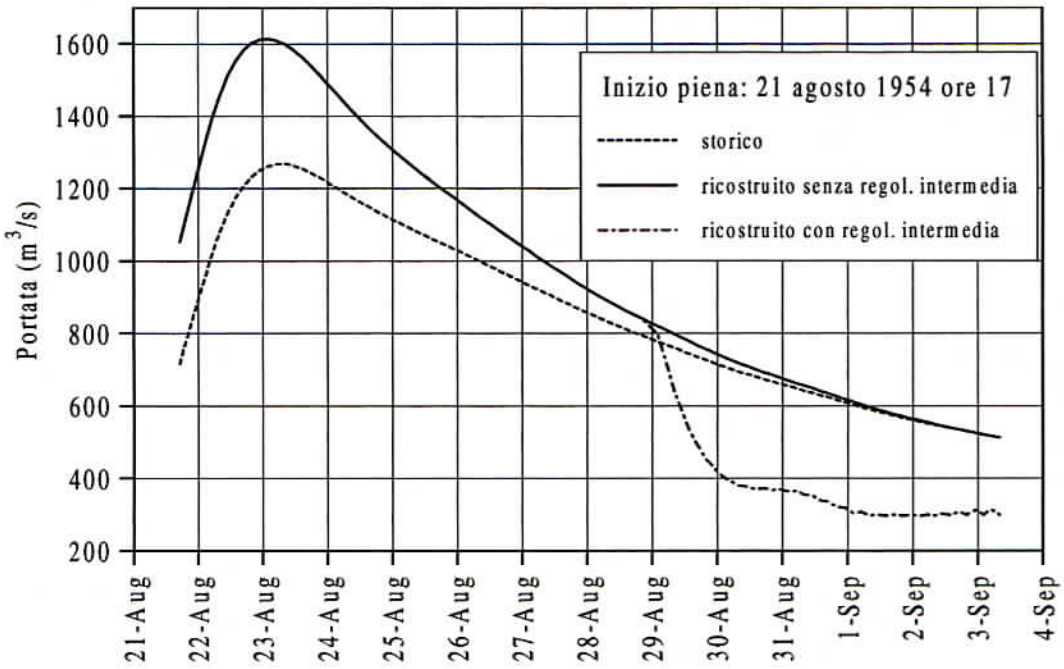

Fig.8. Portate per la piena dell'agosto 1964.

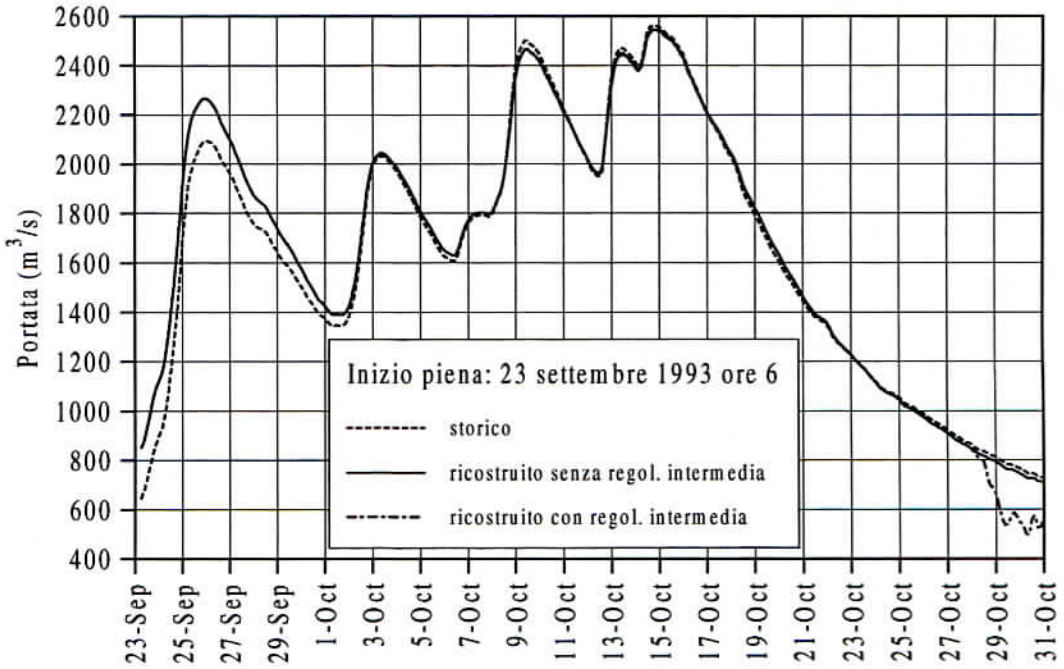

Fig.9. Portate per la piena del settembre-ottobre 1993.

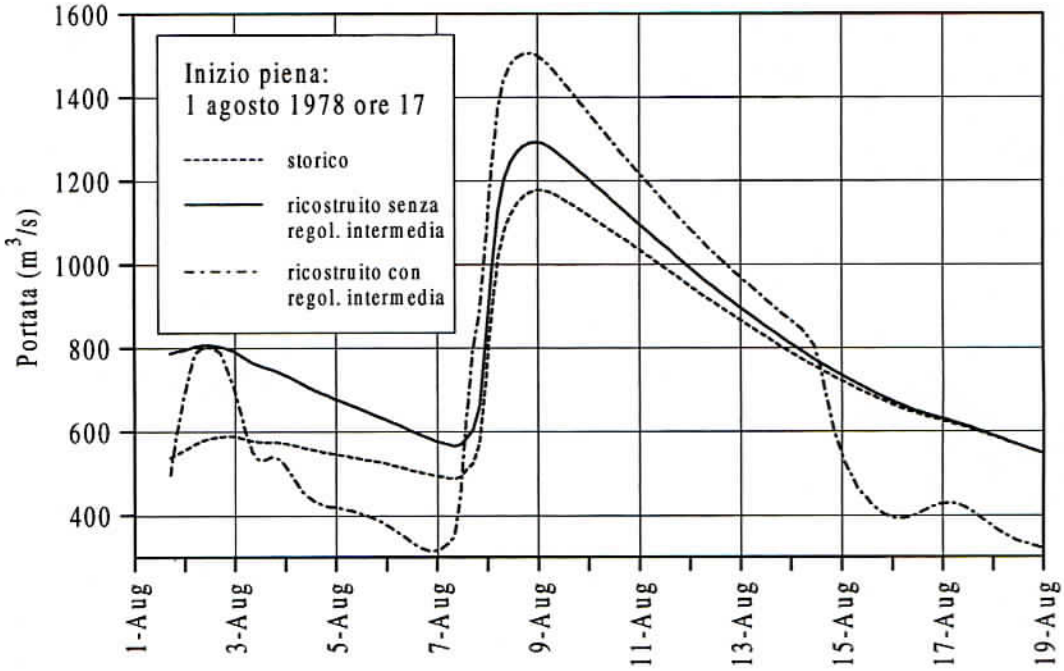

Fig.10. Portate per la piena dell'agosto 1978.

Portate al colmo non inferiori a (m^3/s)	NUMERO DEI CASI		
	Storici	Ricostruiti senza regol. intermedia	Ricostruiti con regol. intermedia
2400	1	1	1
2000	2	8	8
1600	11	18	18
1400	18	24	27
1200	27	39	40

Tab.5. Numero di piene con portate al colmo eccedenti prefissate soglie.

Un'altra indicazione sull'entità di tale peggioramento è fornita dalla elaborazione delle permanenze complessive. Il grafico di Figura 11 mostra come il nuovo regime delle piene fluviali sia caratterizzato da un aumento delle permanenze che raggiunge, nel secondo caso di ricostruzione, la consistenza di quasi il 40%. Per valori inferiori a 1200 m^3/s le permanenze delle portate nel regime ricostruito non sono state calcolate, poiché a quel valore di portata corrisponde, per la nuova scala di deflusso, un livello a Sesto Calende di +1.90 m.

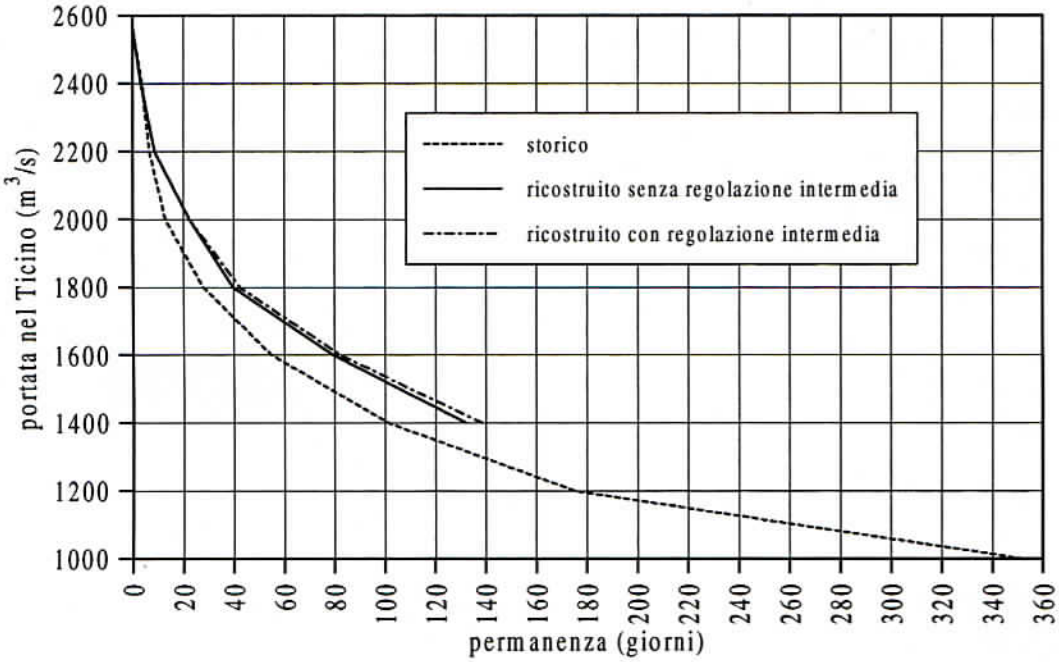

Fig.11. Permanenza delle alte portate.

7.3 Analisi statistica dei risultati

Per valutare con un criterio oggettivo l'entità delle variazioni indotte dalla modifica della scala di deflusso dell'incile ai regimi delle piene lacuali e fluviali, si è ritenuto opportuno, a completamento delle analisi precedentemente svolte, procedere all'elaborazione statistica dei risultati ottenuti.

I dati relativi ai livelli ed alle portate di colmo delle piene osservate e ricostruite sono stati elaborati mediante il metodo delle eccedenze determinando, per ogni grandezza, i parametri di alcune distribuzioni di probabilità (esponenziale, log-normale, Gumbel), verificandone l'adattamento ed infine valutando i valori associati ad assegnati tempi di ritorno.

E' necessaria a questo punto una precisazione: nella estrazione delle piene che costituiscono la serie oggetto di studio si è adottato il criterio di considerare solo gli eventi che hanno presentato, per almeno un istante, un livello a Sesto Calende superiore alla soglia di +2.00 m. Dalla operazione di ricostruzione si è però ottenuto un campione in cui qualche piena presenta un livello al colmo inferiore a tale valore. Per non ridurre eccessivamente il numero di dati a disposizione (mantenendo quel livello di soglia il campione si sarebbe ridotto di ben 11 componenti), si è preferito, per la grandezza "*livelli al colmo delle piene ricostruite*", abbassare la soglia al valore minimo del campione, ottenendo così le nuove variabili:

1. *livelli al colmo delle piene ricostruite senza regolazione intermedia che hanno raggiunto o superato l'altezza +1.60 m a Sesto dal 1943 al 1995;*
2. *livelli al colmo delle piene ricostruite con regolazione intermedia che hanno raggiunto o superato l'altezza +1.74 m a Sesto dal 1943 al 1995.*

Tale assunzione comporta d'altro canto il rischio di escludere dall'analisi un certo numero di piene, e precisamente quelle che, storicamente, hanno sì presentato un livello al colmo inferiore a +2.00 m, ma che nell'eventuale ricostruzione avrebbero potuto presentare una altezza idrica superiore alle nuove soglie innanzi definite. Si è ritenuto, anche sulla base di alcune verifiche (Campi, 1995), che l'approssimazione così introdotta non influisse significativamente sui risultati finali, poiché si ripercuote essenzialmente sulle frequenze dei livelli di colmo inferiori a +2.00 m.

I risultati ottenuti sono mostrati nella Tab.6 che riporta i valori dei livelli a Sesto Calende e delle portate nel Ticino emissario associati ad alcuni tempi di ritorno. Da essi si evince innanzi tutto come i risultati relativi alle due ipotesi di ricostruzione si discostino poco fra loro, permettendo quindi di non preoccuparsi troppo di precisare il comportamento del regolatore nei casi in cui il livello scenda sotto il disciplinare di concessione.

	Livelli di colmo a Sesto Calende (m)			Portate al colmo nel Ticino (m^3/s)		
Tempo di ritorno (anni)	Piene osservate	Ricostr. senza regol. intermedia	Ricostr. con regol. intermedia	Piene osservate	Ricostr. senza regol. intermedia	Ricostr. con regol. intermedia
2	2.48	2.13	2.17	1249	1427	1451
5	3.04	2.66	2.69	1600	1759	1778
10	3.39	2.98	3.01	1820	1968	1984
25	3.83	3.39	3.41	2096	2228	2241
50	4.15	3.69	3.71	2299	2420	2430
100	4.47	3.99	4.01	2499	2610	2617
200	4.79	4.29	4.30	2700	2799	2805

TAB. 6: Livelli e portate al colmo per assegnati tempi di ritorno nei vari regimi studiati.

Dai risultati dell'analisi statistica è altresì evidente il consistente vantaggio offerto dalla modifica dell'incile al regime di piena del Verbano: a pari tempi di ritorno, corrispondono, nelle piene ricostruite, livelli al colmo inferiori di almeno 35 cm rispetto a quelli delle piene osservate, e tale differenza sale fino a 50 cm per i tempi di ritorno più elevati. Naturalmente si

ha nel contempo un aggravamento del regime di piena del Ticino emissario: per le piene ricostruite di minore tempo di ritorno, l'incremento della portata di colmo è dell'ordine di 150 m^3/s rispetto alle piene osservate, incremento che però si riduce a 100 m^3/s per i tempi di ritorno più elevati.

8. Conclusioni

Si sono indagate le ripercussioni che può avere sugli stati di piena del Verbano e del Ticino la modifica dell'incile prospettata dalla Delegazione svizzera per la regolazione del Lago Maggiore (U.F.E.A., 1993): essa consiste nel dragaggio dell'alveo del primo tratto dell'emissario, in modo da ottenere una nuova scala delle portate che presenti un incremento della capacità di deflusso dell'ordine di 300 m^3/s quando il livello idrico è pari a +2.80 m sullo zero di Sesto Calende.

Individuate le serie cronologiche dei livelli delle piene che a Sesto Calende hanno raggiunto o superato, dal 1943 (anno di entrata in esercizio dello sbarramento mobile della Miorina) al 1995, la quota di +2.00 m, e definite le scale di portata valide nel periodo considerato, si sono determinati gli andamenti delle portate di afflusso al Lago attraverso l'applicazione dell'equazione di continuità dei laghi, andamenti dai quali è stato possibile ricostruire, per gli stessi eventi, i nuovi livelli che sarebbero stati raggiunti dal Verbano, nell'ipotesi di incile modificato.

Una prima conclusione che si può trarre da tali risultati così ottenuti, è la conferma del sostanziale miglioramento ottenibile nel regime di piena del Lago. Esso è quantificabile, sinteticamente, con un decremento di 35 cm del livello di colmo delle piene effettivamente osservate a Sesto Calende per modesti tempi di ritorno, riduzione che raggiunge i 50 cm per tempi di ritorno elevati. Tale riduzione si traduce altresì nel drastico decremento delle permanenze complessive: oltre il 50%; è significativo, inoltre, il fatto che delle 24 piene che dal 1943 hanno presentato un livello di colmo superiore a +2.50 m (indicativamente l'esondazione inizia a Pallanza quando il Lago presenta una quota di +2.48 m), solamente 15, nel nuovo regime ricostruito, avrebbero superato quella soglia.

Si ha inoltre la conferma dell'aggravamento che si manifesterebbe nel regime di piena del Ticino emissario, quantificabile in un incremento di 100 m^3/s delle portate al colmo delle piene osservate per tempi di ritorno elevati, aumento che sale a 150 m^3/s per gli eventi di

modesto tempo di ritorno; inoltre cresce considerevolmente il numero di piene che presentano una portata massima superiore a 2000 m^3/s, che passa da 2 a 8.

Occorrerebbe valutare a questo punto quali conseguenze l'incremento di portata indotto dalla nuova scala di deflusso comporti nel tratto di Ticino compreso tra lo sbocco del Lago e Pavia: è ragionevole ritenere che l'entità degli aumenti di portata che si verificherebbero in conseguenza alla prospettata modifica dell'incile, non sia tale da compromettere l'integrità degli argini a valle della centrale di Porto della Torre (nel 1993, anno in cui si è verificata la massima portata del secolo, modeste sono state le esondazioni dal fiume). Decisamente più delicata è la situazione a Pavia, pochi chilometri a monte della confluenza in Po, dove il Ticino ne subisce sensibilmente il rigurgito: la prospettata modifica dell'incile, incrementando la durata delle portate elevate, aumenterebbe anche la probabilità che contemporaneamente si configuri nel ricevente un elevato tirante idrico, e che quindi sia impedito il regolare deflusso nel Po.

9. Riferimenti bibliografici

1. AMBROSETTI ET AL. (1994). *La piena del Lago Maggiore nell'autunno 1993: un evento di portata secolare*. CNR, Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia n°45, Verbania Pallanza.
2. CAMPI G. (1995).*Conseguenze di una modifica dell'incile del Lago Maggiore sui livelli lacuali e sulle portate del Ticino emissario.* Tesi di laurea, Università degli Studi di Parma.
3. CITRINI D. (1973). *Le piene del Lago Maggiore e del Ticino emissario nel primo trentennio di regolazione.* Pubbl. n°14 del Consorzio del Ticino, Milano.
4. CITRINI D. - COZZO G. (1982). *Influenza delle modalità di regolazione del Lago Maggiore nei riguardi delle portate erogabili e dei livelli di piena*. Pubbl. n°16 del Consorzio del Ticino, Milano.
5. DE MARCHI G. (1940). *Sistemazione dello sbocco del Lago Maggiore: ricerca sperimentale su modello eseguita dall'Istituto di Idraulica del R. Politecnico di Milano.* Pubbl. n°1 del Consorzio del Ticino, Milano.
6. DE MARCHI G. (1950). *Ripercussioni della regolazione del Lago Maggiore sulle piene del Lago e su quelle del Ticino a Sesto Calende*. Publ. n°4 del Consorzio del Ticino, Milano.
7. MAIONE U. - MIGNOSA P. (1995). *Il funzionamento idraulico dell'incile del Lago Maggiore: modello matematico dal Lago allo sbarramento di Porto della Torre e ricostruzione delle piene dell'autunno 1991 e 1993*. Pubbl. n°19 del Consorzio del Ticino, Milano.

8. MARCHETTI M. (1963). *Sistemazione dell'alveo del fiume Ticino al Dosso dei Murazzi.* Publ. n°8 del Consorzio del Ticino, Milano.

9. MARCHETTI M. - RAFFA U. (1965). *Le portate dell'incile del Lago Maggiore in regime libero prima e dopo la sistemazione del suo alveo.* Pubbl. n°11 del Consorzio del Ticino, Milano.

10. PERVANGHER C. (1993). *Presentazione piena settembre-ottobre 1993.*

11. UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE (1993). *Studio di fattibilità per un incremento di deflusso del fiume Ticino a Sesto Calende: Relazione Tecnica.* Studio d'Ingegneria G. Anastasi, Bellinzona.

12. UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE (1994a). *Considerazioni preliminari per un aumento di deflusso di 600 m^3/s.* UFEA, Berna.

13. UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE (1994b). *Studio di fattibilità per un incremento di deflusso del fiume Ticino a Sesto Calende: Simulazione della piena dell'autunno 1993.* Studio d'Ingegneria G. Anastasi, Bellinzona.

14. *Verbale della Conferenza dei Delegati tecnici italiani e svizzeri per l'esame del progetto della sistemazione del Lago Maggiore.* Milano, 1938.

15. *Verbale della Riunione delle Delegazioni italiana e svizzera.* Berna, 1941.

16. *Verbale della Riunione delle Delegazioni italiana e svizzera.* Basilea, 1943.

17. ZAMPAGLIONE D. (1993). *Cinquanta anni di regolazione: note, informazioni ed elaborazioni idrologiche.* Pubbl. n°18 del Consorzio del Ticino, Milano.

PUBBLICAZIONI DEL CONSORZIO DEL TICINO

1	1940	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Sistemazione dello sbocco del Lago Maggiore
2	1943	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Determinazione delle portate che la regolazione dei deflussi dal Lago Maggiore renderà disponibili per le utilizzazioni
3	1950	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Determinazione dei benefici ritraibili dall'elevamento del limite superiore della trattenuta attiva dall'altezza di + 1,00 m a quella di + 1,50 m sopra lo zero dell'idrometro di Sesto Calende
4	1950	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Ripercussioni della regolazione del lago Maggiore sulle piene del lago e su quelle del Ticino a Sesto Calende
5	1950	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Variazioni provocate dalla regolazione dei deflussi nelle tenute dei livelli del lago Maggiore
6	1955	Prof. Ing. Giulio De Marchi	Determinazione delle portate che la regolazione del lago Maggiore renderà disponibili per le utilizzazioni. (seconda parte, anni 1945-1954)
7	1961	Consorzio del Ticino	Portate regolate giornaliere derivabili nei periodi irrigui dal 1916 al 1959 calcolate con le modalità del normale esercizio
8	1963	Prof. Ing. Mario Marchetti	Sistemazione dell'alveo del fiume Ticino al Dosso dei Murazzi
9	1964	Prof. Ing. Luigi Gherardelli	Influenza dei serbatoi montani alpini sulla regolazione del lago Maggiore
10	1964	Consorzio del Ticino	Portate autunno-inverno derivabili dal fiume Ticino calcolate con le modalità del normale esercizio dal 1916 al 1964
11	1965	Prof. Ing. Mario Marchetti Dr. Ing. Ugo Raffa	Le portate dell'incile del lago Maggiore in regime libero prima e dopo la sistemazione del suo alveo
12	1965	Prof. Ing. Mario Marchetti Dr. Ing. Ugo Raffa	Le risorgenze nell'alveo del fiume Ticino dalla diga della Miorina al ponte di Turbigo
13	1968	Consorzio del Ticino	La regolazione del lago Maggiore nel primo venticinquennio di esercizio (1943-1967)
14	1973	Prof. Ing. Duilio Citrini	Le piene del lago Maggiore e del Ticino emissario nel primo trentennio di regolazione
15	1981	Prof. Ing. Duilio Citrini Prof. Ing. Giuseppe Cozzo	Influenza dei serbatoi alpini sulla regolazione del lago Maggiore
16	1982	Prof. Ing. Duilio Citrini Prof. Ing. Giuseppe Cozzo	Influenze delle modalità di regolazione del lago Maggiore nei riguardi delle portate erogabili e dei livelli di piena
17	1986	Prof. Ing. Piero Maria Pellò Dr. Ing. Giulio Roncoroni	Informazioni relative all'evento di piena del lago Maggiore dell'aprile-maggio 1986 con analisi degli effetti, nella circostanza, di ipotetici interventi tendenti a ridurre le esondazioni
18	1993	Prof. Ing. Domenico Zampaglione	Cinquanta anni di regolazione
19	1995	Prof. Ing. Ugo Maione Prof. Ing. Paolo Mignosa	Il funzionamento idraulico dell'incile del lago Maggiore: Modello matematico dal Lago allo sbarramento di Porto della Torre e ricostruzione delle piene dell'autunno 1991 e 1993