

## RIMOZIONE DI SEDIMENTI PER FLUITAZIONE DAL SERBATOIO DI SERNIO (SO)

P. Espa<sup>1</sup>, M. L. Brignoli<sup>1</sup>, A. Previde Prato<sup>1</sup>, E. Castelli<sup>2</sup>, G. Crosa<sup>2</sup> & G. Gentili<sup>3</sup>

- (1) Dipartimento Ambiente-Salute-Sicurezza, Università dell'Insubria, Italia, e-mail: paolo.espa@uninsubria.it
- (2) Dipartimento di Biotecnologie e Scienze Molecolari, Università dell'Insubria, Italia, e-mail: elena.castelli@uninsubria.it
- (3) Graia S.r.l., Italia, e-mail: gaetano.gentili@graia.eu

### SOMMARIO

*Il presente lavoro descrive la rimozione di un ingente quantitativo di sedimenti (circa 100'000 tonnellate) dal serbatoio di Sernio, in provincia di Sondrio, effettuata tra maggio e luglio del 2009. Il sedimento è stato evacuato per fluitazione (flushing), nel sostanziale rispetto dei vincoli preventivamente stabiliti sulla concentrazione di solidi sospesi (CSS) delle acque scaricate. Tali limitazioni hanno lo scopo di contenere l'impatto delle operazioni sugli ecosistemi acquatici coinvolti. La CSS è stata controllata regolando il livello nel serbatoio, la portata in uscita e, in un secondo tempo, mediante l'utilizzo di escavatori meccanici. La gestione delle operazioni si è basata sul costante monitoraggio della CSS poco a valle dell'area di intervento. La campagna di misura è stata ulteriormente estesa a valle, per un tratto di circa 40 km lungo l'asta dell'Adda, al fine di quantificare la riduzione della CSS per effetto combinato di diluizione e deposizione.*

### 1 INTRODUZIONE

Il sedimento che si accumula sul fondo dei serbatoi artificiali deve essere periodicamente asportato per ripristinarne la capacità utile. La fluitazione (*flushing*) consiste nella rimozione e trasporto del sedimento a valle dell'opera di sbarramento sfruttando l'azione di un opportuno deflusso idrico all'interno del serbatoio (*Morris & Fan, 1997*). Nell'effettuazione di interventi del genere si contrappongono solitamente due esigenze contrastanti: da un lato quella di evacuare il deposito il più velocemente possibile, in modo da ridurre il tempo e i costi delle operazioni, dall'altro la necessità di limitare la concentrazione dei solidi sospesi (CSS) nelle acque utilizzate per la fluitazione, per contenere i danni subiti dalla fauna acquatica e, in generale, dagli habitat fluviali (*Crosa et al. 2010; Espa et al., 2009*). È evidente che il controllo della CSS delle acque scaricate nel *flushing* di un lago artificiale risulta spesso tutt'altro che semplice e presenta talvolta difficoltà, anche insormontabili.

La fluitazione di sedimenti dal serbatoio di Sernio (sull'asta dell'Adda a monte del lago di Como) ha avuto luogo nel periodo di maggio-luglio 2009. Le operazioni sono state effettuate in giorni non consecutivi in modo da ridurre l'impatto ecologico e per conciliarle con le necessità degli ulteriori utenti del corso d'acqua (consorzi irrigui,

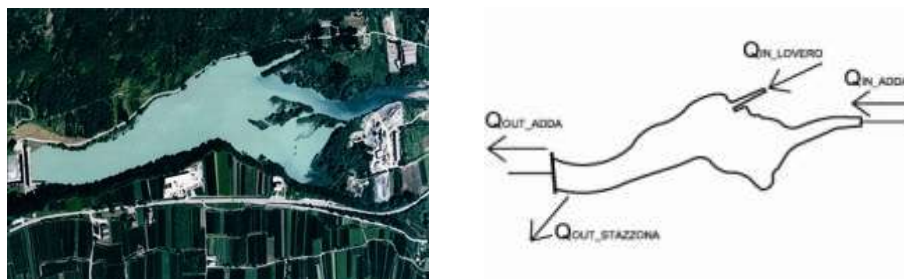
pescatori, sportivi...). Il quadro normativo che regola tali interventi è ancora in fase evolutiva, pertanto i valori di riferimento della CSS sono stati fissati riferendosi ai risultati di un recente progetto di ricerca predisposto all'uso dalla provincia di Sondrio (*Regione Lombardia, 2008*). In particolare, tenuto conto che l'Adda a valle della zona di intervento possiede tratti di alto pregio ittico, il limite di CSS medio su tutto il periodo delle operazioni è stato posto a 1.5 g/l, il limite per l'allerta e conseguente modifica in corso d'opera dell'intervento a 3 g/l.

La gestione del *flushing* del serbatoio di Sernio in conformità ai vincoli stabiliti è stata attuata sulla base dei dati misurati in continuo presso una stazione di monitoraggio dei solidi sospesi appena a valle dell'opera di sbarramento che genera il serbatoio. La campagna di misura è stata estesa fino ad una distanza di circa 40 km a valle del serbatoio per quantificare la riduzione della CSS per effetto combinato della diluizione e della deposizione; le misure raccolte potranno essere proficuamente utilizzate per calibrare e validare modelli numerici dei fenomeni osservati.

## 2 MATERIALI E METODI

### 2.1 Serbatoio di Sernio (SO)

Il serbatoio artificiale di Sernio (figura 1) è sito nei comuni di Lovero e Sernio in provincia di Sondrio.



**Figura 1.** Foto aerea e schema idraulico del serbatoio di Sernio.

Esso è realizzato sbarrando l'alto corso dell'Adda a circa 75 Km dalla foce nel lago di Como. Il bacino imbrifero sotteso è di 885 km<sup>2</sup>, con quote che variano da 490 (quota di fondo alveo alla progressiva dello sbarramento) a 4'000 m s.l.m.. La portata media annua è dell'ordine di 25 m<sup>3</sup>/s, le medie mensili presentano valore massimo a giugno, circa doppio rispetto alla portata media annua (*Regione Lombardia, 2006*), essenzialmente a causa dell'ablazione glaciale. Le operazioni di fluitazione, effettuate come detto tra la fine di maggio e l'inizio di luglio, hanno quindi beneficiato della massima disponibilità idrica stagionale.

L'opera di sbarramento è una traversa, caratterizzata da quattro luci presidiate da paratoie piane a strisciamento. Il volume del serbatoio è di circa 750'000 m<sup>3</sup>. Alla massima altezza di ritenuta, pari a 7.8 m sul piano delle paratoie abbassate, il serbatoio si estende 1.5 km a monte della traversa. La portata affluente al serbatoio si ripartisce tra quella proveniente dall'Adda e quella scaricata, a circa metà del serbatoio in sponda destra (come evidente in figura 1), dalla centrale idroelettrica di Lovero (potenza

installata 49 MW, portata massima turbinabile 60 m<sup>3</sup>/s). Il volume che mediamente in un anno affluisce al serbatoio (circa 750 Mm<sup>3</sup>) vi giunge per oltre due terzi dallo scarico dell'impianto di Lovero. Il serbatoio ha funzione di regolazione perlopiù giornaliera dell'impianto di Stazzona (potenza installata 30 MW, portata massima turbinabile 40 m<sup>3</sup>/s), la cui opera di presa è posta in sponda sinistra a ridosso della traversa.

Le pendenze medie di fondo alveo variano da meno dello 0.3 % nella parte a monte dello scarico dell'impianto di Lovero a circa lo 0.5 % a valle dello stesso. Prima dell'inizio delle operazioni di fluitazione, con livello del serbatoio minimo per il funzionamento dell'impianto di Stazzona, sono stati prelevati in diversi punti sei campioni di materiale di fondo di cui è stata effettuata l'analisi granulometrica per ottenere una caratterizzazione di massima della natura del sedimento fluitato. Con riferimento alla nota classificazione Udden-Wentworth, il 60÷100% del materiale costituente ciascun campione risulta più fine della sabbia grossolana (diametro minore di 0.5 mm), il 30÷60% risulta essere limo e argilla (diametro inferiore a 0.062 mm) con componente argillosa variabile tra 0 e 10%.

## **2.2 Fasi dell'operazione**

Le operazioni sono state condotte dalla società A2A che gestisce il serbatoio. La CSS delle acque scaricate è stata controllata regolando: il livello nel serbatoio, la portata immessa nel serbatoio e la sua ripartizione tra quella scaricata dall'impianto di Lovero e quella defluente in Adda (il che è stato conseguito modulando il funzionamento della centrale di Lovero), l'attività di escavazione meccanica. Particolare cura è stata rivolta agli abbassamenti di livello, attuati con estrema gradualità per evitare che la CSS finisse fuori controllo.

L'intervento può essere sintetizzato come segue, suddividendolo in quattro differenti fasi; le diverse fasi si sono susseguite in modo da rispettare i vincoli sulla CSS e mantenere al contempo l'operazione efficiente dal punto di vista della rimozione dei sedimenti:

- Fase 1 (dal 23 al 27 maggio): nei primi giorni, il livello nel serbatoio è stato abbassato fino alla quota minima per la captazione dall'opera di presa della centrale di Stazzona (circa 4 m sul piano delle paratoie abbassate). Gli impianti di Lovero e Stazzona hanno funzionato regolarmente. Si è registrata una evidente riduzione dell'efficienza della manovra (si veda la tabella 1 riportata nel seguito) tra il primo giorno e i giorni successivi, nei quali si riproponeva l'analoga operazione di abbassamento del livello per una durata comparabile.
- Fase 2 (29 maggio, 4-5 giugno): oltre ad abbassare il livello nel serbatoio, come nella prima fase, è stata ridotta la portata turbinata dall'impianto di Lovero e incrementata nella stessa misura quella in Adda; il tentativo aveva l'obiettivo di aumentare la capacità erosiva della corrente in corrispondenza della parte di monte del serbatoio, dove peraltro erano stati scavati dei canali per incrementare la superficie di rimozione.
- Fase 3 (18-19 giugno): il livello nel serbatoio è stato gradualmente abbassato al di sotto del minimo per la captazione dall'opera di presa di Stazzona, tuttavia mantenendo le paratoie parzializzate e quindi il deflusso nel serbatoio debolmente rigurgitato da valle. Durante le ore diurne l'impianto di Lovero funzionava in modo ordinario mentre quello di Stazzona era fuori servizio.
- Fase 4 (2-3-7-8-9-10 luglio): il livello nel serbatoio è stato ulteriormente ridotto

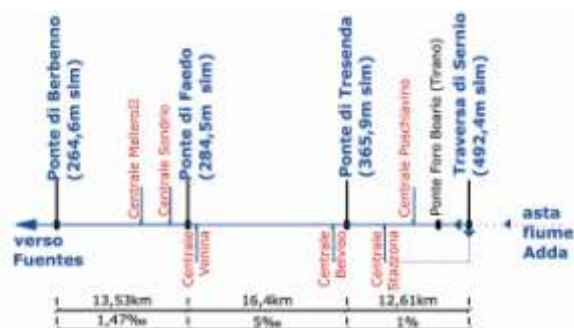
fino ad apertura completa delle paratoie; sono stati impiegati mezzi meccanici per rimuovere il sedimento depositato in sponda destra e sversarlo nella corrente.

### 2.3 Portate

La portata complessivamente uscente dal serbatoio nelle ore di lavoro si è mantenuta pressoché costante e quantificabile in circa  $80 \div 100 \text{ m}^3/\text{s}$ . La quota scaricata immediatamente a valle, in condizioni di paratoie parzializzate (fasi 1, 2 e 3), è stata desunta da misure idrometriche, noti il grado di apertura delle paratoie e i corrispondenti coefficienti di efflusso. Per apertura delle paratoie completa (fase 4), non essendo applicabile la precedente procedura, sono stati utilizzati i dati di portata disponibili in corrispondenza dell'abitato di Tirano, a distanza di circa 3 km a valle della traversa di Sernio (figura 2).

Nel tratto di fiume Adda interessato dal monitoraggio, i principali tributari sono tutti sfruttati per la produzione di energia idroelettrica; le immissioni laterali di portata più significative sono quindi riconducibili agli scarichi delle centrali elencate di seguito e schematizzati in figura 2:

- Centrale Poschiavino: portata massima turbinabile  $14 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Centrale Belviso: portata massima turbinabile  $13 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Centrale Venina: portata massima turbinabile  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Centrale Sondrio: portata massima turbinabile  $26 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Centrale Mallero II: portata massima turbinabile  $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$



**Figura 2.** Stazioni di misura, distanze, pendenze medie, quote di fondo alveo e principali immissioni laterali di portata lungo l'asta oggetto di studio.

### 2.4 Misura della CSS

Per gestire le operazioni di rimozione dei sedimenti, regolando opportunamente le CSS in uscita, è stata prevista una stazione di monitoraggio in continuo dei solidi sospesi con sonda fissa (*Lange SC100*), alcune centinaia di metri a valle della traversa. Tale sonda è dotata di sensore per solidi sospesi *Solitax ts-line sc* (fondo scala a  $50 \text{ g/l}$ ) a doppio raggio di luce IR incidente e misura del raggio diffuso a  $90^\circ$  e  $180^\circ$ . Nelle altre stazioni, la rilevazione veniva effettuata nel corso di intervalli temporali selezionati con l'ausilio di due torbidimetri portatili: *Partech 740* con sensore *Soli-Tech 10* (fondo scala a  $20 \text{ g/l}$ ) e *Insite 3150* con sensore ottico basato sull'assorbimento dell'infrarosso modello 35 (fondo scala a  $30 \text{ g/l}$ ). Queste ulteriori stazioni (figura 2) sono state allestite a Tresenda, Faedo e Berbenno (rispettivamente a 12.5, 30 e 43.5 km dalla traversa di

Sernio). La sonda fissa campionava un valore al minuto restituendone uno ogni cinque minuti. Le acquisizioni con le sonde portatili sono state effettuate ogni 5 minuti.

Le misure di torbidità sono state raccolte in un solo punto della corrente, disponendo la sonda a circa 1.5 m dalla sponda (scelta il più possibile acclive) e almeno 10 cm al di sotto del pelo libero; il posizionamento delle sonde portatili veniva effettuato da un operatore mediante un'asta metallica. Le misure acquisite si ritengono tuttavia significativamente rappresentative del valor medio della CSS sulla sezione trasversale della corrente (Espa et al., 2008) in virtù sia delle caratteristiche granulometriche del sedimento fluitato che delle velocità medie della corrente, di norma superiori a 1.5÷2 m/s. In particolare, presso la stazione di Tresenda, grazie al ponte ivi presente, è stato possibile prelevare contemporaneamente campioni sia in sponda che nella parte centrale della corrente; le differenze di CSS si sono mediamente mantenute inferiori al 10%.

I torbidimetri sono stati tarati a posteriori attraverso il prelievo di campioni di acqua da un litro, effettuato per quanto possibile in prossimità del punto di posizionamento del torbidimetro. Tali campioni sono stati versati in un cono Imhoff e lasciati sedimentare 30 minuti. La CSS è stata quindi calcolata (APHA et al, 2005) dalla somma del peso dei solidi sedimentabili (metodo gravimetrico con cono Imhoff) e dei non sedimentabili (filtrazione del surnatante).

### 3 RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 Taratura delle sonde torbidimetriche

Le sonde utilizzate per i rilievi della CSS rilevano la torbidità che, come noto, può essere correlata alla concentrazione di solidi sospesi solo dopo opportuna calibrazione (Clifford et al., 1995; Gippel, 1995). A questo proposito sono stati raccolti nelle varie stazioni e successivamente analizzati in laboratorio 120 campioni. I coefficienti delle curve di taratura, aventi espressione  $CSS_{CORRETTA} = a \times (CSS_{RILEVATA})^b$ , con l'ovvio significato dei simboli, sono stati ottenuti con il metodo dei minimi quadrati. Le espressioni così ricavate si riferiscono alla stazione di misura ed allo strumento ivi impiegato; esse vengono riportate di seguito:

- Sernio (sonda *Lange*):  $CSS_{CORRETTA} = 1.96 \times (CSS_{RILEVATA})^{0.76}$ ,  $R^2=0.94$
- Tresenda (sonda *Insite*):  $CSS_{CORRETTA} = 1.11 \times (CSS_{RILEVATA})^{1.19}$ ,  $R^2=0.93$
- Tresenda (sonda *Partech*):  $CSS_{CORRETTA} = 1.33 \times (CSS_{RILEVATA})^{1.58}$ ,  $R^2=0.97$
- Faedo (sonda *Insite*):  $CSS_{CORRETTA} = 1.11 \times (CSS_{RILEVATA})^{1.81}$ ,  $R^2=0.96$
- Berbenno (sonda *Insite*):  $CSS_{CORRETTA} = 0.76 \times (CSS_{RILEVATA})^{1.36}$ ,  $R^2=0.90$

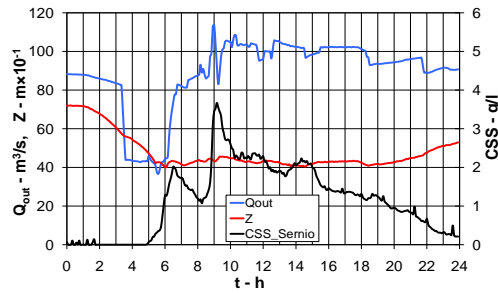
Le misure di campo raccolte poco a valle dello sbarramento, utilizzate come detto per gestire le operazioni, sottostimano di circa il 30% quelle successivamente effettuate in laboratorio; questo scostamento è presumibilmente imputabile alla presenza di sedimento relativamente grossolano in sospensione, non rilevabile adeguatamente dal sensore utilizzato, la cui calibrazione è stata effettuata dal costruttore con una sospensione di materiale prevalentemente limoso (terra di Fuller). Procedendo verso valle si è registrata una maggiore corrispondenza tra valori rilevati e quelli misurati in laboratorio, a causa della progressiva deposizione del sedimento meno fine.

#### 3.2 Operazioni di *flushing* e andamenti della CSS

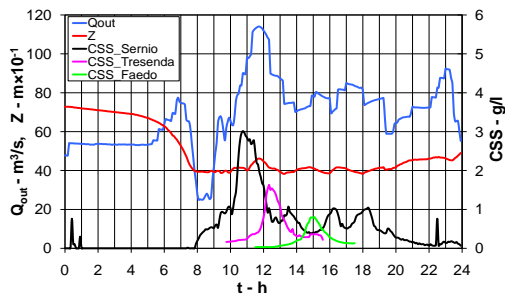
Vengono di seguito riportati gli andamenti della CSS nelle varie stazioni di misura,

della portata uscente ( $Q_{OUT}$ ) e del livello ( $Z$ ) nel serbatoio (sul piano delle paratoie abbassate) in 4 giornate, ciascuna relativa ad una delle fasi dell'intervento descritte al paragrafo 2.2..

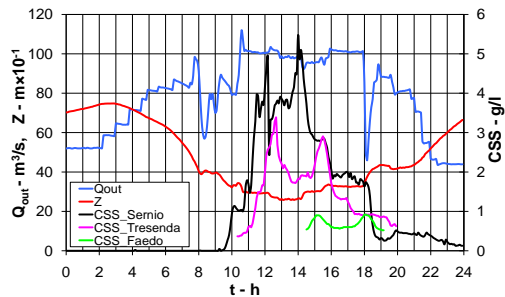
La CSS delle acque scaricate aumenta in corrispondenza agli abbassamenti di livello ed agli incrementi della portata immessa nel serbatoio; mantenendo sostanzialmente invariati i parametri di controllo, al trascorrere del tempo tale aumento della CSS tende a ridursi (figura 3.a, b, c). In condizioni di paratoie completamente sollevate e flusso all'interno del serbatoio non rigurgitato da valle (figura 3.d) la CSS delle acque scaricate è invece perlopiù controllata dall'opera degli scavatori meccanici: nell'esempio illustrato è evidente la riduzione della CSS nel corso dell'interruzione dei lavori per il pranzo (tra le 12 e le 14).



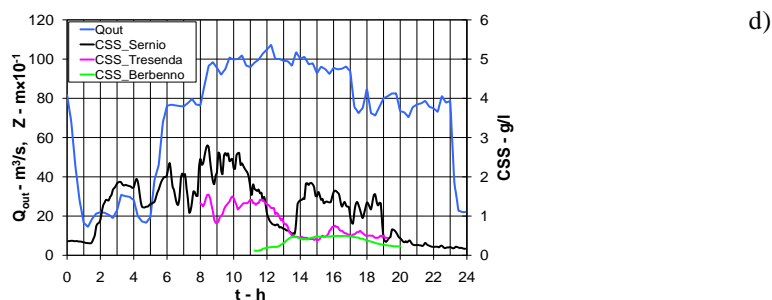
a)



b)



c)



**Figura 3.** Andamento temporale della CSS, della portata uscente dal serbatoio di Sernio e del livello nello stesso. a) Fase 1, 25-mag.; b) Fase 2, 29-mag.; c) Fase 3, 18-giu.; d) Fase 4, 8-lug.

Le misure effettuate lungo l'asta dell'Adda hanno permesso di quantificare l'abbattimento della CSS per effetto combinato di sedimentazione e diluizione. In particolare, facendo riferimento ai picchi, la CSS a Tresenda è risultata più che dimezzata, ridotta ad un quarto presso Faedo e ad un quinto presso Berbenno. Inoltre, tenendo conto degli incrementi di portata dovuti ai contributi dei principali tributari, è possibile stimare una sedimentazione del 40%, 20%, 2.5% della massa complessivamente evacuata dal serbatoio rispettivamente nei tratti Sernio/Tresenda, Tresenda/Faedo, Faedo/Berbenno.

### 3.3 Massa evacuata dal serbatoio e costo dell'intervento

Per tutti i giorni in cui è stato effettuato il *flushing* è immediato calcolare la massa uscita dal serbatoio di Sernio come integrale nel tempo del prodotto delle portate liquide per la CSS rilevata poco a valle dello sbarramento. Per ogni giornata di fluitazione, la tabella riportata di seguito (tabella1) elenca le ore di lavoro ( $\Delta t_L$ ), la portata mediamente scaricata nell'arco delle 24 ore ( $Q_{OUT,G}$ ), la CSS media giornaliera a valle dello sbarramento ( $CSS_{SERNIO,G}$ ), la CSS di picco nella stessa stazione ( $CSS_{SERNIO,MAX}$ ) e la massa fluitata ( $M_{OUT,G}$ ). Quest'ultima ammonta complessivamente a circa 100'000 tonnellate, corrispondenti a circa 80'000 m<sup>3</sup> di sedimento rimosso.

La maggiore efficacia delle operazioni è stata raggiunta nelle fasi 3 e 4 e cioè, come prevedibile, in corrispondenza alla massima apertura delle paratoie. Tuttavia i tentativi precedenti sono stati necessari a valutare la risposta del sistema, in termini di CSS delle acque scaricate, alle varie operazioni effettuate. Di conseguenza, in due sole giornate sulle sedici complessive il picco di allerta della CSS è stato ecceduto in maniera consistente, sia pur mantenendo la media giornaliera sotto soddisfacente controllo (tanto più se si tiene conto che i valori qui riportati sono quelli calibrati a posteriori e non quelli bruti utilizzati per gestire le operazioni).

I dati a disposizione permettono di determinare gli intervalli di tempo in cui le centrali idroelettriche di Lovero e Stazzona sono state soggette ad utilizzo ridotto ed il corrispondente valore di portata non turbinata. In particolare, nel corso della seconda fase è stato ridotto il valore di portata turbinata nell'impianto di Lovero in modo da aumentare quella defluente lungo l'Adda. Nelle fasi successive (terza e quarta), il livello nel serbatoio è stato frequentemente mantenuto al di sotto della quota minima per la presa dell'impianto di Stazzona; nelle varie giornate di lavoro, nel corso delle

operazioni di flushing oppure per l'intera giornata, la centrale di Stazzona è pertanto risultata fuori servizio. Calcolata quindi l'energia elettrica che le due centrali non hanno prodotto, considerando l'appropriato prezzo unitario (pari a 60 €/MWh per tutto il periodo di interesse, come verificato sul sito del *GME - Gestore Mercati Energetici - www.mercatoelettrico.org*), si è valutato un costo medio di circa 4 € per metro cubo di materiale rimosso, connesso alla mancata produzione di energia elettrica. In maggiore dettaglio, si può ammettere che per la prima fase il costo sia nullo poiché le operazioni hanno influenzato solo marginalmente il funzionamento delle centrali idroelettriche; per le fasi seguenti, i costi unitari sono rispettivamente quantificabili in circa 4 €/m<sup>3</sup> per la seconda, 2 €/m<sup>3</sup> per la terza e 7 €/m<sup>3</sup> per la quarta, influenzata, come detto, da lunghi fuori servizio della centrale di Stazzona. Tra i pochi dati di letteratura utilizzabili per un raffronto, sono disponibili quelli concernenti numerosi serbatoi californiani (*Morris & Fan, 1997*) tuttavia relativi a rimozione meccanica, trasporto e deposito in luogo idoneo, interventi complessivamente più onerosi. I costi riportati si aggirano nell'intervallo di 5-50 \$/m<sup>3</sup> e superano pertanto quello stimato per l'intervento descritto.

Fase	Giorno	$\Delta t_L$ [h]	$Q_{OUT,G}$ [m <sup>3</sup> /s]	$CSS_{SERNIO,G}$ [g/l]	$CSS_{SERNIO,MAX}$ [g/l]	$M_{OUT,G}$ [10 <sup>3</sup> kg]
1	23/05/09	3	70	0.4	3.6	1'800
1	24/05/09	3	75	0.1	1.4	400
1	25/05/09	17	90	1.2	3.7	9'600
1	26/05/09	13	80	1.0	2.4	7'600
1	27/05/09	17	80	0.4	1.5	2'800
2	29/05/09	2	70	0.5	3.0	3'600
2	04/06/09	8	60	0.4	1.8	2'800
2	05/06/09	8	55	0.6	2.8	4'600
3	18/06/09	9	80	1.0	5.5	8'600
3	19/06/09	9	80	1.3	6.2	12'000
4	02/07/09	8	70	1.9	3.8	13'000
4	03/07/09	8	50	1.4	4.0	6'900
4	07/07/09	8	80	1.4	4.4	11'500
4	08/07/09	8	70	1.5	2.9	9'700
4	09/07/09	8	60	1	2.7	6'500
4	10/07/09	3	40	0.6	3.1	3'300

**Tabella 1.** fluitazione del serbatoio di Sernio: valori giornalieri delle quantità di maggiore interesse.

### 3.4 Formule per il calcolo della portata solida

La previsione della portata solida evacuata in funzione delle principali variabili che controllano il fenomeno rappresenta un supporto fondamentale nella pianificazione delle operazioni di *flushing*. Al riguardo sono disponibili nella letteratura specialistica alcune relazioni di natura essenzialmente empirica. Fan e Jiang nel 1980, sulla base di osservazioni condotte sul serbatoio di Sanmenxia in Cina, svilupparono la seguente equazione (*Brandt, 2000*) valida per sabbia fine ( $d_{50} = 0.06-0.09$  mm):

$$Q_s = 0.0035 \cdot Q^{1.2} \cdot (i \cdot 10^4)^{1.8} \quad (1)$$



in cui  $Q_s$  è la portata solida evacuata (in kg/s),  $Q$  è la portata liquida (in  $m^3/s$ ),  $i$  è la pendenza (in m/m); la CSS delle acque scaricate (in g/l) è data ovviamente dal rapporto  $Q_s/Q$ . Di natura sostanzialmente analoga la relazione ricavata da Xia nel 1983 sulla base di osservazioni condotte in Cina per flushing a serbatoio vuoto (Brandt, 2000):

$$Q_s = \frac{E \cdot Q^{1.6} \cdot i^{1.2}}{B^{0.6}} \quad (2)$$

in cui  $B$  è la larghezza (in m) del canale principale che si sviluppa sul fondo del serbatoio vuotato nel corso della fluitazione (*flushing channel*) ed  $E$  è un coefficiente di erodibilità, maggiore per sedimenti facilmente erodibili, minore per depositi di materiale grossolano oppure consolidato. In particolare, per  $d_{50} < 0.1$  mm  $E=650'000$ , per  $d_{50} > 0.1$  mm  $E=300'000$ , per argilla consolidata  $E=180'000$ . Molto ampi gli intervalli di applicabilità della formula, sia in termini di portata solida (circa  $1 \div 10^6$  kg/s) che liquida (circa  $0.1 \div 10^4$   $m^3/s$ ) che di pendenza (circa  $0.01 \div 1$  %).

Nel caso in esame, limitandosi alle situazioni che presentano maggiore attinenza a quelle per cui le precedenti formule sono state ricavate (corrente nel serbatoio debolmente rigurgitata da valle e assenza di escavazione meccanica – fasi 2 e 3), si è registrato un ottimo accordo dei valori osservati con quelli desumibili dalla (1). Al contrario la (2), peraltro in analogia a quanto già evidenziato da altri autori (Atkinson, 1996), sovrastima consistentemente i valori misurati, prevedendo CSS di quasi due ordini di grandezza maggiori.

#### 4 CONCLUSIONI

In un contesto mondiale di crescente sfruttamento delle risorse idriche e di maggiore attenzione alle fonti energetiche rinnovabili, le problematiche connesse alla conservazione della capacità dei serbatoi artificiali, e quindi alla gestione dei sedimenti, sono destinate ad accrescere la loro importanza. Tanto più in un contesto nazionale in cui la costruzione di nuovi serbatoi è praticamente interrotta da decenni.

La fluitazione (*flushing*) rappresenta in certe condizioni una valida opzione tecnica per rimuovere il sedimento accumulato in un serbatoio, purché le operazioni siano pianificate e gestite in modo da contenere l'impatto sugli ecosistemi coinvolti. Tale contenimento si attua in primo luogo prefissando delle soglie sulla CSS delle acque scaricate. Questo controllo non è generalmente di facile realizzazione e solo pochi lavori nella letteratura specialistica riportano esperienze in tal senso.

Il presente lavoro descrive un'operazione di *flushing* in cui la quantità di sedimento rimossa è dell'ordine delle 100'000 tonnellate, quindi relativamente ingente; inoltre, i vincoli prescritti sulla CSS delle acque scaricate sono stati rispettati in modo soddisfacente. La CSS è stata regolata modulando il livello e le portate immesse nel serbatoio; in un secondo momento sono stati utilizzati anche escavatori meccanici. Attenzione particolare è stata rivolta agli abbassamenti di livello che sono stati attuati con estrema gradualità per evitare che la CSS finisse fuori controllo. La gestione delle suddette operazioni è stata costantemente guidata dalle misure torbidimetriche effettuate lungo l'asta a valle delle operazioni. I dati raccolti nel corso della campagna di monitoraggio potranno essere utilizzati proficuamente per calibrare e validare modelli numerici dei fenomeni osservati.

## RINGRAZIAMENTI

Le attività di monitoraggio descritte sono state finanziate su fondi del progetto *INTERREG Italia - Svizzera ECOIDRO* (Uso dell'acqua e salvaguardia ambientale e della biodiversità nei bacini di Adda, Mera, Poschiavino e Inn, - ID 7630754). Si ringrazia il personale della ditta A2A che ha collaborato attivamente alla raccolta dei dati utilizzati. Si ringrazia infine il DBSM (Dipartimento di Biotecnologie e Scienze Molecolari dell'Università dell'Insubria) per l'attivazione delle borse di studio fruite da M.L. Brignoli e A. Previde Prato.

## BIBLIOGRAFIA

- APHA, AWWA & WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, XXI Ed. Washington, American Public Health Association, Method 2540, 2-55/2-60, 2005.
- Atkinson, E. The feasibility of flushing sediment from reservoirs, Report OD 137, HR Wallingford, Wallingford, 1996, 21 pp.
- Brandt, S.A. A review of reservoir desiltation, *International Journal of Sediment Research*, 2000, Vol. 15 (3), pp. 321-342.
- Clifford, N. J., Richards, K. S., Brown, R. A. & Lane, S. N. Laboratory and field assessment of an infra-red turbidity probe and its response to particle size and variation in suspended sediment concentration, *Hydrological Sciences Journal*, 1995, Vol. 40 (6), pp. 771-791.
- Crosa, G., Castelli, E., Gentili, G. & Espa, P. Effects of suspended sediments from reservoir flushing on fish and macroinvertebrates in an alpine stream, *Aquatic Sciences* 2010, Vol. 72 (1).
- Espe, P., Castelli, E., Crosa, G., Compare, S. & Gentili, G. Misura della concentrazione di solidi sospesi nelle fluitazioni di sedimento da bacini artificiali, *31° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Perugia, 2008.
- Espe, P., Castelli, E., Crosa, G. & Gentili, G. Environmental effects of sediment flushing from artificial reservoirs: field study on a alpine stream, *33<sup>rd</sup> Congress of IAHR*, Vancouver, British Columbia, Canada, 2009, pp. 3296-3303.
- Gippel, C.J. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in stream., *Hydrological Processes*, 1995, Vol. 9, pp. 83-97.
- Morris, G.L. & Fan, J. Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use, Mc Graw Hill, New York, 1997.
- Regione Lombardia. Programma di tutela e uso delle acque, Allegato 2 alla Relazione Generale, Stima delle portate e delle precipitazioni e strumenti per la loro regionalizzazione, 2006.
- Regione Lombardia. Definizione dell'impatto degli svassi dei bacini artificiali sull'ittiofauna e valutazione di misure di protezione, Quaderni della ricerca n° 90, Luglio 2008, Copyright Regione Lombardia, 2008.