

# Uso di radioisotopi per la valutazione dell'erosione a partire da misure del trasporto solido in bacini attrezzati

Alberto Tazioli, Domenico Tomassoni, Giulio Sergio Tazioli

Dipartimento di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio, Università Politecnica delle Marche, Ancona  
a.tazioli@univpm.it, d.tomassoni@univpm.it, g.s.tazioli@univpm.it

*Erosion evaluation in equipped basins by means of radioisotopes techniques in suspended sediment transport measurements*

**ABSTRACT:** The hydrogeological characters of a river are important to allow a correct management of river basin, a control of watershed budget and to foresee the right interventions along the river course, especially near the river mouth. In particular, the evaluation of fluvial sediment transport allows to estimate the erosion to which the basin undergoes, and to make a correct prevention with regards to hydrologic catastrophes in the risk zones. Among several experimental techniques for measuring suspended sediment transport, our research group applies nuclear methods based on suspended sediment concentration measurement, revealed by means of entity of the attenuation of gamma radiation emitted by an  $^{241}\text{Am}$  radioactive source placed in the water course. This kind of attenuation - due to the presence of sediments in the water mean, very high in concentration during the flood events - is measured by a nuclear gauge with a NaI(Tl) crystal. With suitable calibration curves made in the laboratory and then validated in field, it is possible to have as a result the amount of suspended sediment transport in a certain river section near the sea. This methodology, applied to several equipped basins in Italy and Africa, is very appropriate for small and medium water courses (as rivers in our Apennines); it allows to estimate the total erosion in the watershed. In this note the techniques utilized in our equipped basins are presented, with regards to instruments calibration, and numerical results from some basins in Marche Region, compared with an empirical formula (Gavrilovic equation) used in literature for erosion evaluating.

**Key terms:** erosion, nuclear gauge, turbidity, suspended sediment transport, liquid discharge, equipped basins, calibration, Gavrilovic model.

**Termini chiave:** erosione, sonda nucleare, torbidità, trasporto solido in sospensione, portata liquida, bacini attrezzati, taratura, modello Gavrilovic

## Riassunto

Lo studio dei caratteri idrologici di un corso d'acqua permette una corretta gestione del bacino idrografico corrispondente, un maggior controllo delle risorse idriche dell'intero bacino e quindi una manutenzione adeguata e una programmazione degli interventi necessari lungo il corso d'acqua e, soprattutto, in prossimità dello sbocco a mare.

In particolare, la valutazione del trasporto solido permette di stimare l'erosione a cui è sottoposto il bacino ad opera del fiume, e di prevenire catastrofi idrologiche nelle eventuali zone a rischio. Tra le varie tecniche sperimentali per la misura del trasporto solido in sospensione, da numerosi anni il nostro gruppo di ricerca utilizza metodi nucleari basati sulla misura della concentrazione dei sedimenti in sospensione, rivelata per mezzo dell'attenuazione della radioattività gamma emessa da una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  immersa nel corso d'acqua. Tale attenuazione – dovuta alla presenza dei sedimenti trasportati in grande concentrazione durante gli eventi di piena – è misurata tramite un rivelatore a scintillazione formato da un

cristallo di NaI(Tl). Con opportune curve di taratura costruite in laboratorio e in campagna è possibile risalire all'entità del trasporto solido in sospensione in una determinata sezione fluviale posta in vicinanza della foce.

Questa metodologia, applicata a diversi bacini attrezzati in Italia ed in Africa, si è rivelata particolarmente adatta per corsi d'acqua piccoli e medi (quali quelli dei nostri Appennini), permettendo una stima dell'erosione dell'intero bacino.

In questa nota saranno presentate in dettaglio le tecniche usate, con particolare attenzione alla calibrazione degli strumenti, e i risultati numerici ottenuti in alcuni bacini delle Marche, confrontati con alcune formule empiriche usate in letteratura per il calcolo dell'erosione.

## Introduzione

La valutazione dell'erosione in un bacino riveste un'importanza fondamentale per garantire una buona gestione del territorio e per poter individuare aree soggette a maggiori rischi idrogeologici, che necessitano, quindi, di essere protette in maniera adeguata.

Numerosi sono i metodi per valutare l'erosione causata da un fiume, alcuni si basano sulle caratteristiche del bacino usate come input per formule matematiche o programmi numerici, altri sono basati sulla diretta osservazione di alcuni parametri importanti, che, anche indirettamente, forniscono indicazioni utili a valutare l'entità dell'erosione all'interno del bacino in esame. Tra questi metodi, la misura del trasporto solido operato da un fiume fornisce un'indicazione indiretta della capacità erosiva del fiume stesso.

In questa nota sarà presentato un metodo per la misura del trasporto solido in sospensione, e messi a confronto i risultati ricavati con tale metodo con quelli ricavati dall'applicazione della formula di Gavrilovic per il calcolo dell'erosione di un bacino fluviale.

### Tecniche di misura del trasporto solido in sospensione

Innanzitutto, va premesso che in bacini di piccola entità, appartenenti alla zona appenninica nel centro e nel sud Italia, la quasi totalità del trasporto solido è costituito da trasporto in sospensione, essendo quello al fondo praticamente inesistente e peraltro limitato ad eccezionali fenomeni di piena (Ciancetti et al., 1998; Ciancetti et al., 1999).

Il trasporto solido in sospensione viene misurato mediante tecniche diverse. Alcune tecniche (ad esempio la cosiddetta filtrazione) prevedono una misura diretta della concentrazione di sedimento in sospensione tramite prelievo di campioni in diversi punti del fiume ed a diverse profondità, successivo essiccamento dei campioni per eliminare l'acqua, e pesata finale per la determinazione dei grammi di sedimento presenti in un litro di acqua. È chiaro che questo costituisce il metodo più preciso, anche se spesso sono necessari numerosi campioni e, soprattutto in corrispondenza di eventi di piena di intensità notevole, il campionamento può risultare difficoltoso. Inoltre, il limite più evidente di questo metodo è la non continuità della misura del trasporto solido in sospensione.

Altri metodi prevedono l'utilizzo di fluorimetri o sonde torbidometriche basate su rilievi ottici della torbidità dell'acqua, ma l'esperienza e la calibrazione con metodi più precisi fanno decisamente scartare tali metodiche come poco precise nella maggior parte dei casi.

I metodi nucleari hanno come inconveniente la necessità di installazioni fisse durevoli nel tempo e soprattutto economicamente non convenienti, ma hanno l'indubbio vantaggio di costituire una misura molto precisa del trasporto solido in sospensione, con la possibilità di effettuare misure in continuo anche nell'arco dell'anno idrologico.

Inoltre, tali metodi, se affiancati a tarature opportune e validazioni con metodi classici (ad esempio la filtrazione) sono molto affidabili e consentono misure ripetibili.

Nel presente lavoro l'utilizzo di tali metodiche sarà

approfondito mediante la descrizione accurata delle stesse e la presentazione di alcuni risultati utili come esempio di applicazione delle metodiche stesse.

### Sonde torbidometriche nucleari

Il principio di funzionamento di tali metodiche è sostanzialmente semplice: esso si basa sull'accostamento di una sorgente radioattiva che emette radiazioni gamma, con una sonda nucleare a scintillazione che le rileva, composta da un cristallo di NaI(Tl) delle dimensioni di 1''-2'' (Fig. 1). È chiaro che in campo libero (all'aria, per intenderci) l'intensità delle radiazioni emesse dalla sorgente (normalmente  $^{241}\text{Am}$  o  $^{137}\text{Cs}$ ) è massima in quanto non ci sono ostacoli tra la sorgente e la sonda; immergendo questo sistema in acqua distillata ci sarà una prima attenuazione, poiché parte delle radiazioni sono assorbite dall'acqua stessa. Qualora l'acqua contenga sali disciolti o sedimenti in sospensione che la rendono torbida, un'ulteriore attenuazione si registra nel rilevamento di radiazioni da parte della sonda a scintillazione, e così via finché la totalità delle radiazioni emesse non viene assorbita dal mezzo che si interpone (caso che avviene frapponendo una lastra di piombo molto spessa tra i due strumenti).

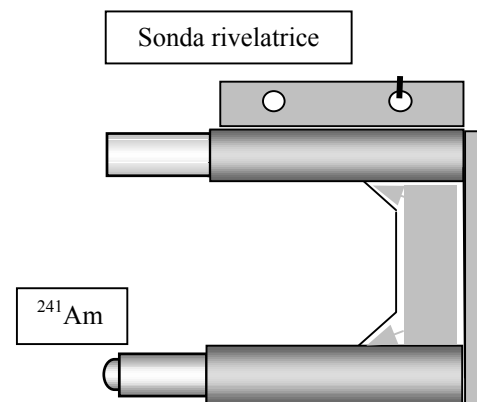


Figura 1. Schema del sistema di misura della torbidità: sorgente radioattiva di  $^{241}\text{Am}$  e sonda rivelatrice a scintillazione con cristallo di NaI(Tl).

*Plot of turbidity measurement system:  $^{241}\text{Am}$  radioactive source and scintillation gauge with NaI(Tl).*

Operando un'opportuna taratura della sonda è possibile, note le concentrazioni immerse tra la sorgente radioattiva e la sonda, ricavare il segnale registrato a livello di radiazioni emesse, così da far corrispondere ad un certo livello di radioattività una determinata concentrazione in grammi per litro (Fig. 2).

La radioattività in questo caso viene misurata dalla sonda in ragione degli eventi di decadimento radioattivo rivelati in un secondo (cps, colpi al secondo); quindi si associa ad un determinato valore di cps un determinato valore di concentrazione. La taratura, eseguita normalmente in laboratorio con sale da cucina (NaCl), viene validata dai dati di concentrazione misurati in campagna in occasione

delle prime piene utili. In questi casi si prelevano alcuni campioni di acqua e sedimento ad altezze idriche differenti (a cui evidentemente corrispondono diverse concentrazioni di sedimento in sospensione), mentre la sonda

turbidometrica nucleare misura i cps. Questi valori di concentrazione corrispondenti tarano ulteriormente la sonda e servono come validazione della curva precedentemente ottenuta.

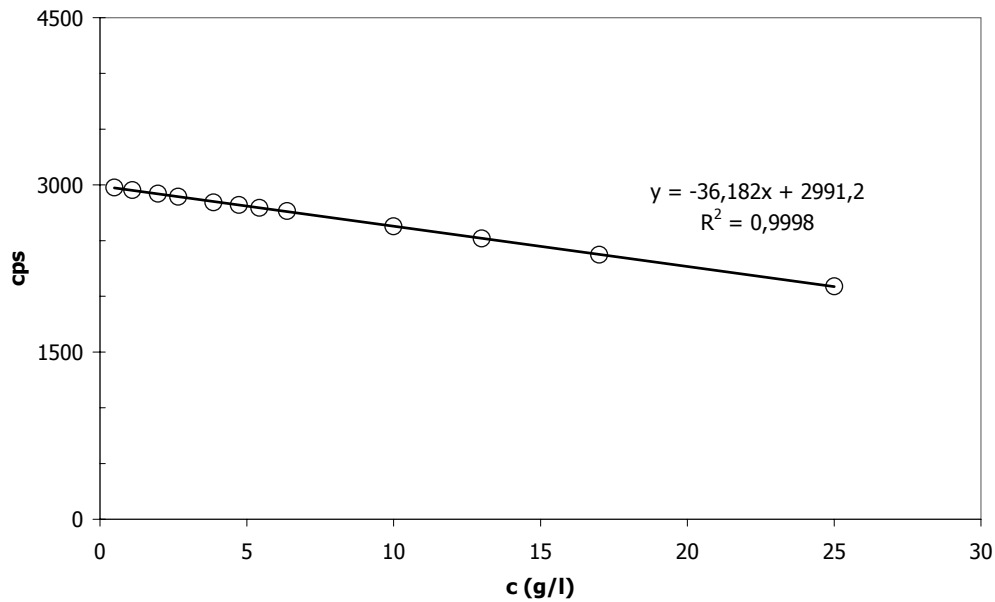


Figura 2. Esempio di curva di taratura di una sonda nucleare. In ordinate i cps (colpi al secondo) misurati dalla sonda, in ascisse le concentrazioni corrispondenti.

*Calibration curve of a nuclear gauge. Cps (counts per second) vs. turbid concentration in g/l.*

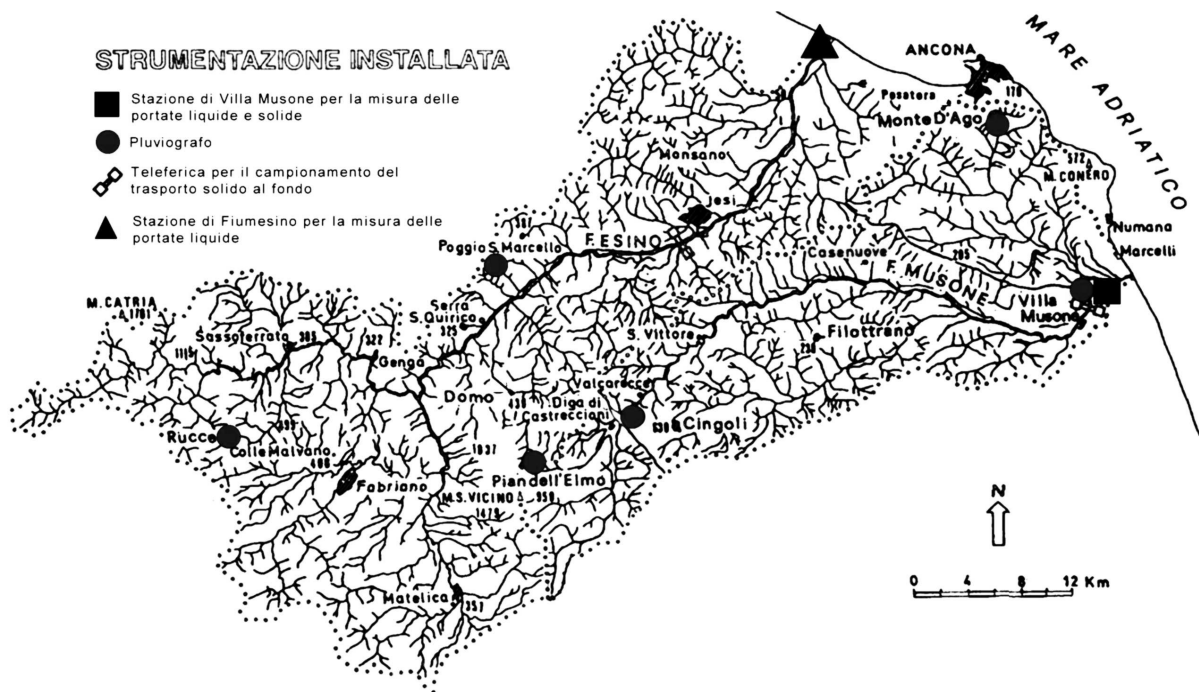


Figura 3. Carta schematica dei bacini idrografici del Fiume Esino e del Fiume Musone. Ubicazione della strumentazione installata (Tazioli et al., 1989).

*Schematic chart of hydrographic basins of Esino river and Musone river. Location of installed equipment (after Tazioli et al., 1989).*

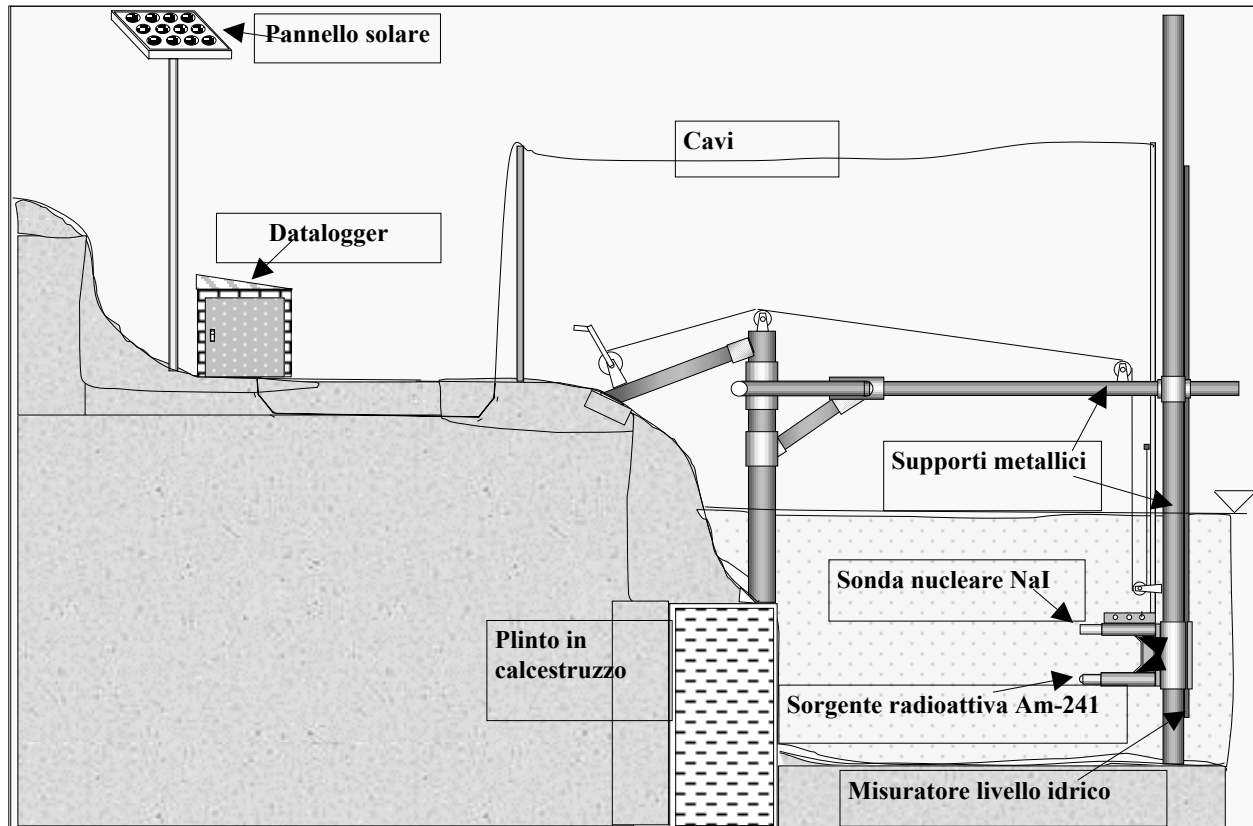


Figura 4. Rappresentazione della stazione di misura del Fiume Musone. La sonda torbidometrica è immersa nel fiume ad una profondità minima di 20 cm sotto il pelo libero.

*Representation of measurement station of Musone river. Nuclear gauge dipped in the river at a depth of 20 cm under the water level.*

### Bacini attrezzati

Nei pressi della foce del Fiume Musone (Fig. 3) è installata dal 1987 una stazione per la misura in continuo del trasporto solido in sospensione, delle altezze idrometriche e delle altezze pluviometriche (Tazioli et al., 1987). Tramite una curva, denominata scala di deflusso, è possibile risalire dall'altezza idrometrica alla portata liquida, nota la sezione dell'alveo.

Tale stazione di misura (Fig. 4) consiste nei tre sensori precedentemente elencati, collegati ad un data logger portatile per la registrazione dei dati, alimentato a batteria da un pannello solare. In particolare la sonda torbidometrica nucleare (del tipo Saphymo SR IO50) è collegata ad un convertitore di segnali a impulsi (IPP4) che restituisce i colpi al secondo (cps) emessi dalla sorgente di  $^{241}\text{Am}$  e rivelati dalla sonda; la distanza tra sonda e sorgente è mantenuta fissa da una struttura contenitiva in acciaio inox, ed è circa di 40 cm.

La sonda nucleare entra in funzione tramite un interruttore di livello, che chiude il circuito di alimentazione in corrispondenza di un livello idrometrico sufficiente a restituire misure corrette di radioattività; tale livello si

raggiunge quando la sonda è interamente immersa nell'acqua del fiume.

Il sistema sonda-sorgente è posto ad una distanza di 20-30 cm dal fondo del fiume, in modo che la sorgente, che si trova in basso, non subisca fenomeni di interrimento. Esso è sospeso mediante tubi in ferro zincato e collegato ad un plinto in cemento armato costruito in corrispondenza della sponda sinistra del fiume.

In vicinanza della foce del Fiume Esino, posto una trentina di km più a Nord, si sta installando una stazione torbidometrica del tutto simile a quella del Fiume Musone, più moderna, con il contributo CIPE (Deliber. 17/2003), che alla data attuale è già entrata in funzione; i primi risultati non sono disponibili, si è costruita soltanto la curva di taratura della nuova sonda (modello CEA), che è in grado di funzionare con collegamento diretto al data logger per la registrazione dei dati. Il data logger, in particolare, è in grado di accumulare i colpi al secondo rivelati dalla sonda, li accumula in 15 minuti di misura e registra nella memoria il dato accumulato (relativo quindi ai colpi emessi in 900 secondi); questa impostazione permette di avere fino a 5 misure di concentrazione in un'ora.

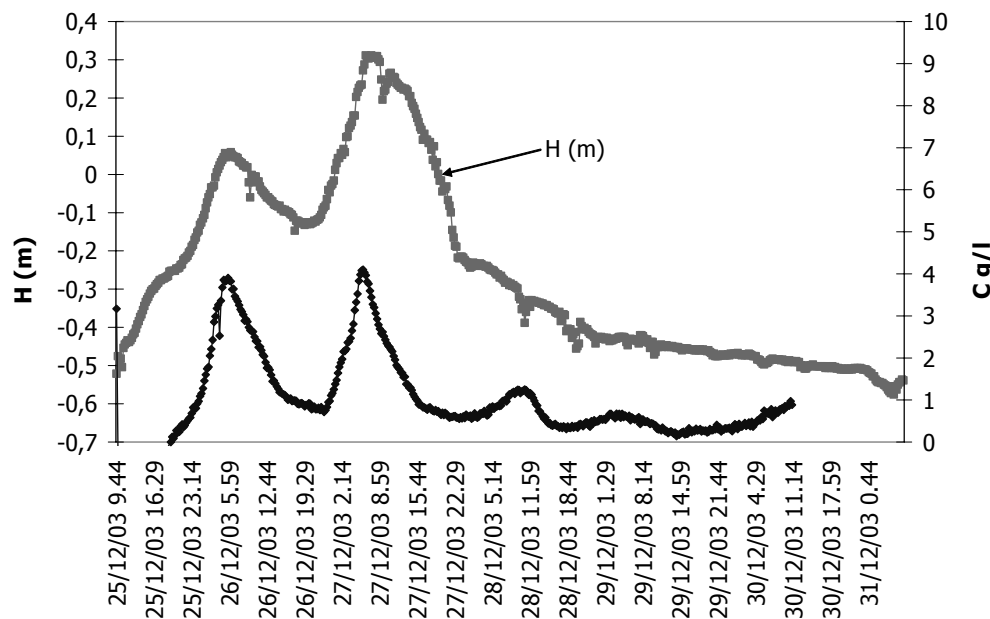


Figura 5. Evento di piena registrata nel F. Musone nel dicembre 2003. E' visibile l'andamento dell'altezza idrometrica in rapporto alla concentrazione torbida.

*Flood event recorded in Musone river in 2003, December. It is possible to see hydrometric level trend, compared with turbid concentration.*

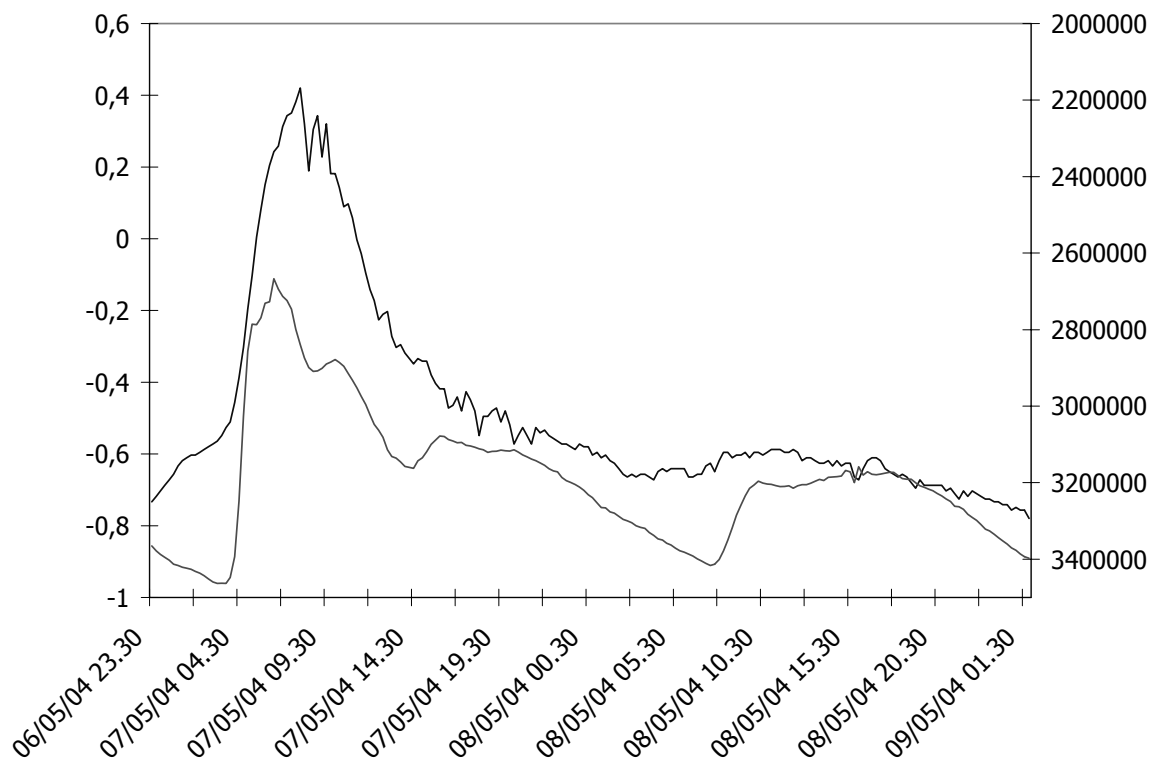


Figura 6. Evento di piena registrata nel F. Musone nel maggio 2004. La curva più in basso rappresenta l'andamento dei cps in funzione del tempo, rapportati all'altezza idrometrica.

*Flood event recorded in Musone river in 2004, May. The lower curve represents cps vs. time trend, compared with hydrometric level.*

## Risultati sperimentali

A titolo di esempio sono riportati i risultati sperimentali in uscita dalla stazione idrotorbidometrica del Fiume Musone. In Fig. 5 sono riportati i valori delle altezze idrometriche registrati dalla sonda di livello durante un evento di piena del dicembre 2003, messi a confronto con i valori della concentrazione torbida ricavati dalla sonda torbidometrica mediante taratura. In Fig. 6 è riportato un altro esempio più

recente. Come si può vedere dal grafico, il picco della concentrazione anticipa di poco il picco delle altezze idrometriche. In Fig. 7 è illustrato un tipico esempio di correlazione tra dati pluviometrici, portate liquide e torbide nel caso di una piena del maggio 1998. I dati relativi al trasporto torbido sono espressi in kg/s

Esempi di risultati espressi come grafici, descritti nella loro utilità per la gestione del territorio.

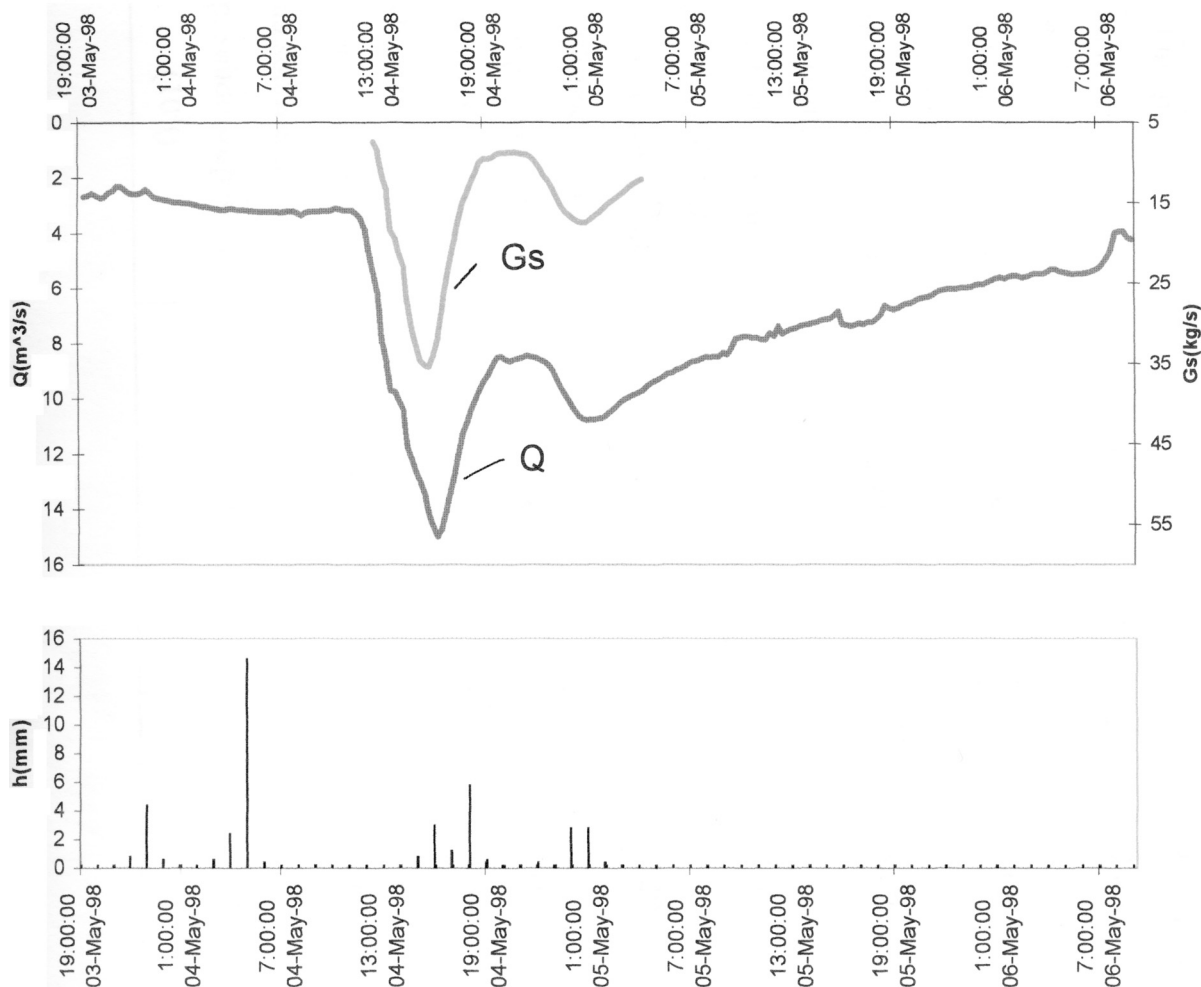


Figura 7. Evento di piena del maggio 1998. Il grafico inferiore rappresenta l'andamento delle altezze di pioggia, quello superiore indica la portata liquida ( $m^3/s$ ) e quella solida ( $kg/s$ ).

*Flood event recorded in Musone river in 1998, May. The lower plot represents rainfall trend, the other plot is the liquid discharge ( $m^3/s$ ) and solid discharge ( $kg/s$ ) vs. time.*

## Calcolo del trasporto solido annuo

Per il bacino del Fiume Musone si è voluta valutare l'erosione media annua mediante confronto tra due metodiche: una misura diretta del trasporto solido annuo effettuata con le tecniche precedentemente esposte, ed un calcolo eseguito tramite modello previsionale di Gavrilovic. Tale modello prende in considerazione tutti i fattori da cui dipende l'erosione idrometeorica, è di semplice

applicazione una volta noti i fattori di erosione, e permette di separare dall'erosione lorda quella parte di sedimento che si rideposita all'interno dello stesso bacino.

Il modello Gavrilovic (così come modificato da Zemljic) presenta la seguente formula:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \cdot F$$

Dove  $W$  è l'erosione media annua in metri cubi,  $T$  un

coefficiente di temperatura dipendente dall'isoterma annuale media,  $h$  l'altezza di pioggia media annuale in mm,  $F$  la superficie del bacino in  $\text{km}^2$ ,  $Z$  il coefficiente di erosione relativa dipendente da vari fattori relativi al suolo ed al bacino in esame.

Per il bacino in studio, i valori di uso del suolo sono stati ricavati da diverse carte di uso del suolo; gli altri fattori relativi al suolo sono stati ricavati con misure dirette o mediante le tabelle usate da Zemljic (1971).

In particolare, riferendosi il calcolo dell'erosione ad un periodo di 7 anni, a partire dal 1997, si sono utilizzati valori dell'altezza di pioggia media pari a ca. 714 mm/anno, temperatura annuale media 14,3 °C, la pendenza del bacino è del 17%, la sua superficie di 374  $\text{km}^2$ , l'altezza media 180 m s.l.m., la densità secca del terreno 1,4  $\text{t/m}^3$ .

A partire da questi valori si è ricavato un deflusso annuo torbido netto di circa 262000  $\text{m}^3/\text{anno}$ , vale a dire circa  $366 \cdot 10^3 \text{ t/anno}$ , per un trasporto unitario di 978  $\text{t/km}^2/\text{anno}$ .

Questi risultati sono sorprendentemente vicini a quelli ricavati mediante misure dirette ed in continuo di torbidità, effettuate tramite sonda nucleare installata nella stazione di Villa Musone, in prossimità della foce del Fiume Musone.

Tali valori, considerando un arco temporale di 7-8 anni, sono mediamente pari a  $200\text{-}250 \cdot 10^3 \text{ t/anno}$ , con punte di circa  $700 \cdot 10^3 \text{ t/anno}$  di deflusso totale torbido, dello stesso ordine di grandezza, quindi, dei valori ricavati in anni successivi mediante applicazione del modello Gavrilovic.

Questa considerazione porta a supporre che avendo a disposizione una buona taratura ed eseguendo una

campagna di validazione del modello adeguata, si può utilizzare tale modello, opportunamente tarato mediante le misure dirette operate dalla sonda, per fare previsioni di trasporto torbido per una data annata, a partire dai valori di precipitazione attesi e/o misurati.

## Conclusioni

In conclusione, il presente lavoro ha evidenziato la necessità di affiancare nello studio di un bacino i dati sperimentali rilevabili direttamente e con continuità ai modelli matematici revisionali, che possono, se opportunamente calibrati e validati, dare utili indicazioni nella gestione del territorio. Sono state presentate le tecniche usate per la misura in sito del trasporto solido in sospensione, e le problematiche insite in tali misure.

I risultati sperimentali ottenuti nel bacino del Fiume Musone evidenziano l'utilità del metodo e la necessità di mettere in relazione tali misure ad altre grandezze idrometriche o climatiche inerenti il bacino in esame.

In particolare per quanto attiene alla valutazione dell'erosione annua, misure di trasporto solido operate mediante una sonda torbidometrica nucleare hanno consentito di tarare il modello Gavrilovic che stima l'erosione annua di un bacino idrografico. Tali misure, ancora in corso di validazione per il bacino del Fiume Musone, si applicheranno con uguali metodologie e attrezzature più moderne ad un altro bacino delle Marche, quello del Fiume Esino, posto una trentina di km più a nord.

## Bibliografia

Ciancetti G.F., Tazioli G.S., Tomassoni D., Sordani A.G., Cantori P.M. (1998) Sul Monitoraggio dei Fenomeni Fluviali. Conv. Int. su "Prevenzione Catastrofi Idrogeologiche: il Contributo della Ricerca Scientifica". Alba (CN), 5-7 Novembre 1996, CNR-IRPI - Torino, 1998 pubbl. GNDCI n. 1600. Tipografia l'Artistica, Savignano (CN), 2, 459-468.

Ciancetti G.F., Tazioli G.S., Tomassoni D., Cantori P.M. (1999) Sulle variazioni dell'Alveo Fluviale e del regime idrologico del F. Musone causate dalla costruzione di un invaso artificiale. Conv. Ricerche ex 40% MURST, Politecnico di

Milano, 23 Settembre 1997. Acque Sotterranee, Fascicolo 64, Anno XVI, Dicembre 1999, Segrate (MI), 41-49.

Tazioli G.S., Ciancetti G.F., Radicioni F., Marcellini M. (1987) Variazioni morfologiche dell'alveo del F. Musone occorse negli ultimi cento anni. Sem. su "Modelli dei Fenomeni Idraulico-Fluviali", Regime degli alvei in relazione al regime idrologico, Bologna, 17-18 Giugno 1986. Istituto di Idraulica. Ed. Tecnoprint, 271-284.

Tazioli G.S., Radicioni F., Vivalda P., Becchi I.,

Pennacchioni E., Teodori G., D'Agnolo C. (1989) Analisi comparative di trasporto solido in due bacini attrezzati delle Marche: il F. Esino ed il F. Musone. Conv. su: "Trasporto solido ed evoluzione morfologica nei corsi d'acqua". Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria, 9-10 Giugno 1988. Dip. Ingegneria Civile ed Ambientale, Trento.

Zemljic M. (1971) Calcul du debit solide. Evaluation de la vegetation comme un des facteurs antierosifs. Int. Symp. Interpraevent, Villach, B.2, Th IV.