

PRESENTAZIONE

La presente pubblicazione riprende, dopo qualche anno, la serie delle pubblicazioni del Consorzio dell'Adda.

E' un'occasione poter mettere nero su bianco i risultati delle ricerche del mio amico Prof. Ugo Moisello del Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale dell'Università di Pavia e del suo collaboratore Ing. Francesco Vullo.

Finalmente in un unico lavoro sono stati ordinati i dati idrologici più importanti del lago di Como e dell'Adda in uscita a Lecco (o ad Olginate) per un periodo veramente lungo.

La memoria segue di pochi mesi un articolo, più scientifico, stampato sulla rivista "L'Acqua" nel numero 6/2009 dal titolo "I massimi di portata dell'Adda a Lecco" degli stessi autori.

Il Consorzio dell'Adda, Ente pubblico non economico, è orgoglioso di contribuire alla divulgazione di notizie e dati che ancora una volta dimostrano che la diga di Olginate, pensata, voluta e gestita da illustri professori idraulici (Fantoli, De Marchi, Citrini) con il contributo dei miei predecessori e loro collaboratori, ha una funzione innegabile che concorre a migliorare la gestione delle acque e dei territori del lago di Como e dell'Adda sub lacuale, per il bene di tutti.

Il miglioramento si nota semplicemente confrontando i dati idrologici raccolti prima e dopo la costruzione della diga.

Milano, Settembre 2010

**IL DIRETTORE
Ing. Luigi Bertoli**

I MASSIMI ANNUALI DI PORTATA DELL'ADDA A LECCO IN DIVERSI REGIMI DI DEFLUSSO

1 PREMESSA

Per l'Adda a Lecco è disponibile una serie di osservazioni sistematiche di portata, ricavate dai livelli del lago di Como, che costituisce una delle più lunghe serie italiane. Per lo studio delle piene l'informazione è ancora più ampia, perché alle osservazioni sistematiche si aggiungono quelle storiche, relative ad alcune piene eccezionali. Il bacino però è stato oggetto di numerosi interventi. Al fine di limitare gli allagamenti di Como e degli altri abitati rivieraschi, sono stati effettuati a più riprese, a partire dal Quattrocento, lavori di ampliamento dell'alveo dell'emissario. Nel Novecento, poi, sono stati costruiti nel bacino prelacuale numerosi serbatoi artificiali per la produzione di energia idroelettrica, e dal 1946 è iniziata la regolazione del lago per mezzo della diga di Olginate. La costruzione della diga è stata accompagnata dalla sistemazione dei tratti di alveo in corrispondenza delle rapide di Lecco, Olginate, Lavello e Brivio, volta a permettere un più rapido deflusso dell'invaso. Gli interventi hanno modificato in diversa misura il regime di deflusso del fiume, e verosimilmente anche quello delle portate di piena. Per ottenere una serie di massimi annuali che si possa considerare statisticamente omogenea occorre dunque ridurre a uno stesso regime i massimi osservati in condizioni diverse. Ma la considerazione di diversi regimi di deflusso, relativi a condizioni diverse dell'alveo e del bacino, permette anche di effettuare dei confronti, utili a mettere in rilievo gli effetti dei diversi interventi antropici. Qui si illustra la determinazione delle serie di massimi annuali corrispondenti a diversi regimi di deflusso, effettuata utilizzando al meglio possibile tutta l'informazione disponibile. Le analisi effettuate sulle serie sopra dette per determinare gli effetti dei diversi interventi e le stime delle portate con elevato tempo di ritorno sono l'oggetto di un'altra memoria.

2 LE PIENE STORICHE

Con il nome di piene storiche dell'Adda a Lecco si indicano quelle avvenute prima del 1845, anno di inizio delle osservazioni sistematiche dei livelli lacuali all'idrometro della Malpensata, presso Lecco. Mentre le testimonianze dirette sulle piene storiche dell'Adda a Lecco sono assai scarse, sono invece numerose le

notizie sulle piene del lago di Como, che ovviamente coincidono con quelle dell'emissario. Le piene storiche del lago provocarono gli allagamenti della città di Como documentati dagli storici della città, tra i quali Giuseppe Rovelli, Maurizio Monti, Cesare Cantù e Cencio Poggi, le cui pubblicazioni (Rovelli, 1802-1803; Monti, 1832; Cantù, 1856; Poggi, 1889) contengono utili notizie sulle maggiori piene del lago dal XV al XIX secolo.

Senza dilungarci sull'argomento, ricordiamo qui brevemente le piene maggiori. La prima piena del Lario ricordata dagli storici è quella dell'estate del 1431, a seguito della quale, per agevolare il deflusso delle acque, furono effettuati lavori presso il ponte di Lecco, situato proprio nel punto in cui il lago si restringe e dove l'Adda emissario comincia il suo corso (prima della costruzione del ponte non si ebbero piene di cui si conservi memoria) (Lecci, 1979). Nel giugno del 1439 però il lago inondò nuovamente la città di Como, e sul finire del XV secolo seguirono altre inondazioni: quella straordinaria del luglio del 1476, quella dell'estate del 1481 e quella del luglio del 1489. Nel XVI secolo le piene del lago continuarono ad allagare la città: nel settembre del 1502, nel luglio del 1505, nel giugno del 1508, quando il lago crebbe tanto da inondare la piazza del Duomo, e nell'agosto 1520, quando l'acqua raggiunse di nuovo le porte della chiesa. Altre piene del secolo ricordate dagli storici furono quelle del 1541, del settembre del 1553, dell'ottobre del 1567 e del 1568, per finire con quella del 1596.

Per evitare i danni delle piene furono effettuati lavori di rimozione delle ghiaie che si accumulavano nei pressi di Lecco, dopo i quali si ebbe in effetti una riduzione dell'entità e della frequenza delle inondazioni: nella prima metà del XVII secolo si registrarono due sole inondazioni della città di Como, nell'ottobre del 1614 e nel 1627, quando le acque entrarono nella chiesa. Ma nel giugno 1673 si ebbe la piena maggiore tra quelle fino ad allora ricordate, che è anche la prima per cui è noto con una certa precisione il massimo livello raggiunto dal lago, indicato con diverse lapidi affisse ai muri: 3,564 m sullo zero dell'idrometro di Como (costruito più tardi) (Cattaneo, 1971).

Altre piene minori, di cui non è noto il livello, afflissero Como nel 1679 e nel 1689. In entrambi i casi si rinnovarono i lavori nell'alveo dell'Adda. Nel corso del XVIII secolo si ebbero piene modeste, di cui

non si conoscono i livelli, nel giugno del 1703, nel 1705, nel 1710 e nel 1714. Per cinque anni consecutivi tra il 1746 e il 1750 Como subì allagamenti, il peggiore dei quali fu quello provocato dalla piena del settembre-ottobre del 1747, di cui, come delle altre avvenute alla metà del Settecento, non si conoscono con precisione i livelli. Verso la metà del secolo l'Austria e la Repubblica di Venezia, che controllavano le due sponde dell'Adda, decisero altri importanti lavori.

Nell'inverno tra il 1790 e il 1791 nell'antico porto di Como, ora Piazza Cavour, venne collocato un idrometro (idrometro Ferranti), il cui zero si trovava a 3,224 m sotto la soglia del portale maggiore del Duomo di Como (Fantoli, 1921). Con la piena del luglio del 1792 si cominciò quindi ad avere un riferimento fisso per i livelli raggiunti dalle acque, che però va utilizzato tenendo conto del fenomeno della subsidenza del terreno. Seguirono la piena del novembre del 1801, e due piene eccezionali, nel 1810 (3,70 m) e nel 1829 (3,95 m).

Nell'inverno tra il 1829 e il 1830 l'idrometro di Como venne rinnovato, conservando lo zero idrometrico (Fantoli, 1921), e non venne spostato fino al 1868. Le osservazioni però non si possono considerare omogenee, perché nel 1868, quando l'idrometro venne rimosso, lo zero idrometrico si era abbassato di circa 14 cm, a seguito di un cedimento di circa 4 cm e di un altro di circa 10 cm, avvenuti tra il 1830 e il 1835. Dal 1836 al 1868 la quota dello zero non subì variazioni (Fantoli, 1921).

Un altro cambiamento importante alterò l'omogeneità della serie delle letture all'idrometro di Como. Nel 1837 partirono i grandiosi lavori di sistemazione dell'emissario da Lecco fino a Brivio. I lavori, oggetto di approfondita discussione tecnica (Bruschetti, 1838 e 1839; Possenti, 1839), furono terminati solo nel 1842, e modificarono sensibilmente l'alveo dell'Adda. Nelle tabb. I e II sono riportate le altezze al colmo note delle piene avvenute, rispettivamente, prima del 1830 (quando l'idrometro Ferranti venne sostituito da un nuovo idrometro in marmo), e successivamente (Cattaneo, 1844; Lombardini, 1845). Il livello di piena del 1836 può essere reso omogeneo a quelli precedenti diminuendolo di 14 cm, per tenere conto del cedimento dell'idrometro avvenuto tra il 1830 e il 1835 (sostituendo quindi alla misura di 2,92 m il valore di 2,78 m). Anche i livelli al colmo delle piene avvenute a partire dal 1837 possono essere corretti; occorre però tener conto che si riferiscono a una condizione idraulica dell'emissario diversa (a causa dei lavori di sistemazione dell'alveo).

È utile sottolineare sin d'ora che i livelli al colmo misurati a Como tra il 1839 e il 1844 si possono quasi certamente considerare uguali a quelli che sarebbero stati registrati all'idrometro di Lecco città.

Le piene dell'Adda sono state studiate approfonditamente da Lombardini (1845, 1866a, 1866b). Analizzando la piena dell'ottobre 1844, egli

trova che nella condizione precedente i lavori terminati nel 1842 non solo le altezze, ma anche le portate al colmo sarebbero state superiori a quelle osservate, contrariamente all'opinione corrente (Lombardini, 1845). In una memoria successiva (Lombardini, 1866a) egli confronta le altezze misurate a Como in occasione delle piene osservate tra il 1839 e il 1863 con quelle che sarebbero state osservate in assenza dei lavori (tab. III), e riconosce un sensibile abbassamento dei colmi, senza dubbio riconducibile ai lavori compiuti nell'emissario. Rileva anche, nello stesso periodo, un progressivo aumento della frequenza delle piene (Lombardini, 1866a), di cui attribuisce la causa principalmente ai disboscamenti operati, soprattutto dopo il 1825, nella parte montana del bacino.

3 LE OSSERVAZIONI SISTEMATICHE DI PIENA IN REGIME NATURALE (1845-1945)

I livelli giornalieri del lago di Como osservati all'idrometro di Lecco a mezzogiorno (quando è ormai cessata la brezza mattutina e non è ancora iniziata l'opposta brezza meridiana) dal 1845 al 1930 sono riportati in una pubblicazione dell'Ufficio Idrografico del Po (1936). L'idrometro di Lecco venne disposto nel 1836 sulla riva della Maddalena (con zero alla quota di 197,406 m s.l.m.) e rinnovato nel 1846. A seguito di un cedimento di 4 cm, che si assume avvenuto nel 1870, la quota dello zero scese a 197,366 m s.l.m. Nel 1879 l'idrometro venne collocato sulla vicina riva della Malpensata (fig. 1), mantenendo lo zero idrometrico alla quota originaria. Nel giugno 1921, a circa 30 m a monte dell'idrometro, fu collocato un idrometrografo (con lo stesso zero). Nel marzo 1923 l'idrometro venne spostato nuovamente, con una lievissima alterazione dello zero idrometrico (che risultò posto a 197,369 m s.l.m.).

Per gli anni dal 1931 al 1934 non sono disponibili le altezze giornaliere meridiane alla Malpensata, ma solo il massimo meridiano annuo pubblicato negli *Annali Idrologici* della sezione di Milano dell'Ufficio Idrografico del Po (1922-1934). Per gli anni dal 1935 al 1939 invece le altezze giornaliere meridiane alla Malpensata sono pubblicate negli *Annali Idrologici* della sezione di Parma dell'Ufficio Idrografico del Po (1935-1945). Per il 1940 non sono note le altezze giornaliere meridiane alla Malpensata, ma solamente la massima altezza annuale, fornita dal Consorzio dell'Adda.

Nel 1941 l'idrometro venne spostato dalla riva della Malpensata a quella opposta di Malgrate (fig. 1), dove si trova ancora attualmente, mantenendo la quota dello zero idrometrico, che quindi rimase a 197,369 m. Per l'anno 1941 sono disponibili le altezze giornaliere meridiane a Malgrate, pubblicate negli *Annali Idrologici* della sezione di Parma dell'Ufficio Idrografico del Po (1935-1945). Per il periodo che va

dal 1942 al 1945 i soli dati disponibili sono le massime altezze annuali a Malgrate, fornite dal Consorzio dell'Adda.

Un altro idrometro storico è quello del Fortilizio (fig. 1), collocato a Lecco, in sponda sinistra dell'Adda, appena a monte del Ponte Visconteo, circa 1,5 km a valle dell'idrometro della Malpensata. I massimi annuali delle altezze al Fortilizio dal 1845 al 1896 sono riportati in una relazione del 1899 degli ingegneri Alessandro Pestalozza e Carlo Valentini sulla sistemazione del deflusso delle acque del lago di Como (Pestalozza e Valentini, 1899). Le restanti altezze fino al 1920 sono contenute in uno studio del Fantoli sul lago di Como e il suo emissario (Fantoli, 1921), quelle dal 1922 al 1945 negli *Annali Idrologici* (Ufficio Idrografico del Po, sezione di Milano, 1922-1934; sezione di Parma, 1935-1945). Le osservazioni effettuate all'idrometro del Fortilizio, che risentono della chiamata di sbocco, non sono state qui utilizzate. Nella tab. IV si riportano i massimi annuali delle altezze meridiane alla Malpensata dal 1845 al 1940 e a Malgrate dal 1941 al 1945. Per tenere conto del cedimento di 4 cm dell'idrometro della Malpensata avvenuto dopo il 1869, le altezze misurate dal 1845 al 1869 sono state aumentate di 4 cm. In questo modo la serie dei massimi annuali delle altezze meridiane alla Malpensata e a Malgrate può ritenersi omogenea per tutto il periodo 1845-1945. Nella tab. IV si riportano, per completezza, anche le altezze al Fortilizio.

Nel lungo periodo che va dal 1845 al 1945 le piene del lago si verificarono con maggior frequenza e furono le peggiori mai viste: il lago raggiunse livelli prossimi a quelli delle piene maggiori avvenute nel 1673, nel 1810 e nel 1829, nonostante i lavori degli anni 1837-1842.

La piena più grave registrata a tutt'oggi si ebbe il 6 ottobre del 1868, quasi in contemporanea con quella memorabile del Ticino. Quel giorno il livello del lago salì fino a 3,97 m sullo zero della Malpensata e a 3,95 m su quello di Como (circa 11 cm al di sotto del livello del 1829, tenendo conto del cedimento dell'idrometro di Como).

La piena del 13 settembre 1888, seconda per altezza dopo quella del 1868, fu straordinariamente rapida: il lago salì in soli cinque giorni di quasi 3 m, arrivando alla Malpensata a 3,82 m di altezza (19 cm al di sotto del livello del 1868, tenendo conto del cedimento dell'idrometro della Malpensata) (Fantoli, 1921).

4 LE OSSERVAZIONI SISTEMATICHE DI PIENA IN REGIME REGOLATO (1946-2007)

Al fine di evitare i maggiori danni che avrebbero potuto essere provocati dal sovrapporsi di una piena a uno stato di invaso artificiale del lago, la costruzione della diga è stata accompagnata dalla sistemazione dei tratti di alveo in corrispondenza delle rapide di Lecco, Olginate, Lavello e Brivio, volta a permettere un più

rapido deflusso a parità di livello del lago (e quindi un livello più basso, a parità di portata).

Citrini (1978) ha confrontato le piene del lago di Como e dell'Adda nel periodo di regolazione 1946-1976 con quelle che si sarebbero avute senza la diga e senza la sistemazione dell'Adda, rilevando nel periodo di regolazione un abbassamento dei livelli al colmo del lago e un aumento delle portate al colmo dell'emissario. (L'aumento, evidente per portate modeste, si riduce sensibilmente per le portate maggiori.)

Vale la pena di osservare fin d'ora che durante le piene, se il livello al Fortilizio si avvicina al limite superiore (massimo di concessione) di 1,20 m si procede all'apertura totale (che viene registrata) delle paratoie della diga: si ha così il *regime libero*. Da quando è iniziata la regolazione, la maggior parte delle piene è avvenuta in regime libero.

Dal 1946 ad oggi le piene sono state numerose; in particolare si ricordano per la loro entità quelle dell'ottobre 1976, del luglio 1987, dell'ottobre 1993, del giugno-luglio 1997 e l'ultima del novembre-dicembre 2002.

A partire dal 1946 (inizio della regolazione), le misure di portata dell'emissario vengono effettuate alla stazione idrometrografica di Lavello, a valle del lago di Olginate (fig. 1). Per l'idrometro di Lavello, che ha subito due spostamenti, nel 1947 (Pieri, 1958) e nel 1967 (nella fig. 1 è indicata la posizione del periodo 1947-1967) sono noti i massimi annuali delle portate medie giornaliere del periodo 1946-2007, ricavati in parte da pubblicazioni (Pieri, 1958; 1960; 1962; 1963; 1964; 1970) e in parte dall'archivio del Consorzio dell'Adda, quelli delle altezze al colmo e quelli delle altezze medie giornaliere del periodo 1966-2007.

Per l'idrometro di Malgrate sono disponibili i massimi annuali delle altezze alle ore 8 del periodo 1946-2007 e quelli delle altezze al colmo del periodo 1992-2007 (forniti dal Consorzio dell'Adda). Per l'idrometro del Fortilizio (fig. 1), infine, sono disponibili le massime altezze alle ore 8 del periodo 1946-2007.

Nella tab. V è riportato il quadro riassuntivo dei massimi annuali noti delle altezze idrometriche relativi al periodo che va dal 1946 al 2007.

Presso il Consorzio dell'Adda è possibile reperire, per gli ultimi decenni, anche le altezze orarie dei vari idrometri.

5 LE SCALE DELLE PORTATE DELL'ADDA A LECCO IN REGIME NATURALE (1673-1945)

Per l'Adda a Lecco sono disponibili numerose scale delle portate. Ci limitiamo qui a descrivere brevemente quelle utilizzate nelle elaborazioni.

Per quanto riguarda le piene storiche, avvenute prima del 1845, si sono adoperate due scale, che forniscono entrambe la portata in uscita dal lago di Como (assunta costante fino a Paderno d'Adda). Per le piene

avvenute prima del 1837, quando hanno avuto inizio i lavori di sistemazione dell'Adda, si è adottata la scala Lombardini, rappresentata dalla formula (Lombardini, 1845; Fantoli, 1897 e 1921)

$$e = 100y^{1,5}(1 - 0,032y), \quad (1)$$

dove e è la portata (in metri cubi al secondo) e y è l'altezza dell'acqua (in metri) sul fondo dell'emissario (posto 0,5 m al di sotto dello zero dell'idrometro di Como prima del cedimento). Nella tab. VI si riportano i massimi annuali delle portate al colmo a Lecco, ottenuti dalla relazione (1).

Per il periodo 1839-1844, che va dall'inizio dei lavori di sistemazione a quello delle osservazioni sistematiche all'idrometro della Malpensata, si è utilizzata la scala Fantoli, rappresentata dall'espressione (Fantoli, 1921)

$$Q = 100(0,82 + M)^{1,5}, \quad (2)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) ed M è l'altezza idrometrica all'idrometro della Malpensata (in metri). Le altezze alla Malpensata sono state ricavate da quelle all'idrometro di Como. Le portate così calcolate sono riportate nella tab. VII.

La scala Fantoli alla Malpensata è stata utilizzata anche per il calcolo dei massimi annuali delle portate giornaliere a Lecco del periodo 1845-1922 (tab. VIII), partendo dai massimi annuali delle altezze meridiane alla Malpensata. (Le altezze osservate nel periodo 1845-1869 sono state aumentate di 4 cm per renderle omogenee con quelle del periodo successivo.) Occorre notare che le osservazioni effettuate alla Malpensata negli anni dal 1871 al 1874 risultano in alcuni casi errate o comunque incerte. Lo stesso Fantoli nota come la massima altezza meridiana del 1872 non sia rappresentata dai 2,99 m del 16 ottobre (che ritiene eccessivi) ma dai 2,52 m del 24 maggio (Fantoli, 1921). Per l'anno 1874 poi sono lacunosi i mesi di febbraio e marzo e assai dubbie le osservazioni di gennaio e aprile, per cui si è deciso qui di considerare come massima altezza meridiana non il valore di 1,62 m del 13 aprile, ma quello di 1,44 m del 17 agosto.

Per il calcolo dei massimi annuali delle portate meridiane del periodo che va dal 1845 al 1922 la scala Fantoli alla Malpensata è stata preferita alle scale dei deflussi al Fortilizio (che qui non si riportano), sia per l'omogeneità della serie delle osservazioni, sia per il carattere lacuale dell'idrometro, che non risente in alcun modo della chiamata di sbocco, a differenza di quello del Fortilizio, soggetto anche a frequenti cambiamenti di sezione dell'alveo.

Per il periodo che va dal 1923 al 1945 si è adottata la scala delle portate a Malgrate dell'Ufficio idrografico del Po (Citrini, 1978), che è stata ricavata utilizzando misure più recenti di quelle adoperate per la scala

Fantoli. La scala, la cui validità è stata confermata da Citrini (1978), è rappresentata dall'equazione

$$Q = 74,9(h+1)^{1,69}, \quad (3)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) e h l'altezza idrometrica (in metri) a Malgrate (alla Malpensata prima del 1941).

Vale la pena di ricordare che Citrini nello studio citato ha anche determinato con una regressione lineare la relazione tra le altezze a Malgrate h e le altezze al Fortilizio h_F , che si può esprimere nella forma

$$h_F = 0,930h - 0,172, \quad (4)$$

La scala dell'Ufficio Idrografico del Po delle portate naturali a Malgrate è stata utilizzata qui per il calcolo dei massimi annuali delle portate meridiane a Lecco del periodo 1923-1945 (tab. IX).

Occorre notare che i massimi annuali delle altezze meridiane a Malgrate negli anni dal 1940 al 1945 risultano assai incerti, sia per le difficoltà della guerra, sia a causa dei grandi lavori per la regolazione del lago di Como. L'anno 1945 presenta l'anomalia di un'altezza massima meridiana a Malgrate molto vicina a quella del Fortilizio, molto probabilmente perché i lavori per la sistemazione della rapida di Lecco e per il consolidamento del Ponte Visconteo avevano alterato le altezze all'idrometro del Fortilizio. Inoltre c'è da aggiungere che le prove della regolazione iniziarono già nell'autunno del 1944, anche se l'inizio ufficiale della regolazione del lago di Como avvenne a partire dal 1946.

6 LE SCALE DELLE PORTATE DELL'ADDA IN REGIME REGOLATO (1946-2007)

Con l'inizio della regolazione (1946) e la fine dei lavori di sistemazione dell'emissario tra Lecco e Brivio (1950) (Nonnis, 1959) la scala delle portate cambiò sensibilmente, perché la capacità di portata dell'incile subì un notevole aumento.

L'Ufficio Idrografico del Po ha stabilito una scala delle portate a Malgrate in regime libero (ovvero con la diga di Olginate completamente aperta), la cui validità è confermata da Citrini (1978) e la cui espressione è

$$Q = 33,37(h+2,5)^{2,015}, \quad (5)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) e h è l'altezza idrometrica a Malgrate (in metri).

A parità di altezza idrometrica, la portata nel regime attuale è notevolmente superiore a quella del periodo precedente (fig. 2). L'incremento di portata è del 63% (pari a circa 180 m³/s) per un'altezza a Malgrate di 1,20 m, del 44% (pari a circa 210 m³/s) per un'altezza a

Malgrate di 2,00 m e del 33% (più di 250 m³/s) per un'altezza a Malgrate di 3,00 m.

Nel periodo che va dal 1921 al 1945 esisteva una stazione di misura delle portate in sponda destra dell'Adda, qualche centinaio di metri più a valle del Ponte Visconteo. A partire dal 1946 la stazione venne spostata a Lavello, a valle del lago di Olginate. Il Consorzio dell'Adda ha determinato la scala delle portate a Lavello nel 1946 e da allora l'ha rinnovata in occasione di ogni spostamento dell'idrometro e di ogni sensibile variazione della sezione. Delle numerose scale di portata a Lavello (venti in tutto), ricordiamo qui solo quella valida dal 1° ottobre 1991 al 17 settembre 2000, rappresentata dalle equazioni

$$Q = 20,047H^{2,6832} \quad \text{per } H < 2,30 \text{ m} \quad (6)$$

$$Q = 118,451(H - 0,90)^{3,474} \quad \text{per } H \geq 2,30 \text{ m} \quad (7)$$

e quella valida dal 18 settembre 2000 al 2007, rappresentata dalle equazioni:

$$Q = 23,1085H^{2,52748} \quad \text{per } H < 2,40 \text{ m} \quad (8)$$

$$Q = 45,74813(H - 0,09)^{3,82092} \quad \text{per } H \geq 2,40 \text{ m} \quad (9)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) e H è l'altezza idrometrica a Lavello (in metri).

Dai massimi annuali delle altezze medie giornaliere e delle altezze al colmo a Lavello (tab. V) si ricavano, attraverso le scale delle portate a Lavello, i massimi annuali delle portate medie giornaliere e delle portate al colmo a Lavello in regime regolato (tab. X).

7 LE PORTATE A LECCO IN REGIME REGOLATO, SEMIREGOLATO E NATURALE (1946-2007)

Nel corso del tempo, l'esecuzione di diversi lavori nell'alveo del fiume e nel bacino ha certamente modificato, anche se in misura diversa, il regime delle portate dell'Adda a Lecco, e quindi anche quello delle portate di piena. I primi lavori sono quelli di sistemazione dell'alveo, effettuati sia a monte del lago, nel Pian di Spagna (Morselli, 1988), sia, sopra tutto, a valle. I lavori nel tratto iniziale dell'Adda sublacuale furono effettuati a più riprese (i più antichi di cui si ha notizia risalgono al Quattrocento); particolarmente importanti sono quelli degli anni 1837-1842. A partire dal 1920, poi, sono entrati successivamente in funzione numerosi serbatoi stagionali nel bacino prelacuale (tab. XI) (Barbero e Bertoli, 1998), e il volume totale d'invaso è andato via via crescendo (fig. 3), lentamente fino alla metà degli anni Cinquanta del secolo scorso, poi più rapidamente, fino a raggiungere alla fine degli anni Sessanta il valore di 514,9 Mm³ (Pieri, 1973). Nel 1946, infine, è entrata in funzione la diga di Olginate, la cui

costruzione è stata accompagnata dalla sistemazione dell'alveo tra Lecco e Brivio, terminata nel 1950.

La serie dei massimi annuali di portata (di qualsiasi tipo: al colmo, media giornaliera, a ora fissa) dell'Adda a Lecco che comincia nel 1673 non è dunque certamente una serie omogenea.

Al fine di mettere in evidenza l'effetto degli interventi più importanti (presi singolarmente o congiuntamente) sulle piene dell'Adda a Lecco, si sono presi in considerazione per le elaborazioni cinque diversi regimi di piena, definiti in modo convenzionale. Qui ci occupiamo dei primi tre, rinviando a un altro paragrafo l'illustrazione dei rimanenti. Il primo dei tre è il *regime naturale*, senza i serbatoi prelacuali, senza la diga di Olginate e con l'alveo del fiume nelle condizioni immediatamente precedenti l'entrata in funzione della diga. Il secondo è il *regime semiregolato*, con tutti i serbatoi prelacuali attualmente esistenti, senza la diga di Olginate e ancora con l'alveo del fiume nelle condizioni precedenti l'entrata in funzione della diga. Il terzo, infine, è il *regime regolato*, con tutti i serbatoi alpini, con la diga di Olginate e con l'alveo nelle condizioni attuali (sistemato). Le osservazioni disponibili naturalmente possono riferirsi solo al primo o al terzo regime.

I massimi annuali di portata (al colmo e meridiana) a Lecco del periodo 1673-1945 si possono assumere, trascurando l'effetto dei lavori in alveo del 1837-1842 e del modesto volume d'invaso già esistente nel bacino prelacuale nell'ultima parte del periodo, come appartenenti al regime naturale. Ovviamente i massimi annuali di portata (al colmo e media giornaliera) a Lavello del periodo 1946-2007 appartengono al regime regolato.

Per prolungare la serie dei massimi delle portate naturali, per rimediare alla mancanza di osservazioni per il regime semiregolato e per trasferire i massimi di portata osservati da Lavello a Lecco si sono utilizzati, per il periodo 1946-2007, i massimi annuali delle portate medie giornaliere dell'Adda a Lecco nei tre regimi, ricostruite applicando l'equazione di continuità. (Si possono ricostruire soltanto le portate medie giornaliere, perché le osservazioni di livello hanno appunto una frequenza giornaliera.)

La ricostruzione dei massimi annuali delle portate medie giornaliere a Lecco nei tre regimi era già stata effettuata, per il periodo 1959-2000, da Malusardi e Moisello (2003). Le tre serie sono state quindi integrate, prendendo in considerazione i periodi 1946-1958 e 2001-2007, e seguendo, per quanto possibile, la stessa procedura, che consiste, per il calcolo delle portate naturali a Lecco, nei seguenti punti:

- calcolo delle portate in ingresso al lago di Garlate, a partire da quelle rilasciate alla diga di Olginate e dalle variazioni di livello del lago, tenendo conto degli afflussi meteorici e delle perdite per evaporazione;

- calcolo delle portate in ingresso al lago di Como, a partire da quelle in ingresso al lago di Garlate e dalle variazioni di livello del lago di Como, tenendo conto degli afflussi meteorici e delle perdite per evaporazione;
- calcolo delle portate naturali in ingresso ai serbatoi (riuniti insieme a formare due grandi serbatoi virtuali distinti, a seconda del tempo impiegato dall'acqua per raggiungere il lago), a partire dalle portate in ingresso al lago e dalle informazioni sulla gestione dei serbatoi;
- calcolo delle portate naturali in ingresso al lago a partire da quelle in ingresso ai serbatoi, tenendo conto del tempo impiegato dall'acqua per raggiungere il lago;
- calcolo della portata naturale a Lecco, a partire da quelle in ingresso al lago, utilizzando la scala delle portate naturali a Malgrate e tenendo conto sia degli afflussi meteorici sia delle perdite per evaporazione.

La procedura per il calcolo delle portate semiregolate ovviamente salta il terzo e il quarto punto.

Rimandando per i particolari dell'intero calcolo alla pubblicazione di Malusardi e Moisello (2003), ci limitiamo qui a ricordare solo due dei problemi che gli autori hanno dovuto risolvere. Il primo è quello dell'evaporazione, per cui in mancanza di dati locali è stato fatto ricorso a quelli relativi al lago maggiore (Barbanti e Ambrosetti, 1986). Il secondo è quello della mancanza di dati giornalieri relativi agli invasi: per il periodo che va dall'ottobre 1958 al dicembre 1967 sono note soltanto le variazioni settimanali (positive e negative) dei volumi d'acqua invasati nell'insieme dei serbatoi e per il periodo che va dal gennaio 1968 al dicembre 1974 quelle dei volumi d'acqua invasati in ogni singolo serbatoio; occorre quindi determinare in qualche modo le variazioni giornaliere. Il problema è stato risolto distribuendo le variazioni settimanali positive sui sette giorni della settimana, proporzionalmente a un indice di precipitazione giornaliera, calcolato come media delle altezze di precipitazione osservate in tre stazioni pluviometriche (Bormio, Sondrio e Truzzo), e distribuendo invece quelle negative uniformemente nei soli cinque giorni lavorativi (così da tener conto, sia pure grossolanamente, della diversa richiesta di energia).

I dati già ricostruiti da Malusardi e Moisello (2003) non comprendevano quelli del primo periodo della regolazione (1946-1958), a causa della mancanza di informazioni sulla gestione dei serbatoi, e quindi dell'impossibilità di ricostruire gli afflussi naturali al lago. In quel periodo però l'influenza dei serbatoi alpini sui deflussi, pur esistendo, non poteva essere forte. Si è così deciso di trascurarla, e di considerare gli afflussi al lago come accettabili approssimazioni di quelli naturali. A partire dal 1946, e fino al 1958, si sono dunque approssimate le portate naturali a Lecco con quelle semiregolate, la cui ricostruzione naturalmente non ha presentato problemi.

Poiché nel frattempo erano divenute disponibili le osservazioni degli anni 2001-2007, i risultati di Malusardi e Moisello sono stati integrati ricostruendo anche le portate di quel periodo.

Il metodo di calcolo adottato è praticamente uguale a quello di Malusardi e Moisello (2003), con differenze molto piccole, imposte dalla particolare disponibilità di osservazioni. Ci limitiamo a citare qualche esempio. Per il periodo 1946-1950 manca qualsiasi osservazione di precipitazione nelle vicinanze del lago di Garlate; nell'applicare l'equazione di continuità non si sono quindi considerati né l'afflusso meteorico al lago né l'evaporazione. L'altezza del lago di Como a Malgrate in condizioni naturali al 1° gennaio 1946 non è nota, perché il regime naturale era già stato alterato dall'inizio dei lavori (Pieri, 1958); è stata quindi assunta pari all'altezza idrometrica (12,7 cm) corrispondente alla portata di 60 m³/s, mantenutasi costante dal 30 novembre al 19 dicembre 1945. Per il periodo 2001-2007 sono disponibili le variazioni giornaliere dell'invaso per i serbatoi di Truzzo e Spluga, e quelle settimanali per tutti gli altri serbatoi, ma non le portate del canale Spöl, che trasferisce acqua dalla valle di Livigno al bacino dell'Adda; si sono quindi assunte le portate giornaliere del canale uguali alla media delle portate giornaliere nello stesso mese osservata nel periodo 1966-2000. E così via, per diversi altri problemi.

I massimi di portata relativi ai tre periodi 1946-1958, 1959-2000 e 2001-2007 sono riportati, rispettivamente, nella tab. XII, nella tab. XIII e nella tab. XIV.

8 LE PORTATE DELL'ADDA A LECCO IN REGIME LIBERO (1946-2007)

L'insieme delle portate medie giornaliere a Lecco degli anni che vanno dal 1946 al 2007, in regime naturale, regolato e semiregolato, può essere completato con le portate relative ad altri due regimi: il *regime libero con afflussi naturali*, in cui

- l'alveo considerato è quello attuale (dopo la costruzione della diga e la sistemazione dell'alveo),
- il regime è libero (lo sbarramento di Olginate è sempre aperto),
- gli afflussi al lago di Como non sono regolati dai serbatoi alpini prelacuali,

e il *regime libero con afflussi regolati*, in cui

- l'alveo considerato è quello attuale (dopo la costruzione della diga e la sistemazione dell'alveo),
- il regime è libero (lo sbarramento di Olginate è sempre aperto),
- gli afflussi al lago di Como sono regolati dai serbatoi alpini prelacuali.

I massimi annuali delle portate medie giornaliere ricavati dalle serie ricostruite sono stati utilizzati per mettere in evidenza gli effetti esercitati sulle portate di piena dalla sistemazione dell'alveo, dalla regolazione

del lago di Como e dalla presenza dei serbatoi stagionali, singolarmente e congiuntamente.

Anche per il calcolo delle portate medie giornaliere in regime libero con afflussi naturali e regolati, come per quelle in regime naturale e in regime semiregolato, si è utilizzata per l'intero periodo 1946-2007 una sola scala delle portate.

Le scale delle portate in regime libero sono di difficile determinazione, poiché necessitano di un numero sufficiente di misure, che si possono effettuare solo quando lo sbarramento di Olginate è completamente aperto, e quindi solo nel caso di una piena con superamento del limite superiore per la trattenuta attiva (1,20 m all'idrometro del Fortilizio), oppure in occasione di prove in condizione di regime libero. Raramente si è arrivati a poter effettuare misure di portata per livelli più bassi del limite inferiore per la trattenuta attiva (-0,50 m all'idrometro del Fortilizio), e solo in caso di magre eccezionali.

La scala delle portate in regime libero, tuttavia, deve essere determinata per tutte le altezze idrometriche a Malgrate, comprese le altezze che non raggiungono il limite inferiore per la trattenuta attiva. Perciò occorre utilizzare, oltre le misure di portata effettuate per le altezze maggiori (durante le piene), anche altre misure, effettuate nel campo delle altezze minori. La scala delle portate utilizzata qui, fornita dal Consorzio dell'Adda, è stata ottenuta interpolando le misure di portata effettuate durante la piena dell'ottobre 1993 e alcune misure di magra in regime libero effettuate dal 1980 al 1983. La scala è valida a partire dall'altezza idrometrica di -0,80 m a Malgrate ed è rappresentata dall'equazione

$$Q = 0,1378(H + 180)^{4,325}, \quad (10)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) e h è l'altezza idrometrica a Malgrate (in centimetri).

Poiché nel calcolo delle portate medie giornaliere a Lecco in regime libero con afflussi naturali e regolati si sono dovute considerare altezze idrometriche al di sotto del limite inferiore (-0,80 m a Malgrate), si è estesa la scala fino all'altezza idrometrica a Malgrate per la quale la portata a Lecco si annulla, che è quella della soglia della diga (-2,37 m). La parte di scala delle portate da -2,37 m a -0,80 m a Malgrate è stata rappresentata con la curva parabolica di equazione

$$Q = 0,0041529h^2 + 1,9685h + 233,27, \quad (11)$$

dove Q è la portata (in metri cubi al secondo) e h è l'altezza idrometrica a Malgrate (in centimetri).

Le equazioni (10) e (11) hanno come punto d'incontro (e quindi come limite di validità, rispettivamente inferiore e superiore) l'altezza idrometrica di -69,4 cm a Malgrate.

9 LA RICOSTRUZIONE DELLE PORTATE A LECCO IN REGIME LIBERO CON AFFLUSSI AL LAGO NATURALI E REGOLATI (1946-2007)

Per ricostruire le portate medie giornaliere in regime libero con afflussi naturali e regolati relative al periodo 1946-2007 si è utilizzato lo stesso procedimento utilizzato per il regime naturale e per quello semiregolato, semplicemente sostituendo la scala delle portate naturali a Malgrate con quella delle portate in regime libero. Poiché i lavori di sistemazione dell'alveo hanno ampliato notevolmente la capacità di deflusso dell'emissario, all'altezza idrometrica iniziale a Malgrate del 1° gennaio 1946, che è la stessa utilizzata per ricostruire le portate medie giornaliere in regime naturale, corrisponde nel regime libero una portata di ben 211 m³/s, molto superiore a quella di 60 m³/s del regime naturale.

Le portate ricostruite nei due regimi liberi possono essere affette da errore, perché nell'esecuzione dei calcoli si sono raggiunte altezze idrometriche a Malgrate anche molto inferiori al limite di validità (-0,80 m a Malgrate) della scala ricavata sperimentalmente e quindi ricadenti nel campo in cui la scala è stata estrapolata con la curva parabolica (11).

Dalle serie delle portate medie giornaliere ricostruite, sia per il regime libero con afflussi naturali, sia per quello con afflussi regolati, si sono infine estratti i massimi annuali e le corrispondenti altezze idrometriche a Malgrate (tab. XV).

Il confronto delle altezze in regime libero con afflussi naturali e con afflussi regolati con quelle, rispettivamente, in regime naturale e in regime semiregolato, che sono molto superiori, mette in evidenza l'effetto dell'aumentata capacità di deflusso dell'Adda resa possibile dalla sistemazione dell'alveo.

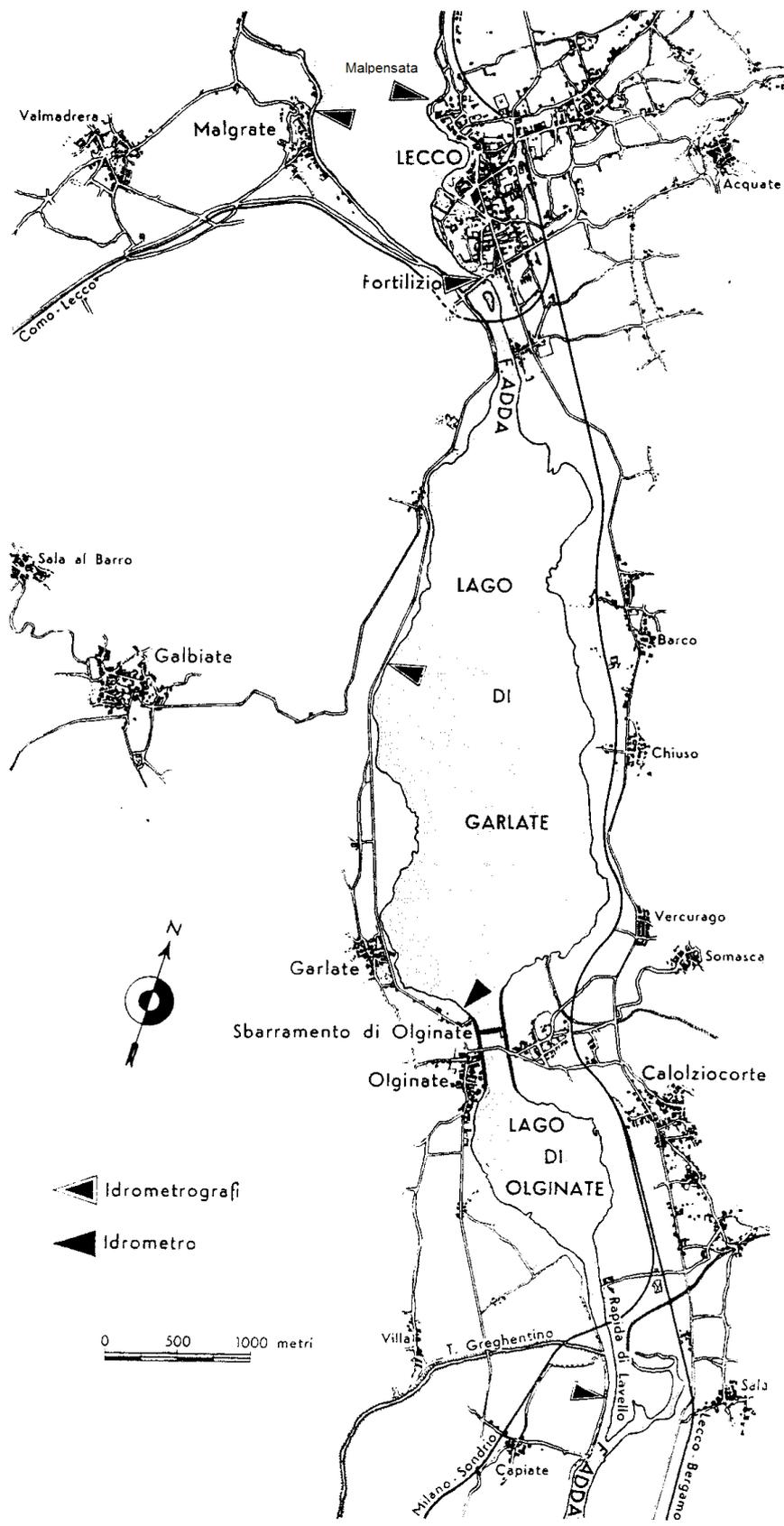


Fig. 1 Carta delle stazioni idrometriche (Pieri, 1960, con modifiche)

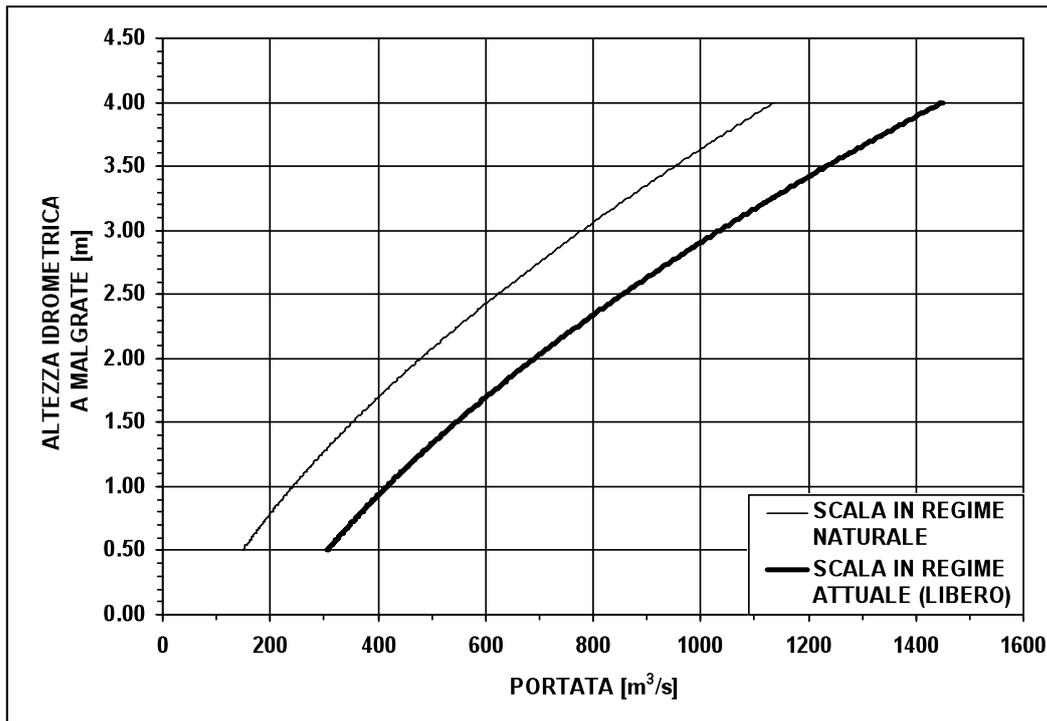


Fig. 2 Scale dell'Ufficio Idrografico del Po delle portate in regime naturale e attuale (libero) a Malgrate

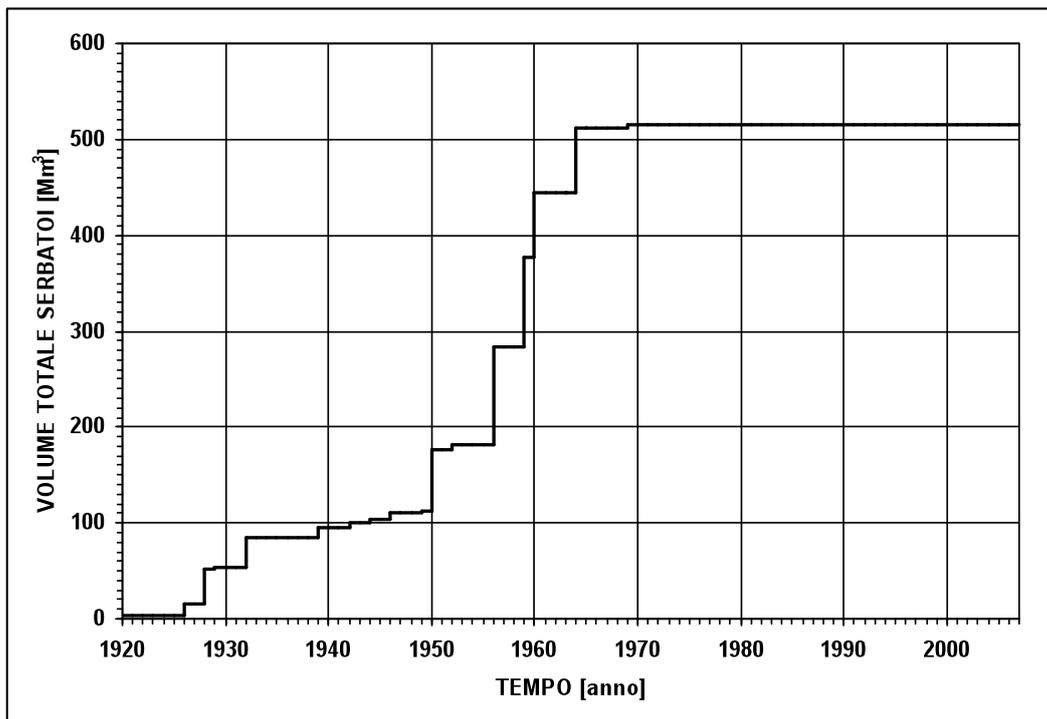


Fig. 3 Crescita del volume totale dei serbatoi alpini stagionali nel bacino dell'Adda prelacuale

TABELLE

Tab. I Altezze al colmo delle piene misurate all'idrometro Ferranti di Como

Anno	Giorno	<i>h</i> colmo a Como [once]	<i>h</i> colmo a Como [m]
1792	6 luglio	66,6	3,297
1801	22 novembre	64,0	3,173
1807	2 dicembre	61,6	3,049
1809	10 giugno	55,9	2,765
1810	28-29 maggio	74,7	3,700
1812	22 ottobre	57,9	2,863
1816	2 agosto	65,0	3,223
1821	14 agosto	61,5	3,045
1823	18 ottobre	68,5	3,393
1826	25 luglio	61,7	3,048
1829	21 settembre	79,7	3,950

Tab. II Altezze al colmo delle piene misurate al nuovo idrometro in marmo di Como

Anno	Giorno	<i>h</i> colmo a Como [m]
1836	13 ottobre	2,920
1839	13 novembre	2,430
1840	8 novembre	2,780
1841	31 ottobre	2,520
1843	22 luglio	2,310
1844	26 ottobre	2,870

Tab. III Confronto tra le altezze al colmo all'idrometro di Como, osservate e osservabili in assenza dei lavori (Lombardini, 1866a)

Anno	Giorno	<i>h</i> altezza osservata [m]	<i>h</i> altezza in assenza dei lavori [m]
1839	13 novembre	2,430	2,890
1840	8 novembre	2,780	3,200
1841	31 ottobre	2,520	3,150
1843	22 luglio	2,310	2,956
1844	26 ottobre	2,870	3,486
1845	24 giugno	2,345	2,975
1846	20 maggio	2,400	3,030
1849	18 giugno	2,360	3,000
1851	28 luglio	2,330	2,970
1851	5 ottobre	2,940	3,444
1853	18 luglio	2,380	3,010
1855	18 giugno	3,560	4,110
1856	2 giugno	2,520	3,120
1860	3 ottobre	2,520	3,120
1862	8 settembre	2,670	3,240
1863	13 giugno	2,650	3,220

Tab. IV Massimi annuali delle altezze meridiane alla Malpensata/Malgrate e al Fortilizio dal 1845 al 1945

Anno	Giorno	Altezza massima <i>h</i> alle ore 12 alla Malpensata/a Malgrate [m]		Altezza massima <i>h</i> alle ore 12 al Fortilizio [m]
			+ 4 cm	
1845	24/6	2,36	2,40	2,12
1846	20/5	2,40	2,44	2,22
1847	31/5	1,90	1,94	1,76
1848	10/6	2,25	2,29	2,16
1849	18/6	2,32	2,36	2,12
1850	26/8	1,97	2,01	1,82
1851	5/10	2,97	3,01	2,67
1852	14/8	2,05	2,09	1,85
1853	17/7	2,38	2,42	2,13
1854	10/7	2,06	2,10	1,85
1855	18/6	3,54	3,58	3,36

Anno	Giorno	Altezza massima h alle ore 12 alla Malpensata/a Malgrate [m]		Altezza massima h alle ore 12 al Fortilizio [m]
			+ 4 cm	
1856	7/6	2,53	2,57	2,26
1857	27/10	1,50	1,54	1,33
1858	31/7	1,20	1,24	1,03
1859	12/6	1,56	1,60	1,34
1860	3/10	2,50	2,54	2,24
1861	9/7	2,01	2,05	1,75
1862	8/9	2,70	2,74	2,48
1863	13/6	2,65	2,69	2,34
1864	28/10	1,83	1,87	1,57
1865	4/8	1,75	1,79	1,49
1866	7/7	2,05	2,09	1,76
1867	6/6-22/9	1,37	1,41	1,18
1868	6/10	3,97	4,01	3,67
1869	1/6	1,86	1,90	1,59
1870	11/8	0,86		0,65
1871	21/6	1,89		1,36
1872	24/5	2,52		2,10
1873	7/7	1,86		1,93
1874	17/8	1,44		1,19
1875	25/6	2,03		1,71
1876	12/6	2,09		1,75
1877	18/7	2,47		2,12
1878	30/11	1,80		1,50
1879	3/7	2,67		2,29
1880	17/9	1,56		1,26
1881	29/6	1,11		0,86
1882	21/9	2,87		2,47
1883	23/7	1,94		1,60
1884	9/6	1,17		0,91
1885	29/9	2,85		2,46
1886	13/11	1,95		1,63
1887	18/6	1,67		1,36
1888	13/9	3,82		3,40
1889	1/11	2,55		2,15
1890	14/7	2,44		2,06
1891	24/8	2,11		1,78
1892	16/10	2,31		1,98
1893	8/10	1,52		1,22

Anno	Giorno	Altezza massima h alle ore 12 alla Malpensata/a Malgrate [m]		Altezza massima h alle ore 12 al Fortilizio [m]
			+ 4 cm	
1894	17/7	1,28		1,01
1895	9/6	1,29		1,01
1896	25/10	2,66		2,29
1897	21/9	2,00		1,67
1898	29/6	2,47		2,12
1899	4/7	1,18		0,93
1900	28/8	2,23		1,87
1901	17/6	3,16		2,76
1902	16/6	1,59		1,29
1903	7/7	1,64		1,35
1904	12/6	1,81		1,50
1905	30/8	2,00		1,67
1906	10/11	1,79		1,47
1907	19/10	2,15		1,80
1908	21/7	1,60		1,36
1909	11/7	1,10		0,88
1910	28/6	1,94		1,64
1911	10/10	2,11		1,75
1912	8/8	2,12		1,80
1913	7/6	1,58		1,32
1914	2/11	1,53		1,25
1915	1/6	1,86		1,55
1916	5/6	1,94		1,61
1917	1/6	2,86		2,46
1918	19/6	1,58		1,24
1919	10/7	1,30		1,02
1920	25/9	2,93		2,53
1921	30/5	1,08		
1922	13/9	1,36		1,16
1923	29/10	2,15		1,85
1924	28/5	1,58		1,29
1925	14/6	1,61		1,34
1926	23/11	2,89		2,54
1927	27/9	2,05		1,75
1928	3/11	3,14		2,73
1929	15/6	1,28		1,01
1930	29/6	1,66		1,38
1931		1,60		1,31

Anno	Giorno	Altezza massima h alle ore 12 alla Malpensata/a Malgrate [m]		Altezza massima h alle ore 12 al Fortilizio [m]
			+ 4 cm	
1932		1,73		1,44
1933		1,65		1,35
1934		1,80		1,49
1935	8/10	2,32		1,93
1936	12/7	2,55		2,16
1937	22/9	2,16		1,84
1938	14/6	1,70		1,40
1939	7/8	2,46		2,11
1940		1,86		1,52
1941	14/6	2,24		1,90
1942	29/9	1,72		1,50
1943	30/9	1,22		1,00
1944	15/11	1,49		1,25
1945		1,34		1,27

Tab. V Massimi annuali delle altezze idrometriche alle stazioni di Malgrate, del Fortilizio e di Lavello dal 1946 al 2007

Anno	Malgrate		Fortilizio	Lavello	
	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza massima h al colmo [m]	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza media giorn. massima h [m]	Altezza massima h al colmo [m]
1946	1,99		1,44		
1947	1,41		1,24		
1948	2,05		1,58		
1949	1,36		1,26		
1950	1,43		1,26		
1951	2,085		1,84		
1952	1,67		1,45		
1953	2,03		1,78		
1954	1,53		1,39		
1955	1,555		1,44		
1956	1,78		1,48		
1957	2,00		1,68		

Anno	Malgrate		Fortilizio	Lavello	
	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza massima h al colmo [m]	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza media giorn. massima h [m]	Altezza massima h al colmo [m]
1958	1,59		1,46		
1959	1,39		1,32		
1960	2,41		2,14		
1961	1,585		1,42		
1962	1,36		1,265		
1963	2,32		2,04		
1964	1,425		1,31		
1965	2,165		1,87		
1966	1,70		1,47	4,238	4,26
1967	1,46		1,40	3,605	3,855
1968	1,81		1,635	4,243	4,335
1969	1,57		1,45	3,67	3,68
1970	1,355		1,28	3,022	3,06
1971	1,46		1,36	3,47	3,51
1972	1,48		1,36	3,64	3,67
1973	1,68		1,41	4,097	4,12
1974	1,21		1,14	3,233	3,39
1975	1,31		1,14	3,707	3,78
1976	2,595		2,29	5,161	5,18
1977	1,925		1,655	4,383	4,405
1978	1,445		1,18	3,896	3,905
1979	2,615		2,29	5,088	5,12
1980	1,975		1,69	4,411	4,46
1981	1,725		1,47	4,185	4,21
1982	1,405		1,16	3,818	3,86
1983	2,10		1,80	4,594	4,605
1984	1,175		1,095	3,495	3,60
1985	1,22		1,045	3,732	3,78
1986	1,375		1,11	3,87	3,90
1987	2,64		2,29	5,196	5,22
1988	1,40		1,145	3,896	3,90
1989	1,175		1,125	3,222	3,32
1990	1,34		1,19	3,895	3,91
1991	1,38		1,14	3,931	3,95
1992	1,17	1,18	1,02	3,695	3,815
1993	2,64	2,645	2,325	5,208	5,22

Anno	Malgrate		Fortilizio	Lavello	
	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza massima h al colmo [m]	Altezza massima h alle ore 8 [m]	Altezza media giorn. massima h [m]	Altezza massima h al colmo [m]
1994	1,16	1,175	0,97	3,692	3,695
1995	1,14	1,17	0,98	3,363	3,415
1996	1,31	1,325	1,06	3,899	3,905
1997	2,335	2,905	2,055	4,895	4,91
1998	1,06	1,065	0,87	3,537	3,575
1999	1,425	1,445	1,19	3,922	3,95
2000	2,09	2,105	1,83	4,671	4,685
2001	1,495	1,50	1,215	3,935	3,94
2002	2,615	2,634	2,31	5,16	5,178
2003	0,685	0,694	0,645	2,483	2,488
2004	0,925	0,941	0,69	3,451	3,456
2005	0,50	0,509	0,45	2,274	2,281
2006	0,79	0,798	0,775	2,303	2,311
2007	1,06	1,064	0,96	3,186	3,193

Tab. VI Portate al colmo a Lecco (degli anni precedenti il 1837) calcolate con la scala Lombardini

Anno	Altezza al colmo h a Como [m]	Portata al colmo Q a Lecco [m ³ /s]
1673	3,56	712
1792	3,30	651
1801	3,17	621
1807	3,05	593
1809	2,77	529
1810	3,70	745
1812	2,86	550
1816	3,22	632
1821	3,05	593
1823	3,39	672
1826	3,05	593
1829	3,95	805
1836	2,78	532

Tab. VII Massimi annuali delle portate al colmo a Lecco del periodo 1839-1844 calcolate con la scala Fantoli alla Malpensata

Anno	Altezza al colmo h a Como/alla Malpensata + 4 cm [m]	Portata al colmo Q a Lecco [m ³ /s]
1839	2,47	597
1840	2,82	694
1841	2,56	621
1843	2,35	564
1844	2,91	720

Tab. VIII Massimi annuali delle portate meridiane a Lecco del periodo 1845-1922 secondo la scala Fantoli

Anno	ore 12	
	Altezza massima h alla Malpensata [m]	Portata massima Q a Lecco [m ³ /s]
1845	2,40	578
1846	2,44	589
1847	1,94	459
1848	2,29	548
1849	2,36	567
1850	2,01	476
1851	3,01	750
1852	2,09	496
1853	2,42	583
1854	2,10	499
1855	3,58	923
1856	2,57	624
1857	1,54	363
1858	1,24	296
1859	1,60	376

Anno	ore 12	
	Altezza massima h alla Malpensata [m]	Portata massima Q a Lecco [m ³ /s]
1860	2,54	616
1861	2,05	486
1862	2,74	672
1863	2,69	658
1864	1,87	441
1865	1,79	422
1866	2,09	496
1867	1,41	333
1868	4,01	1062
1869	1,90	449
1870	0,86	218
1871	1,89	446
1872	2,52	610
1873	1,86	439
1874	1,44	340
1875	2,03	481
1876	2,09	496
1877	2,47	597
1878	1,80	424
1879	2,67	652
1880	1,56	367
1881	1,11	268
1882	2,87	709
1883	1,94	459
1884	1,17	281
1885	2,85	703
1886	1,95	461
1887	1,67	393
1888	3,82	999
1889	2,55	619
1890	2,44	589
1891	2,11	502
1892	2,31	554
1893	1,52	358
1894	1,28	304
1895	1,29	306
1896	2,66	649

Anno	ore 12	
	Altezza massima h alla Malpensata [m]	Portata massima Q a Lecco [m ³ /s]
1897	2,00	474
1898	2,47	597
1899	1,18	283
1900	2,23	533
1901	3,16	794
1902	1,59	374
1903	1,64	386
1904	1,81	427
1905	2,00	474
1906	1,79	422
1907	2,15	512
1908	1,60	376
1909	1,10	266
1910	1,94	459
1911	2,11	502
1912	2,12	504
1913	1,58	372
1914	1,53	360
1915	1,86	439
1916	1,94	459
1917	2,86	706
1918	1,58	372
1919	1,30	309
1920	2,93	726
1921	1,08	262
1922	1,36	322

Tab. IX **Massimi annuali delle portate meridiane a Lecco dal 1923 al 1945 secondo la scala dell'Ufficio Idrografico del Po**

Anno	Altezza massima h alle ore 12 alla Malpensata/a Malgrate [m]	Portata massima Q alle ore 12 a Lecco [m^3/s]
1923	2,15	521
1924	1,58	372
1925	1,61	379
1926	2,89	744
1927	2,05	493
1928	3,14	826
1929	1,28	302
1930	1,66	391
1931	1,60	377
1932	1,73	409
1933	1,65	389
1934	1,80	427
1935	2,32	569
1936	2,55	637
1937	2,16	524
1938	1,70	401
1939	2,46	610
1940	1,86	442
1941	2,24	546
1942	1,72	406
1943	1,22	288
1944	1,49	350
1945	1,34	315

Tab. X **Massimi annuali delle portate medie giornaliere e al colmo a Lavello in regime regolato del periodo 1946-2007**

Anno	Portata media giornaliera q [m ³ /s]	Portata al colmo Q [m ³ /s]
1946	549	
1947	428	
1948	567	
1949	273	
1950	467	
1951	617	
1952	496	
1953	598	
1954	490	
1955	405	
1956	530	
1957	577	
1958	459	
1959	326	
1960	675	
1961	503	
1962	360	
1963	644	
1964	364	
1965	723	
1966	603	608,5
1967	440	501
1968	604	629
1969	456	458,2
1970	313	321,1
1971	409	418,3
1972	449	455,8
1973	564	570
1974	359	390,9
1975	465	482,6
1976	895	901,2
1977	643	649
1978	511	514
1979	868	880,8
1980	651	664,9
1981	588	594,7
1982	492	502,5

Anno	Portata media giornaliera q [m ³ /s]	Portata al colmo Q [m ³ /s]
1983	736,7	740
1984	442,3	468,3
1985	502,6	514
1986	537,2	545,1
1987	917,7	925,1
1988	525,4	526,2
1989	377,3	398
1990	508,9	528,5
1991	527,8	532,2
1992	473,1	500,7
1993	847,4	850,7
1994	472,4	473,1
1995	398,9	410,4
1996	520,2	521,7
1997	765,7	769,5
1998	437,5	446
1999	525,5	532,2
2000	731,1	735,1
2001	531,3	532,7
2002	879,3	884,8
2003	224	224,9
2004	415,9	417,1
2005	184,3	185,8
2006	190,3	192
2007	358,1	359,7

Tab. XI Capacità utile dei serbatoi stagionali del bacino dell'Adda prelacuale

Serbatoio	Capacità utile [Mm ³]
S. Giacomo	64,0
Cancano II	124,0
Lago Bianco (Svizzera)	18,0
Lago di Poschiavo (Svizzera)	15,8
Frera	50,0
L. di Mezzo	0,5
L. di S. Stefano	0,6
L. Scais	9,0
L. Venina	11,2
L. Publino	5,1
L. Pirola	1,9
L. Palù	1,8
Alpe Gera	68,1
Campo Moro	10,6
L. Inferno	4,0
Pescegallo	1,1
Trona	5,2
Spluga	32,1
Truzzo	21,3
Alpe Albigna (Svizzera)	70,6
Totale	514,9

Tab. XII Massimi annuali delle portate medie giornaliere a Lecco in regime regolato e semiregolato/naturale per il periodo 1946-1958 e delle corrispondenti altezze a Malgrate in regime semiregolato/naturale

Anno	Regime regolato	Regime semiregolato/naturale	
	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]
1946	553	2,21	541
1947	423	1,27	303
1948	568	1,91	457
1949	275	0,94	231
1950	462	1,48	348

Anno	Regime regolato	Regime semiregolato/naturale	
	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]
1951	622	2,55	634
1952	492	1,50	352
1953	588	2,20	537
1954	485	1,60	379
1955	392	1,42	335
1956	529	1,74	412
1957	581	2,14	518
1958	453	1,37	323

Tab. XIII Massimi annuali delle portate medie giornaliere a Lecco in regime regolato, semiregolato e naturale per il periodo 1959-2000 e delle corrispondenti altezze a Malgrate in regime semiregolato e naturale (Malusardi e Moisello, 2003)

Anno	Regime regolato	Regime semiregolato		Regime naturale	
	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]
1959	317	1,02	247	1,28	305
1960	672	2,59	646	2,68	669
1961	490	1,71	406	2,08	501
1962	352	1,10	263	1,45	342
1963	645	2,12	512	2,18	532
1964	361	1,16	273	1,51	354
1965	719	2,42	595	2,55	636
1966	602	1,92	459	1,92	461
1967	418	1,13	269	1,44	340
1968	591	1,65	391	1,74	412
1969	451	1,31	311	1,64	388
1970	312	1,07	256	1,58	373
1971	407	1,38	325	1,63	385
1972	446	1,55	366	1,84	436
1973	568	1,80	426	2,16	524

Anno	Regime regolato	Regime semiregolato		Regime naturale	
	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]
1974	340	1,04	250	1,36	319
1975	462	1,43	338	1,73	411
1976	893	3,12	791	3,32	848
1977	646	2,60	647	2,64	659
1978	511	1,67	394	1,88	448
1979	874	2,84	716	2,86	719
1980	644	1,85	440	2,08	500
1981	595	2,06	494	2,11	511
1982	491	1,69	401	1,77	418
1983	736	2,88	725	3,08	782
1984	440	1,61	379	1,73	410
1985	503	1,73	410	1,99	476
1986	538	2,18	532	2,43	599
1987	922	3,08	781	3,41	876
1988	525	1,72	406	1,85	439
1989	362	1,29	306	1,38	323
1990	508	1,25	297	1,46	343
1991	528	1,81	431	1,98	475
1992	468	1,46	344	1,58	373
1993	847	3,37	865	3,43	882
1994	471	1,73	410	1,80	428
1995	393	1,00	243	1,19	280
1996	521	1,91	459	1,95	467
1997	770	2,99	757	3,29	841
1998	431	1,61	382	1,89	451
1999	532	2,05	494	2,17	526
2000	731	2,95	746	2,91	733

Tab. XIV Massimi annuali delle portate medie giornaliere a Lecco in regime regolato, semiregolato e naturale per il periodo 2001-2007 e delle corrispondenti altezze a Malgrate in regime semiregolato e naturale

Anno	Regime regolato	Regime semiregolato		Regime naturale	
	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	Altezza media giornaliera massima h [m]	Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]
2001	531	2,26	553	2,55	634
2002	881	3,35	858	3,34	857
2003	220	0,86	214	1,11	265
2004	416	1,40	330	1,66	391
2005	181	0,42	134	0,54	155
2006	188	0,64	172	0,72	185
2007	358	1,08	258	1,20	284

Tab. XV Confronto tra i massimi annuali delle altezze medie giornaliere a Malgrate in regime naturale, semiregolato, libero con afflussi naturali e libero con afflussi regolati e confronto tra i massimi annuali delle portate medie giornaliere in regime libero con afflussi naturali e libero con afflussi regolati (1946-2007)

Anno	Altezza media giornaliera massima h a Malgrate [m]				Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	
	Regime naturale*	Regime semiregolato	Regime libero		Regime libero	
			Afflussi naturali	Afflussi regolati	Afflussi naturali	Afflussi regolati
1946	2,21	2,21		1,35		522
1947	1,27	1,27		0,31		294
1948	1,91	1,91		0,98		436
1949	0,94	0,94		-0,05		226
1950	1,48	1,48		0,53		339
1951	2,55	2,55		1,74		618
1952	1,50	1,50		0,55		344
1953	2,20	2,20		1,33		517
1954	1,60	1,60		0,70		375
1955	1,42	1,42		0,45		322
1956	1,74	1,74		0,78		393

Anno	Altezza media giornaliera massima h a Malgrate [m]				Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	
	Regime naturale*	Regime semiregolato	Regime libero		Regime libero	
			Afflussi naturali	Afflussi regolati	Afflussi naturali	Afflussi regolati
1957	2,14	2,14		1,24		497
1958	1,37	1,37		0,42		316
1959	1,28	1,02	0,32	0,05	297	244
1960	2,68	2,59	1,81	1,71	634	610
1961	2,08	1,71	1,20	0,80	486	397
1962	1,45	1,10	0,50	0,14	332	261
1963	2,18	2,12	1,23	1,16	494	478
1964	1,51	1,16	0,55	0,18	344	269
1965	2,55	2,42	1,73	1,57	614	575
1966	1,92	1,92	1,01	1,01	444	443
1967	1,44	1,13	0,50	0,17	332	266
1968	1,74	1,65	0,78	0,69	393	373
1969	1,64	1,31	0,69	0,35	373	302
1970	1,58	1,07	0,65	0,11	364	254
1971	1,63	1,38	0,71	0,45	377	322
1972	1,84	1,55	0,91	0,61	422	356
1973	2,16	1,80	1,23	0,84	493	406
1974	1,36	1,04	0,39	0,05	310	245
1975	1,73	1,43	0,83	0,51	403	334
1976	3,32	3,12	2,48	2,27	810	753
1977	2,64	2,60	1,82	1,77	637	626
1978	1,88	1,67	0,98	0,75	437	386
1979	2,86	2,84	1,94	1,93	668	666
1980	2,08	1,85	1,17	0,91	479	421
1981	2,11	2,06	1,17	1,11	481	467
1982	1,77	1,69	0,82	0,73	401	382
1983	3,08	2,88	2,28	2,06	757	698
1984	1,73	1,61	0,84	0,68	405	372
1985	1,99	1,73	1,11	0,82	467	402
1986	2,43	2,18	1,64	1,36	593	526
1987	3,41	3,08	2,57	2,23	834	743
1988	1,85	1,72	0,87	0,74	412	384
1989	1,38	1,29	0,45	0,33	322	298
1990	1,46	1,25	0,48	0,27	329	287
1991	1,98	1,81	1,03	0,83	447	404
1992	1,58	1,46	0,64	0,53	363	340
1993	3,43	3,37	2,70	2,64	871	854

Anno	Altezza media giornaliera massima h a Malgrate [m]				Portata media giornaliera massima Q [m ³ /s]	
	Regime naturale*	Regime semiregolato	Regime libero		Regime libero	
			Afflussi naturali	Afflussi regolati	Afflussi naturali	Afflussi regolati
1994	1,80	1,73	0,85	0,76	407	389
1995	1,19	1,00	0,23	0,03	278	239
1996	1,95	1,91	1,02	0,98	445	437
1997	3,29	2,99	2,44	2,11	801	712
1998	1,89	1,61	0,98	0,68	436	370
1999	2,17	2,05	1,28	1,16	507	478
2000	2,91	2,95	2,08	2,13	705	717
2001	2,55	2,26	1,70	1,38	607	529
2002	3,34	3,35	2,54	2,55	828	830
2003	1,11	0,86	0,15	-0,12	262	213
2004	1,66	1,40	0,68	0,43	370	318
2005	0,54	0,42	-0,46	-0,59	153	133
2006	0,72	0,64	-0,28	-0,38	184	167
2007	1,20	1,08	0,24	0,11	279	254

* Dal 1946 al 1958 gli afflussi naturali al lago di Como sono approssimati con quelli semiregolati.

BIBLIOGRAFIA

- Barbanti, L.; Ambrosetti, W. 1986. "Confronto fra i metodi di stima dell'evaporazione del Lago Maggiore", Atti del 7° congresso A.I.O.L., Trieste, 11-14 giugno 1986, pp. 29-45.
- Barbero, G.; Bertoli, L. 1998. *L'influenza del deflusso minimo vitale sulla regolazione dei grandi laghi prealpini*, Truccazzano (MI), Guerini e associati.
- Bruschetti, G. 1838. "Sul modo più conveniente e facile per liberare Como e Lecco dalle inondazioni, e per asciugare le paludi di Gera, di Colico e di Brivio prodotte dalle escrescenze del lago di Como e dal suo principale influente ed unico emissario fiume Adda", *Bibl. Ital.*, Milano, Imperiale Regia stamperia, tomo 91°.
- Bruschetti, G. 1839. "Seguito dell'appendice sul modo più conveniente per liberare Como e Lecco dalle inondazioni", *Bibl. Ital.*, Milano, Imperiale Regia stamperia, tomo 93°.
- Cantù, C. 1856. *Storia della città e della diocesi di Como*, Firenze, Felice Le Monnier, vol. II.
- Cattaneo, C. 1844. *Notizie Naturali e Civili su la Lombardia*, Milano, coi tipi di Giuseppe Bernardoni di Giovanni, vol. I.
- Cattaneo, C. 1971. *Scritti sulla Lombardia*, Milano, Ceschina, vol. I.
- Citrini, D. 1978. *Le piene del Lario e dell'Adda nel regime regolato*, Milano, Memorie e studi dell'Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Politecnico di Milano, n. 273.
- Fantoli, G. 1897. *Sul regime idraulico dei laghi*, Milano, Ulrico Hoepli.
- Fantoli, G. 1921. *Il lago di Como e l'Adda emissario*, Milano, Ulrico Hoepli.
- Lecci, E. 1979. "Esiste dal XIV secolo il fenomeno degli straripamenti nel lago di Como", rivista *Como*, inverno 1979.
- Lombardini, E. 1845. "Della natura dei laghi e delle opere intese a regolarne l'efflusso", *Memorie dell'I.R. Istituto Lombardo di Scienze, Lettere ed Arti*, vol. II.
- Lombardini, E. 1866a. "Della natura dei laghi e delle opere intese a regolarne l'efflusso", *Giorn. Ing.*, vol. XIV, giugno 1866 (ristampa aggiornata della memoria originale del 1845).
- Lombardini, E. 1866b. "Sulle piene de' fiumi e laghi della Lombardia avvenute nel giugno 1855 ed in particolare su quella del lago di Como", *Giorn. Ing.*, vol. XIV, ottobre 1866.
- Malusardi, G.; Moisélo, U. 2003. *Gli effetti della regolazione sulle portate dell'Adda e sulle piene del lago di Como*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 12.
- Monti, M. 1832. *Storia di Como*, Como, co' torchi di C. Pietro Ostinelli, vol. II, parte II.
- Morselli, S. 1988. *Storia della Valtellina e del corso dell'Adda*, Bologna, Atesa editrice (riproduzione anastatica di una monografia apparsa nella *Grande Illustrazione del Lombardo-Veneto*, opera pubblicata a Milano dal 1858 al 1862).
- Nonnis, A. 1959. *La regolazione del lago di Como e il Consorzio dell'Adda, dalla sua costituzione (1938) al 31 Dicembre 1958*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 1.
- Pestalozza, A.; Valentini, C. 1899. *Sistemazione del deflusso delle acque del lago di Como, studi e proposte degli ingegneri Alessandro Pestalozza e Carlo Valentini*, Milano, Ulrico Hoepli.
- Pieri, G. 1958. *La regolazione del lago di Como nel primo decennio di esercizio 1946-1955*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 2.
- Pieri, G. 1960. *La regolazione del lago di Como nel triennio 1956-58*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 3.
- Pieri, G. 1962. *La regolazione del lago di Como nell'anno 1959*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 4.
- Pieri, G. 1963. *La regolazione del lago di Como nel biennio 1960-61*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 5-6.
- Pieri, G. 1964. *La regolazione del lago di Como nell'anno 1962*, Brescia, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 7.
- Pieri, G. 1970. *La regolazione del lago di Como nei sei anni dal 1963 al 1968*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 8.
- Pieri, G. 1973. *La regolazione del lago di Como nel biennio 1969-1970*, Milano, Consorzio dell'Adda, pubbl. n. 9.
- Poggi, C. 1889. *Le piene del Lario*, Como, tipografia provinciale F. Ostinelli di C. A. (da raccolta di ristampe anastatiche dello stesso autore a cura della Famiglia Comasca, editrice Cesare Nani, 1990).
- Possenti, C. 1839. *Sulla sistemazione dell'emissario del lago di Como*, Milano, Angelo Monti libraio.
- Rovelli, G. 1802-1803. *Storia di Como*, Como, dalle stampe di Carl'Antonio Ostinelli impressore dipartimentale, parte III (tomi I-II-III) (da ristampa della libreria Meroni, Como, 1992).
- Ufficio Idrografico del Po - Parma, 1936. *Idrometro di Lecco città (riva della Malpensata), effemeridi dal 1845 al 1930*, Roma, Istituto Poligrafico dello Stato.
- Ufficio Idrografico del Po, sezione di Milano, 1922-1934. *Annali idrologici*, parte II.
- Ufficio Idrografico del Po, sezione di Parma, 1935-1945. *Annali idrologici*, parte II.

