CONSORZIO DEL TICINO
MILANO

Prof. Ing. Ugo Majone
Prof. Ing. Paolo Mignosa

EFFETTI SULLE PIENE DEL VERBANO E DEL TICINO PROVOCATI DA UN AUMENTO DELLA CAPACITÀ DI DEFLUSSO ALL'INCILE

D.I.I.A.R., Politecnico di Milano, Presidente del Consorzio del Ticino
Dipartimento di Ingegneria Civile, Università degli Studi di Parma

Pubblicazione n. 23

Atti del Convegno:
Il Verbano: Quale futuro?
Insidie di un ecosistema e mezzi di difesa

9-10 novembre 2001
Ascona
Centro seminariale Monte Verità

Milano, Gennaio 2004

Effetti sulle piene del Verbano e del Ticino provocati da un aumento della capacita' di deflusso all'incile

Ugo Maione[1], Paolo Mignosa[2]

[1] *D.I.I.A.R., Politecnico di Milano, Presidente del Consorzio del Ticino*
[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 particolarmente rilevante e che allora si ritenne dovesse rimanere il massimo evento del XX secolo: infatti per ritrovare in passato livelli al colmo superiori a quelli che si osservarono allora si deve risalire addirittura al 1872. Eccezionale fu anche la durata complessiva dell'esondazione dal lago che raggiunse i 25 giorni consecutivi ([7], [9], [12]).

Anche a causa di questo evento, che ha provocato ingenti danni alle popolazioni ed alle attività economiche rivierasche, stimati in quasi 400 miliardi di lire [7], si decise di intraprendere uno studio che affrontasse il problema delle piene del Verbano, analizzando quei fattori che, direttamente od indirettamente, potessero influire si di esse.

Nel mese di ottobre del 2000 si è verificato un altro evento di piena che ha addirittura superato, se non altro dal punto di vista dei massimi livelli lacustri raggiunti e delle massime portate evacuate dal Ticino emissario, l'evento del 1993. Il livello del lago ha raggiunto, alle ore 1:00 *a.m.* del 17 ottobre, il valore di +4.62 *m* sopra lo zero di Sesto Calende (idrometro storico di riferimento italiano), superando così di 35 *cm* il precedente massimo di +4.27 *m* registrato alle ore 0:00 del 15 ottobre 1993 ([15]).

Al di là di questi eventi recenti e particolarmente intensi, 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.

Negli ultimi anni è così cresciuta l'attenzione da parte di studiosi ed autorità pubbliche italiani e svizzeri circa la possibilità di modificare, mediante dragaggio dell'incile o con interventi di natura strutturale, il regime delle piene del Verbano. Occorre ricordare che, dal 1943, i deflussi del Ticino emissario sono regolati, per gli stati lacuali compresi entro il disciplinare di concessione, mediante lo sbarramento mobile della Miorina, affidato in gestione al Consorzio del Ticino. E' però ormai consolidata opinione, confortata dai risultati degli studi compiuti da profondi ed autorevoli conoscitori dell'idraulica lacuale ([1], [5], [6], [14]), che la regolazione, così come è attualmente disciplinata, non aggravi in modo apprezzabile il regime delle piene del lago Maggiore, per cui un'eventuale restrizione dei limiti con cui essa viene esercitata non porterebbe sensibili miglioramenti nella direzione voluta, compromettendo contemporaneamente i notevoli vantaggi da essa ottenuti.
Le numerose proposte elaborate per ridurre i danni delle esondazioni lacuali, quindi, sono principalmente volte alla realizzazione di un consistente aumento della capacità di deflusso dell'incile, ottenibile in teoria con diverse modalità: dragaggio dell'alveo in corrispondenza del Dosso dei Murazzi, 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. Ma qualora si operasse una modifica della configurazione fisica dell'incile in modo da aumentarne l'*officiosità,* indipendentemente dalla modalità di realizzazione, al miglioramento del regime dei livelli di colmo del lago (correlato all'entità dell'aumento della capacità di deflusso) farebbe riscontro una modifica nel regime delle portate di colmo del Ticino emissario, creando situazioni potenzialmente più pericolose lungo l'asta fluviale ed anche a Pavia, dove comunque, come si mostrerà nel prosieguo di questo studio, le esondazioni del Ticino sono legate non solo alle portate in esso transitanti ma anche ai contemporanei elevati livelli idrometrici in Po.
Nella presente relazione vengono esaminati gli effetti di una modifica dell'incile, realizzata in modo da ottenere un aumento della capacità di deflusso di circa 520 m^3/s quando il livello idrico a Sesto Calende è pari a 195.80 *m s.l.m.* e di valutare, in termini quantitativi, le ripercussioni che questa modifica può avere sugli stati di piena del Verbano e del Ticino emissario. A questo scopo si è proceduto ad analizzare l'influenza che la prospettata modifica avrebbe avuto sul decorso di tutte

le piene che si sono verificate dall'entrata in esercizio dello sbarramento ad oggi: si sono perciò ricostruiti gli andamenti (livelli nel lago e portate in uscita) che si sarebbero verificati se le piene avessero trovato non già l'incile nella sua configurazione reale, ma in quella modificata dal progetto in esame. Inoltre, attraverso l'allestimento di un modello matematico del fiume Ticino, si è valutato come gli effetti di tale modifica si risentano lungo l'asta fluviale, concentrando l'attenzione in corrispondenza della città di Pavia.

2. Le scale di portata dell'incile del lago Maggiore

La scala di deflusso dell'incile del lago Maggiore, riferita alla sezione dell'idrometro storico di Sesto Calende, consente di valutare le portate in uscita dal Ticino le quali, unitamente all'andamento dei livelli nel lago, permettono poi di individuare gli afflussi al Verbano durante gli eventi di piena considerati. Ufficialmente, dall'entrata in esercizio dello sbarramento della Miorina (1943) ad oggi, il Servizio Idrografico Italiano ha pubblicato due scale di deflusso per la sezione dell'idrometro di Sesto Calende, valide nel cosiddetto "regime di deflusso libero", quando cioè lo sbarramento della Miorina è completamente abbattuto e le portate erogate sono determinate non più dall'esercizio della regolazione, ma dalla configurazione naturale dell'incile. Esse sono rappresentate in Fig.2.1a.

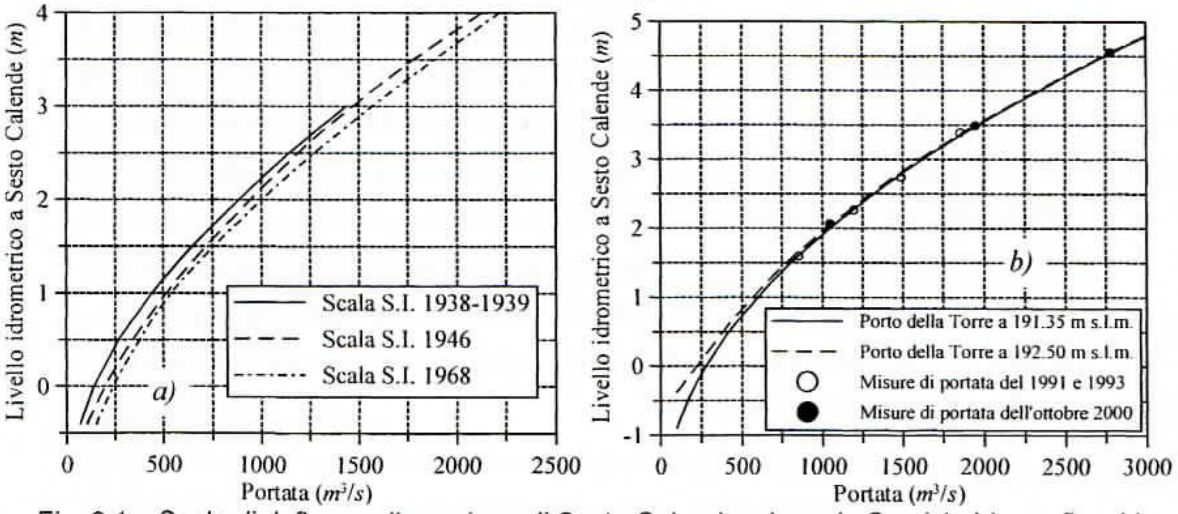

Fig. 2.1. : Scale di deflusso alla sezione di Sesto Calende: a) scale Servizio Idrografico; b) scale attuali.

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 dalle quali si evince che l'attuale capacità di deflusso dell'incile è maggiore di quella evidenziata dalla scala del S.I. 1968.
L'attuale funzionamento dell'incile del lago è stato recentemente oggetto di studio da parte di Maione e Mignosa [12] che, mediante modellazione matematica del tratto di Ticino compreso tra il lago e lo sbarramento di Porto della Torre, hanno ottenuto le due scale (a seconda del livello di ritenuta a Porto della Torre) riportate in Fig. 2.1b.
Una sostanziale convalida della scala così dedotta si è avuta durante la recente piena dell'ottobre 2000. Nei giorni 17, 20 e 25 ottobre sono state effettuate, su incarico del Consorzio del Ticino nell'ambito del progetto *INTERREG II*, tre misure di portata sul Ticino emissario in corrispondenza della sezione del ponte stradale-ferroviario sulla S.S.33. Nella già citata Fig.2.1b sono riportate le tre misure di portata effettuate durante la piena. Esse sono in ottimo accordo con le scale ottenute dal modello numerico e ne confermano la validità fino a valori di portata di circa 3000 m^3/s, a cui può essere attribuito, come verrà giustificato più avanti, un tempo di ritorno superiore ai 200 anni.
Per valutare poi l'influenza che una modifica all'incile comporta sul regime idraulico è stato allestito un modello matematico di moto vario monodimensionale sulla base del rilievo delle sezioni del tronco di Ticino, dal lago fino allo sbarramento di Porto della Torre, effettuato nel maggio del 1990 per conto della Sezione Economia delle Acque di Bellinzona. Proseguendo sull'ipotesi proposta dallo studio Anastasi [8] si è giunti a definire l'entità del dragaggio necessario ad ottenere il voluto incremento di capacità di portata. La scala di deflusso, ottenuta mediante modellazione matematica partendo dalle sezioni modificate, è riportata, assieme alla scala attuale per un più immediato confronto, nella Fig. 2.2.
Con tale modifiche, a cui è associato un volume complessivo di scavo di circa 700000 m^3, è stato valutato un incremento di deflusso dal lago di circa 520 m^3/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).

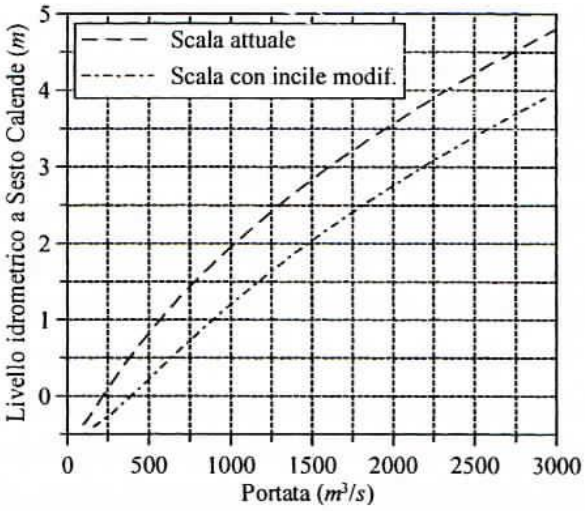

Fig.2.2. Scala di deflusso attuale e nell'ipotesi di modifica dell'incile mediante dragaggio.

3. Risultati e confronti tra le piene nelle due situazioni esaminate

L'idrometro di Sesto Calende è munito dal 1934 di apparecchio registratore, gestito dall'Ufficio Idrografico e Mareografico per il bacino del Po tramite la Sezione di Milano.

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. Per valutare le conseguenze che una modifica dell'incile determina sul regime delle piene del lago Maggiore e del Ticino emissario, si sono considerati gli eventi di piena che hanno interessato il Verbano dal 1943 al 2000. In sostanza si è calcolata, attraverso una opportuna modellazione, quale sarebbe stata la risposta del *sistema idraulico* "lago Maggiore", qualora questo, sollecitato dagli stessi afflussi che si sono effettivamente verificati durante le piene, avesse presentato non già le proprie caratteristiche fisiche effettive, ma quelle "previste" sintetizzate dalla nuova scala di deflusso.

Si sono dapprima ricostruiti gli andamenti dei livelli a Sesto e delle portate del Ticino che si sarebbero verificati, in quegli eventi, se l'incile del lago avesse presentato la capacità di deflusso prospettata dalla nuova scala, riportata nella

Fig.2.2. Successivamente, per i soli eventi di piena di cui si disponeva anche dei livelli osservati al ponte della Becca, necessari come condizione di contorno di valle, si è simulata la propagazione delle piene storiche in modo da ricavare i livelli e le portate, relativi alla situazione attuale, lungo il Ticino. Infine, utilizzando gli idrogrammi delle piene ricostruite, ricavati precedentemente, si sono ottenuti i livelli e le portate che si sarebbero verificati lungo il Ticino in quegli stessi eventi, se l'incile del lago avesse presentato la capacità di deflusso prospettata dalla nuova scala.

Nella Tab.3.1 sono riportati, per ogni piena, oltre alla data ed il livello d'inizio, anche i valori e la data del colmo principale - osservato e ricostruito - a Sesto Calende. Nella Tab.3.2 sono riportati, per le sole piene simulate, oltre alla data d'inizio, anche i valori e la data dei livelli al colmo nella situazione attuale e in quella modificata per la sezione del Ponte Coperto di Pavia.

I valori riportati nella Tab.3.1 sono già indicativi, almeno in termini qualitativi, delle ripercussioni che l'aumento di capacità di deflusso dell'incile (conseguente alla modifica considerata nel presente studio) avrebbe sul regime delle piene del lago Maggiore e del Ticino emissario. In particolare sono evidenziate le differenze tra i valori di colmo osservati e quelli ricostruiti: per tutte le piene si denota un decremento delle quote massime raggiunte dal lago, ed un aumento delle portate defluenti, a conferma che l'aumento di officiosità dell'incile comporta, in generale, un miglioramento delle condizioni di piena lacuali, peggiorando altresì quelle del Ticino.

Il decremento medio dei livelli del lago, ottenibile con la nuova scala di deflusso, è pari a circa 50 *cm*. Il massimo decremento si verificherebbe per la piena del 1957, con un abbassamento del livello di colmo di ben 90 *cm*, mentre il decremento minimo sarebbe di soli 16 *cm* (piena del 1982). I decrementi più consistenti si raggiungono nelle piene che presentano massimo ritardo tra l'inizio ed il colmo principale: non vi è invece proporzionalità tra misura della variazione e valore del corrispondente livello di colmo, anche se per le piene più importanti il decremento non è mai stato, in generale, inferiore ai 60 *cm*.

Per fornire una prima indicazione di carattere statistico circa le modifiche al regime di piena lacuale indotte dalla nuova scala di deflusso, si sono ordinati in modo decrescente i livelli di colmo a Sesto Calende osservati e quelli ottenuti dalla ricostruzione delle piene. I risultati dell'ordinamento sono sinteticamente

rappresentati nel grafico di Fig.3.1a, da cui si ha conferma che le ipotizzate modifiche all'incile determinano un decremento di livello, nelle piene di pari frequenza, pressoché costante e dell'ordine di 50 *cm*: da esso si può altresì dedurre come il numero di piene che hanno presentato un livello di colmo non inferiore ai +2.00 *m* sullo zero di Sesto si riduca da 44 a 24. Lo stesso ragionamento può essere condotto anche per altri livelli (Tab.3.3), ottenendo così una prima indicazione sull'effettiva consistenza delle variazioni sulle frequenze dei colmi di livello provocate dalla prospettata modifica all'incile.

Un'altra utile indicazione delle conseguenze sul regime di piena lacuale della modifica dell'incile, è fornita dall'elaborazione delle permanenze complessive 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 Fig.3.1b, in cui le ascisse rappresentano i giorni complessivi in cui, dal 1943 al 2000, il lago ha presentato a Sesto un livello uguale o superiore a quello riportato in ordinata. Dall'analisi del grafico si nota chiaramente come il modificato regime delle piene lacuali è caratterizzato da una consistente riduzione delle permanenze complessive, largamente superiore al 60%.

Nella Tab.3.1 sono anche riportati i valori delle portate al colmo osservati nelle piene storiche e quelli che si sarebbero verificati a seguito della modifica dell'incile, nonché le loro differenze.

N°	Anno	Data di inizio	h_0 (*m*)	Situazione attuale			Situazione modificata				
				Data del colmo	h_{max} (*m*)	Q_{max} (m^3/s)	Data del colmo	h'_{max} (*m*)	Δh_{max} (*m*)	Q'_{max} (m^3/s)	ΔQ_{max} (m^3/s)
1	1945	30-ott 08:00	1.28	02-nov 17:00	2.14	1012	02-nov 08:00	1.70	-0.46	1287	275
2	1946	14-mag 08:00	1.48	03-giu 17:00	2.14	1012	16-mag 11:00	1.71	-0.43	1294	282
3	1948	04-set 14:00	1.51	06-set 05:00	2.65	1268	05-set 23:00	2.37	-0.28	1722	454
4	1951	08-apr 08:00	0.41	28-mag 23:00	2.77	1335	28-mag 23:00	1.95	-0.82	1443	108
5	1951	08-ago 14:00	1.24	09-ago 17:00	2.15	1013	09-ago 14:00	1.95	-0.20	1444	431
6	1951	08-nov 14:00	1.49	12-nov 20:00	3.70	1914	12-nov 11:00	3.08	-0.62	2244	330
7	1953	15-ott 20:00	1.06	30-ott 14:00	2.72	1307	30-ott 11:00	1.85	-0.87	1382	75
8	1954	21-ago 17:00	1.50	23-ago 08:00	2.65	1268	22-ago 14:00	2.38	-0.27	1729	461
9	1955	08-giu 05:00	1.52	10-giu 17:00	2.30	1091	10-giu 11:00	1.93	-0.37	1428	337
10	1956	27-ago	1.26	04-set 14:00	2.21	1046	29-ago	1.77	-0.44	1333	287

		20:00					14:00				
11	1957	07-giu 20:00	1.11	26-giu 02:00	2.80	1348	26-giu 02:00	1.90	-0.90	1411	63
12	1960	17-mag 05:00	1.14	20-mag 17:00	2.35	1113	20-mag 11:00	1.90	-0.45	1412	299
13	1960	16-set 20:00	1.70	20-set 14:00	3.15	1558	20-set 11:00	2.55	-0.60	1845	287
14	1963	02-set 05:00	1.10	06-set 23:00	2.10	1054	03-set 17:00	1.65	-0.45	1258	204
15	1963	04-nov 11:00	1.47	07-nov 14:00	3.37	1805	07-nov 11:00	2.93	-0.44	2127	322
16	1965	01-set 23:00	1.12	11-set 14:00	2.81	1454	11-set 14:00	2.12	-0.69	1554	100
17	1965	27-set 08:00	1.39	02-ott 17:00	3.00	1571	02-ott 14:00	2.43	-0.57	1765	194
18	1966	15-ott 20:00	1.08	20-ott 17:00	2.35	1191	20-ott 14:00	1.83	-0.52	1369	178
19	1968	05-mag 05:00	1.14	07-mag 23:00	2.17	1091	07-mag 14:00	1.84	-0.33	1372	281
20	1968	02-nov 05:00	1.45	04-nov 17:00	3.48	1875	04-nov 05:00	3.10	-0.38	2262	387
21	1969	24-giu 08:00	1.23	25-giu 14:00	2.02	1013	25-giu 08:00	1.84	-0.18	1376	363
22	1972	06-giu 20:00	1.04	13-giu 14:00	2.01	1007	13-giu 02:00	1.47	-0.54	1151	144
23	1973	15-lug 02:00	1.16	18-lug 14:00	2.47	1257	18-lug 14:00	2.05	-0.42	1510	253
24	1975	15-set 11:00	1.24	17-set 17:00	2.61	1339	17-set 14:00	2.30	-0.31	1675	336
25	1976	28-set 23:00	1.15	05-ott 11:00	2.94	1535	05-ott 11:00	2.31	-0.63	1683	148
26	1977	29-apr 11:00	1.03	05-mag 11:00	3.51	1893	05-mag 05:00	2.87	-0.64	2081	188
27	1977	28-lug 11:00	1.00	01-ago 11:00	2.05	1030	01-ago 05:00	1.64	-0.41	1252	222
28	1977	18-ago 08:00	1.00	31-ago 23:00	2.90	1511	31-ago 23:00	2.15	-0.75	1571	60
29	1977	07-ott 14:00	1.05	10-ott 14:00	3.46	1859	09-ott 20:00	3.02	-0.44	2201	342
30	1978	01-ago 17:00	0.99	08-ago 23:00	2.33	1178	08-ago 23:00	1.78	-0.55	1339	161
31	1979	14-ott 02:00	0.90	17-ott 14:00	3.66	1991	17-ott 11:00	3.17	-0.49	2315	324
32	1981	25-mag 20:00	1.29	28-mag 02:00	2.08	1043	27-mag 20:00	1.78	-0.30	1338	295
33	1981	22-set 20:00	1.05	28-set 05:00	3.88	2139	28-set 05:00	3.27	-0.61	2396	257
34	1982	26-set 17:00	1.03	27-set 23:00	2.10	1055	27-set 17:00	1.94	-0.16	1435	380
35	1983	22-apr 02:00	1.08	23-mag 11:00	3.37	1804	17-mag 08:00	2.57	-0.80	1860	56
36	1986	06-apr 14:00	0.91	26-apr 23:00	3.18	1683	26-apr 23:00	2.42	-0.76	1759	76
37	1987	17-lug 23:00	1.02	20-lug 02:00	2.84	1473	19-lug 20:00	2.53	-0.31	1836	363
38	1987	08-ott 17:00	0.90	16-ott 23:00	2.46	1253	13-ott 02:00	1.94	-0.52	1436	183
39	1988	12-ott 11:00	1.14	15-ott 11:00	2.83	1469	15-ott 05:00	2.44	-0.39	1767	298
40	1991	29-set 09:00	0.98	01-ott 12:00	2.99	1620	01-ott 03:00	2.73	-0.26	1981	361
41	1993	23-set 06:00	1.12	14-ott 21:00	4.27	2560	14-ott 15:00	3.49	-0.78	2577	17
42	1994	14-mag 18:00	1.20	22-mag 12:00	2.06	1080	19-mag 09:00	1.56	-0.50	1203	123
43	1994	04-nov 17:00	0.88	07-nov 17:00	2.30	1212	07-nov 02:00	2.01	-0.29	1479	267
44	2000	12-ott 00:00	1.19	17-ott 01:00	4.62	2844	17-ott 00:00	4.06	-0.56	3080	236

Tab.3.1: Livelli e portate di colmo delle piene osservate che hanno raggiunto o superato l'altezza +2.00 m a Sesto dal 1943 al 2000 e ricostruite con l'ipotesi di incile modificato.

La prospettata modifica dell'incile incide significativamente sul regime delle piene fluviali, comportando un aumento medio delle portate di colmo pari a circa 250 m3/s. Il massimo incremento di portata si verifica nella piena del 1954, con un aumento del valore di colmo (peraltro relativamente modesto) di ben 461 m3/s; l'incremento minimo assume invece il valore di 17 m3/s, e si verificherebbe nella piena del 1993.

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; anche in questo caso, comunque, non si rileva proporzionalità tra misura della variazione e valore di colmo.

N.ro	Anno	Data di inizio	Situazione attuale		Situazione modificata		
			Data del colmo	h_{max} (m)	Data del colmo	h'_{max} (m)	Δh_{max} (m)
1	1951	08-apr 08:00	29-mag 12:00	2.39	29-mag 09:00	2.42	0.03
2	1951	08-ago 14:00	11-ago 17:00	0.09	10-ago 02:00	0.32	0.23
3	1951	08-nov 14:00	13-nov 02:00	5.51	12-nov 23:00	5.56	0.05
4	1953	15-ott 20:00	29-ott 08:00	2.43	29-ott 05:00	2.45	0.02
5	1954	21-ago 17:00	23-ago 14:00	1.86	23-ago 14:00	2.06	0.20
6	1955	08-giu 05:00	10-giu 23:00	0.73	10-giu 23:00	0.94	0.21
7	1956	27-ago 20:00	04-set 20:00	0.89	04-set 20:00	0.95	0.06
8	1957	07-giu 20:00	16-giu 08:00	3.50	16-giu 08:00	3.52	0.02
9	1963	02-set 05:00	08-set 13:01	0.81	08-set 14:01	0.88	0.07
10	1963	04-nov 11:00	07-nov 20:00	2.99	07-nov 17:00	3.12	0.13
11	1966	15-ott 20:00	17-ott 14:00	2.71	17-ott 14:00	2.80	0.09
12	1968	02-nov 05:00	04-nov 14:00	4.58	04-nov 14:00	4.67	0.09
13	1969	24-giu 08:00	25-giu 17:00	0.61	25-giu 17:00	0.84	0.23
14	1972	06-giu 20:00	13-giu 11:00	1.29	13-giu 11:00	1.35	0.06
15	1973	15-lug 02:00	15-lug 23:00	0.70	15-lug 23:00	0.86	0.16
16	1975	15-set 11:00	17-set 08:00	0.58	17-set 08:00	0.89	0.31
17	1976	28-set 23:00	31-ott 11:00	3.66	31-ott 11:00	3.66	0.00
18	1977	29-apr 11:00	05-mag 23:00	3.31	05-mag 23:00	3.37	0.06
19	1977	28-lug 11:00	01-ago 12:00	1.54	01-ago 12:00	1.63	0.09
20	1977	18-ago 08:00	31-ago 14:00	2.32	31-ago 11:00	2.34	0.02
21	1977	07-ott 14:00	10-ott 14:00	3.80	09-ott 20:00	3.91	0.11
22	1978	01-ago 17:00	09-ago 02:00	0.18	09-ago 02:00	0.32	0.14
23	1979	14-ott 02:00	16-ott 11:00	2.77	16-ott 11:00	2.94	0.17
24	1982	26-set 17:00	28-set 05:00	-0.89	28-set 02:00	-0.39	0.50
25	1983	22-apr 02:00	17-mag 09:00	1.92	17-mag 09:00	2.00	0.08
26	1987	17-lug 23:00	20-lug 11:00	-0.58	20-lug 02:00	-0.01	0.57
27	1987	08-ott 17:00	13-ott 05:00	2.17	13-ott 05:00	2.25	0.08
28	1988	12-ott 11:00	15-ott 11:00	1.41	15-ott 11:00	1.60	0.19
29	1991	29-set 09:00	30-set 21:00	0.53	01-ott 00:00	0.95	0.42
30	1993	23-set 06:00	26-set 03:00	3.26	26-set 00:00	3.41	0.15
31	1994	04-nov 17:00	07-nov 12:00	5.21	07-nov 12:00	5.23	0.02
32	2000	12-ott 00.00	17-ott 10:00	5.62	17-ott 09:00	5.77	0.15

Tab.3.2 : Livelli di colmo al Ponte Coperto di Pavia delle piene simulate nella situazione attuale e nella situazione con l'incile modificato.

Livelli al colmo superiori a *m*	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50	3.75	4.00	4.25
N° Casi Storici	44	32	25	21	13	10	6	3	2	2
N° Casi Ricostruiti	24	20	13	9	7	3	1	1	1	0

Tab.3.3 : Numero di casi storici e ricostruiti superiori a livelli di colmo definiti

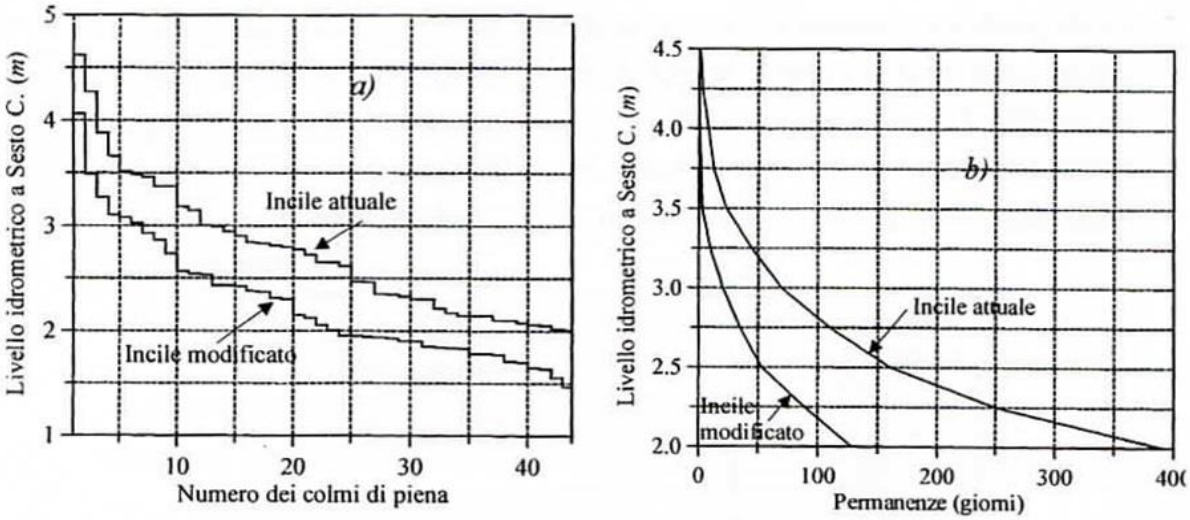

Fig. 3.1: Massimi livelli (a) e permanenze complessive (b) osservate a Sesto Calende e ricostruite con la nuova scala di deflusso per gli eventi dal 1943 al 2000.

Ordinando in modo decrescente le portate massime osservate e quelle ottenute dalla ricostruzione (Fig.3.2a) si nota, nelle piene di pari frequenza, un incremento del valore di colmo pressoché costante e pari a circa 250 m^3/s; il numero di piene che presenta una portata al colmo superiore a 2000 m^3/s passerebbe da 3 a 9. Analogamente a quanto già fatto per i livelli, si può ripetere lo stesso ragionamento per altri valori di portata: i risultati, riportati nella Tab.3.4, confermano il consistente aggravio del regime di piena fluviale indotto dalla nuova scala di portate. Un'altra indicazione sull'entità di tale peggioramento è fornita dalla elaborazione delle permanenze complessive.

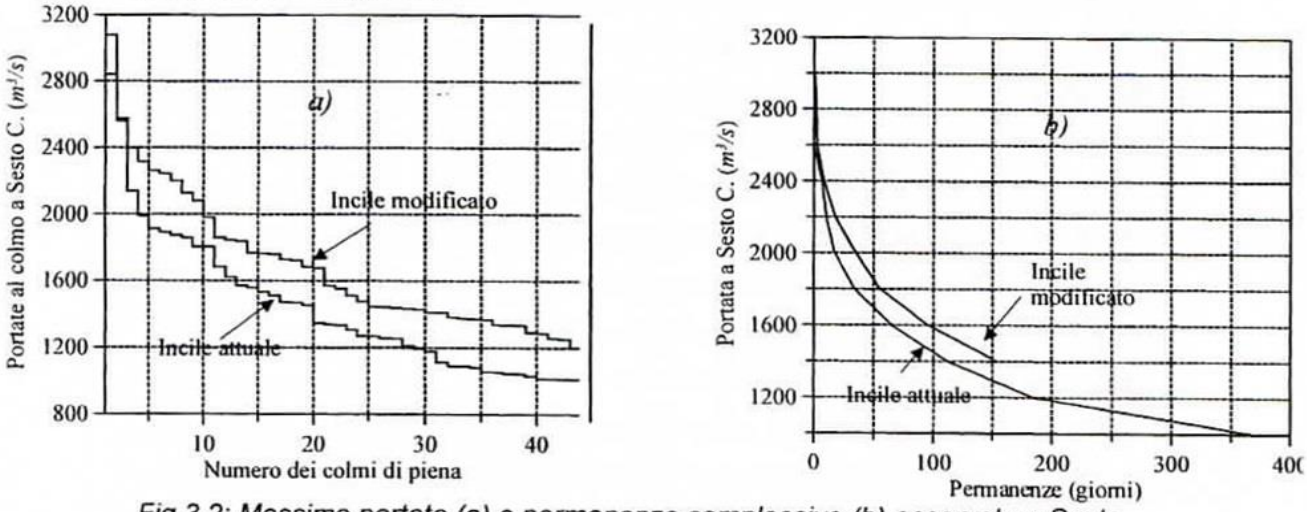

Fig.3.2: Massime portate (a) e permanenze complessive (b) osservate a Sesto Calende e ricostruite con la nuova scala di deflusso per gli eventi dal 1943 al 2000.

Il grafico di Fig.3.2b mostra come il nuovo regime delle piene fluviali sia caratterizzato da un aumento delle permanenze che raggiunge la consistenza di più del 40%. Per valori inferiori a 1400 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*.

Portate di colmo superiori a m^3/s	N° Casi storici	N° Casi ricostruiti
1400	19	31
1600	12	19
1800	10	13
2000	3	9
2200	2	7
2400	2	2

Tab.3.4 : Numero di casi con portata al colmo superiore a prefissati valori.

Nella Tab.3.2 sono riportate le differenze tra i valori di colmo al Ponte Coperto di Pavia nella situazione attuale e in quella modificata ottenute dalla simulazione delle piene. Mentre per alcune piene si nota un incremento sensibile delle quote massime raggiunte, a conferma del fatto che l'aumento di officiosità dell'incile comporta un peggioramento delle condizioni di piena del Ticino, per altre l'incremento è quasi inapprezzabile. Questo comportamento può essere spiegato osservando che la sezione del Ponte Coperto di Pavia dista soli 8 *km* dalla confluenza in Po. I livelli idrometrici alla confluenza influenzano, in taluni casi anche fino a 20 *km* a monte, il regime di piena nel Ticino. Pertanto è stato osservato, e confermato dai risultati ottenuti dalle simulazioni, che nel caso in cui si manifestino valori elevati di livello idrico nel Po il rigurgito da esso esercitato è tale da annullare quasi completamente la dipendenza dei livelli a Pavia dalle portate transitanti in Ticino; mentre, qualora si verifichi una piena di Ticino eccezionale, e si manifestino contemporaneamente livelli in Po modesti, i livelli a Pavia sono invece sensibilmente dipendenti dalle portate transitanti; risulta quindi marcato l'incremento che questi subiscono a seguito dell'aumento delle portate defluenti causato dalla prospettata modifica dell'incile.

L'incremento medio dei livelli di colmo al Ponte Coperto di Pavia, dovuto alla nuova capacità di deflusso, è di circa 15 *cm*: il massimo incremento si verificherebbe per

la piena del luglio 1987 con un innalzamento del livello di colmo di ben 57 *cm*[1]; l'incremento minimo al contrario sarebbe nullo per la piena del 1976.
Analogamente a quanto già fatto per i livelli di colmo a Sesto Calende, si possono ordinare in modo decrescente i livelli al Ponte Coperto di Pavia, nella situazione attuale e in quella modificata. I risultati dell'ordinamento sono sinteticamente rappresentati nel grafico di Fig.3.3a, da cui si ha conferma che le modifiche all'incile prospettate determinano un certo incremento di livello.
Un'altra utile indicazione delle conseguenze sul regime di piena nel Ticino a Pavia, dovute alla modifica dell'incile, è fornita dall'elaborazione delle permanenze complessive, ottenute sommando le singole durate relative a tutte le piene simulate, per i livelli che partono da -2.50 *m* e proseguono separati l'uno dall'altro da 50 *cm*. I risultati sono riportati nel diagramma di Fig.3.3b, in cui le ascisse rappresentano i giorni complessivi per i quali il livello idrometrico ha presentato a Pavia un valore uguale o superiore a quello riportato in ordinata.
Dai risultati ottenuti è evidente come il regime idraulico a Pavia sia strettamente correlato con quello di Po; ciò è testimoniato dal fatto che i più marcati incrementi di livello, dovuti alla nuova capacità di deflusso in Ticino, si manifestano, come si può osservare dalla curva riportata in Fig.3.3a, per bassi valori di livello.
Analizzando, infatti, la curva di Fig.3.3b si nota chiaramente come le durate a pari livello siano molto simili per valori superiori a +3.00 *m*, mentre per livelli più bassi si ha un incremento seppur modesto delle permanenze.

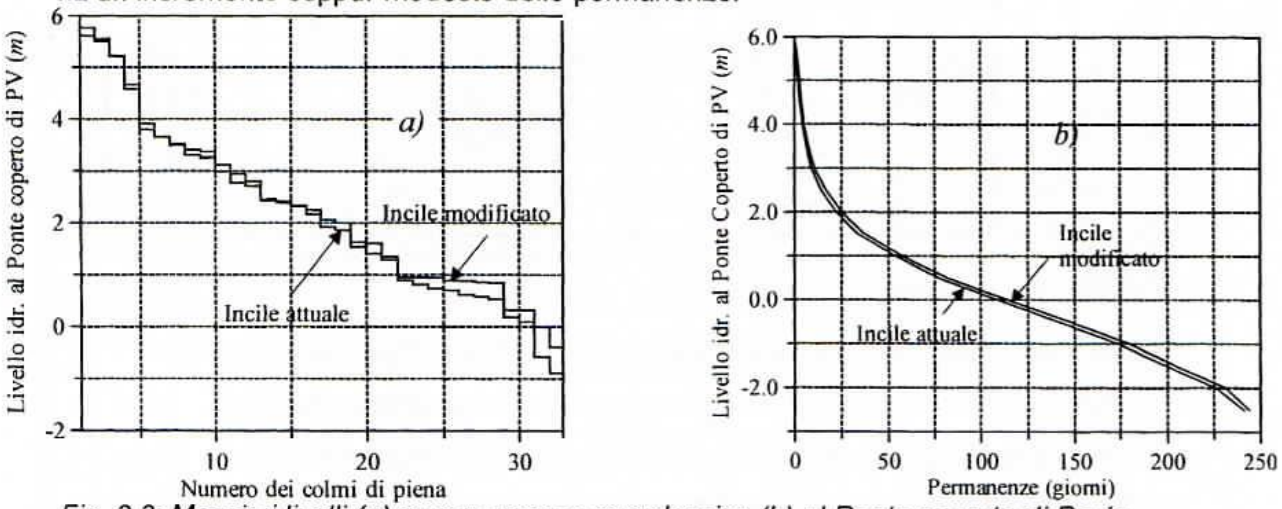

Fig. 3.3: Massimi livelli (a) e permanenze complessive (b) al Ponte coperto di Pavia calcolate nella situazione di incile attuale e modificato

[1] Tale incremento si imposta però su di un livello idrometrico così basso da non configurare alcuna situazione di reale pericolo.

Per comprendere 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.

Nelle Tabb.3.5 e 3.6 sono riportati i valori di colmo a Sesto Calende e a Pavia associati ad alcuni tempi di ritorno. Dalle tabelle è 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 46 *cm* rispetto a quelli delle piene osservate, e tale differenza sale fino a 71 *cm* per tempi di ritorno più elevati.

Dai risultati riportati in Tab.3.5 è anche possibile quantificare l'entità dell'aggravio del regime di piena del Ticino emissario indotto dallo sbancamento prospettato: per le piene di minore tempo di ritorno l'incremento della portata di colmo è dell'ordine di 380 m^3/s rispetto alle piene osservate, mentre per tempi di ritorno elevati l'incremento si riduce a 70 m^3/s.

Tempo di Ritorno (anni)	Portate di colmo nel Ticino (m^3/s)			Livelli di colmo a Sesto (m)		
	a) Piene osservate	b) Piene ricostruite	Differenze b)-a)	a) Piene osservate	b) Piene ricostruite	Differenze b)-a)
2	1154	1534	380	2.44	1.98	-0.46
5	1571	1888	317	3.07	2.56	-0.51
10	1826	2112	286	3.47	2.91	-0.56
25	2142	2385	243	3.93	3.33	-0.60
50	2380	2581	201	4.29	3.60	-0.69
100	2594	2690	96	4.65	3.94	-0.71
200	2839	2909	70	5.01	4.30	-0.71

Tab.3.5: Portate e livelli al colmo a Sesto Calende per assegnati tempi di ritorno nei vari regimi studiati

Analizzando i livelli idrometrici al Ponte Coperto di Pavia, (Tab.3.6) si nota un incremento pronunciato per i tempi di ritorno bassi, circa 20 *cm*, che va poi attenuandosi fino ad annullarsi per valori di tempo di ritorno pari a 100 anni. Per tempi superiori il comportamento può considerarsi coincidente, sia nella situazione attuale che di quella modificata.

Tempo di ritorno (anni)	Livelli di colmo a Pavia (*m*) a) Piene situazione attuale	b) Piene situazione modificata	Differenze b)-a)
2	1.19	1.39	+0.20
5	2.90	3.04	+0.14
10	3.91	4.01	+0.10
25	5.22	5.28	+0.06
50	6.15	6.20	+0.05
100	7.08	7.08	0.00
200	8.01	8.01	0.00

Tab.3.6 : Livelli al colmo al Ponte Coperto di Pavia per assegnati tempi di ritorno nei vari regimi studiati.

4. Considerazioni conclusive

L'indagine condotta ha permesso di valutare, in termini quantitativi, le ripercussioni che può avere, sugli stati di piena del Verbano e del Ticino, una modifica dell'incile volta ad incrementare la capacità di deflusso attuale di circa 520 m^3/s, quando il livello idrometrico è pari a +2.80 *m* sullo zero di Sesto.

L'analisi dei risultati ottenuti conferma il sostanziale miglioramento ottenibile nel regime di piena del lago. Esso è quantificabile, sinteticamente, con un decremento medio di circa 50 *cm* del livello di colmo delle piene effettivamente osservate a Sesto Calende, riduzione che raggiunge i 90 *cm* per le piene che presentano massimo ritardo tra l'inizio ed il colmo principale. Tale riduzione si traduce altresì nel drastico decremento delle permanenze complessive, oltre il 60%; inoltre, è significativo il fatto che delle 24 piene che dal 1943 al 2000 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 12, nel nuovo regime ricostruito, avrebbero superato tale soglia.

Tuttavia, dai risultati delle elaborazioni si ha la conferma dell'aggravio nel regime delle portate di colmo del Ticino emissario. Esso è costituito, nella fattispecie, dall'incremento medio di 250 m^3/s delle portate al colmo delle piene osservate, che sale anche a 300-400 m^3/s per le 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; inoltre, cresce considerevolmente il numero di piene che presentano una portata massima superiore a 2000 m^3/s, che passa da 3 a 9.

Sono state anche valutate le conseguenze che tale l'incremento di portata, indotto dalla nuova scala di deflusso, comporta nel tratto di Ticino compreso tra lo sbocco del lago e Pavia. Per gli eventi di piena considerati, di cui è stato possibile recuperare i livelli osservati

al Ponte della Becca necessari come condizione al contorno di valle per il modello matematico allestito per l'intero fiume Ticino emissario, si è ricavata, attraverso due differenti simulazioni in moto vario, la serie cronologica dei livelli e portate nel caso della configurazione attuale dell'incile e in quella modificata.
Con riferimento alla sezione del Ponte Coperto di Pavia, risulta che l'incremento medio dei livelli di colmo è di circa 15 *cm*; per alcune delle piene considerate si ha un incremento delle quote massime raggiunte, fino ad un massimo di 57 *cm*; per altre invece non si manifesta praticamente alcun incremento. Alla luce dei risultati ottenuti, è ragionevole ritenere che l'entità degli aumenti di portata che si verificherebbero in conseguenza della prospettata modifica dell'incile non sia tale da compromettere l'integrità degli argini a valle della centrale di Porto della Torre. Qualche rischio maggiore è invece prevedibile per il tratto di Ticino tra Oleggio e il Po, caratterizzato da un alveo meno inciso. Decisamente più delicata è la situazione a Pavia: i consistenti allagamenti che si sono ivi verificati durante l'alluvione del novembre 1994 sono fondamentalmente da addebitare al rigurgito del Po, che in quella occasione ha presentato, alla sezione di confluenza, una portata massima rilevante, mentre modesti erano i deflussi nel Ticino. Più articolata è la situazione nell'evento di piena del 2000 che è stato caratterizzato dalla massima portata del secolo transitante nel Ticino e, contemporaneamente, da una portata e quindi un livello idrometrico in Po superiore, in entità, a quella del 1951.

5. Riferimenti bibliografici

1. DE MARCHI G. *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, 1950.
2. MARCHETTI M. *Sistemazione dell'alveo del fiume Ticino al Dosso dei Murazzi*. Publ. n°8 del Consorzio del Ticino, Milano, 1963.
3. GHERARDELLI L. *Influenza dei serbatoi montani alpini sulla regolazione del lago Maggiore*. Pubbl. n°9 del Consorzio del Ticino, Milano, 1964.
4. MARCHETTI M. - RAFFA U. *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, 1965.
5. CITRINI D. *Le piene del lago Maggiore e del Ticino emissario nel primo trentennio di regolazione*. Pubbl. n°14 del Consorzio del Ticino, Milano, 1973.
6. CITRINI D. - COZZO G. *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, 1982.
7. PERVANGHER C. *Presentazione piena settembre-ottobre 1993*. 1993.

8. UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE: *Studio di fattibilità per un incremento di deflusso del fiume Ticino a Sesto Calende: Relazione Tecnica*. Studio d'Ingegneria G. Anastasi, Bellinzona, 1993.
9. AMBROSETTI ET AL. *La piena dei lago Maggiore nell'autunno 1993: un evento di portata secolare*. CNR, Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia n°45, Verbania Pallanza, 1994.
10. DELEGAZIONE SVIZZERA PER LA REGOLAZIONE DEL LAGO MAGGIORE: *Considerazioni preliminari per un aumento di deflusso di 600 m³/s*. UFEA, Berna, 1994.
11. UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE: *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, 1994.
12. MAIONE U. - MIGNOSA P.: *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, 1995.
13. CATTANEO M.: *Le piene del fiume Ticino in relazione a modifiche dell'incile del Lago Maggiore*, Tesi di laurea, Politecnico di Milano, 2000
14. CAMPI. G.: *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, 1995
15. CATTANEO M., MAIONE U. - MIGNOSA P.: L'evento di piena dell'ottobre 2000 sul bacino del Ticino, L'Acqua, N.1, 2001.

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
20	1997	Prof. Ing. Ugo Maione Prof. Ing. Paolo Mignosa	Conseguenze di una modifica dell'incile del Lago Maggiore sugli alti livelli lacuali e sulle portate di piena del Ticino emissario
21	1999	Ugo Maione, Doriana Bellani Michele Buffo, Silvano Ravera, Cecilia Mosca, Nicola Quaranta, Fabrizio Merati	Ricerca sul DMV "Deflusso Minimo Vitale" del fiume Ticino dalla diga della Miorina alla confluenza con il Po.
22	2000	Michele Cattaneo, Ugo Maione, Paolo Mignosa, Massimo Tomirotti	L'evento di piena dell'ottobre 2000 sul Bacino del Ticino
23	2004	Prof. Ing. Ugo Majone Prof. Ing. Paolo Mignosa	Effetti sulle piene del Verbano e del Ticino provocati da un aumento della capacità di deflusso all'incile