

PROGRAMMA SPECIALE PER LA PROMOZIONE DELLA COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE TRA CNR, UNIVERSITÀ O ALTRE ISTITUZIONI SCIENTIFICHE PUBBLICHE ITALIANE ED ISTITUTI DI RICERCA STRANIERI ATTRAVERSO LA MOBILITÀ DI BREVE DURATA DI STUDIOSI E RICERCATORI ITALIANI E STRANIERI.

(SHORT-TERM MOBILITY - ANNO 2008)

RELAZIONE FINALE SULL'ATTIVITÀ SVOLTA PRESSO LA SEGUENTE ISTITUZIONE ESTERA:

*UNIVERSITY OF WESTERN AUSTRALIA - School of Environmental Systems Engineering
Crawley , Perth, Western Australia*

LINEA DI RICERCA: TERRA E AMBIENTE

TITOLO DELLA RICERCA:

Modellazione dei processi di distacco e trasporto di contaminanti in bacini sperimentali

(Modelling detachment and transport of contaminants in experimental catchments)

FRUITORE: Dott. Paolo PORTO



PROPONENTE: Prof. Massimo MENENTI

1 Premessa

L'asportazione della coltre superficiale dei suoli unitamente ai fenomeni di distacco dei nutrienti causati dai processi di erosione idrica determinano una perdita locale di fertilità del suolo (effetti on-site) (Palis et al., 1990). Il trasporto delle sostanze chimiche ed il loro successivo riversamento nei corpi idrici ricettori causano, a valle dei punti direttamente interessati dal fenomeno erosivo, problemi di inquinamento direttamente proporzionali alla quantità di sedimenti e quindi di nutrienti mobilitati (effetti off-site).

La quantità di sostanze chimiche presenti nei suoli in forma adsorbita sia nella frazione argillosa sia nella componente organica varia in relazione ai valori che assume la superficie specifica in tali componenti (Novotny e Chesters, 1989). Generalmente, ad una maggiore superficie specifica corrisponde una maggiore capacità di scambio e pertanto, una maggiore tendenza da parte delle componenti del suolo a stabilire legami intrinseci con tali sostanze.

La frazione argillosa del sedimento eroso, essendo caratterizzata da valori elevati della superficie specifica, costituisce pertanto uno dei siti di allocazione della maggior parte dei nutrienti e delle sostanze chimiche adsorbite (Young e Onstad, 1976), (Frere et al., 1977).

La relazione esistente tra la distribuzione granulometrica del sedimento eroso e del suolo originario traduce in primo luogo il processo di erosione selettiva operato dal deflusso superficiale e, pertanto, consente di spiegare l'incremento (enrichment) del carico di una certa sostanza chimica rispetto al valore presente nel suolo originario.

Il concetto di arricchimento in una data sostanza è correntemente espresso in relazione al contenuto in argilla di un suolo, alla sostanza organica e a tutte le sostanze chimiche adsorbite dalle particelle di suolo come l'azoto, il carbonio ed il fosforo (Young et al., 1986). Questo concetto può essere espresso utilizzando il rapporto di arricchimento (enrichment ratio) definito come il rapporto tra il contenuto di una assegnata frazione granulometrica (ad es. argilla) o di sostanza chimica (ad es. azoto) presente nel sedimento eroso ed il contenuto della stessa frazione presente nel suolo originario (Novotny e Chesters, 1989), (Di Stefano e Ferro, 2002). Tale ipotesi, con riferimento ad indagini svolte in laboratorio, è stata recentemente dimostrata in alcuni studi riguardanti l'impiego di traccianti (Cs-137 e Pb-210) nel tentativo di spiegare i processi di adsorbimento delle particelle di suolo nei confronti dei radionuclidi (He e Walling, 1996). Una sua estensione a contesti caratterizzati da condizioni al contorno meno controllate (indagini di campagna) ha consentito di stabilire un nesso tra la superficie specifica e la concentrazione di radionuclidi nel suolo originario e nei sedimenti raccolti alla sezione di chiusura di parcelle sperimentali (Porto et al., 2003). Tuttavia, i meccanismi che regolano i processi di distacco e trasferimento dei radionuclidi e dei nutrienti a scala di bacino rimangono, allo stato attuale delle ricerche, ancora inesplorati. Infatti, a scala di bacino, la relazione tra la distribuzione granulometrica del sedimento eroso e quella del suolo originario è condizionata anche dal possibile arresto delle frazioni grossolane (deposito selettivo) nelle aree di deposito (ad es. quelle pianeggianti) che le particelle erose, e trasportate, possono incontrare nel percorso idraulico dalla zona di produzione (sediment source) alla sezione di chiusura del bacino (Walling, 1983). Poiché i sedimenti, e le corrispondenti sostanze chimiche adsorbite, sono prodotti da aree (sediment sources) distribuite nel bacino, potrebbe risultare di grande interesse il tentativo di modellizzare il trasporto delle sostanze chimiche adsorbite facendo ricorso ad un approccio di tipo distribuito dei processi di trasferimento delle particelle di suolo (Ferro e Porto, 2000) e quindi di attenuazione del trasporto solido a scala di versante (sediment delivery).

2 Obiettivi

Obiettivo della ricerca svolta presso l'istituzione ospitante è stato quello di approfondire l'aspetto modellistico dei processi di distacco e trasferimento dei nutrienti, utilizzando un bacino sperimentale calabrese interessato da una copertura forestale di eucalitto.

In particolare, sono state determinate sia le distribuzioni spaziali delle concentrazioni di azoto, fosforo e carbonio totale sia le caratteristiche tessiturali (distribuzione granulometrica e superficie specifica) dei suoli costituenti il bacino. Ciò è stato effettuato utilizzando sia le misure di concentrazione delle differenti sostanze chimiche effettuate su campioni di suolo distribuiti sulla superficie del bacino sia la distribuzione spaziale della produzione di sedimenti determinata mediante un modello di trasferimento. I dati ricavati dall'analisi dei suoli sono stati utilmente confrontati con le informazioni equivalenti ottenute dalla raccolta e dall'analisi dei sedimenti campionati alla sezione di chiusura del bacino. Il confronto ha consentito di stabilire il legame tra il carico di inquinanti del materiale eroso e il contenuto di nutrienti nei suoli originari. Da tale indagine potranno essere derivate utili informazioni circa le modalità di distribuzione e le quantità di sostanze chimiche da somministrare alle colture nel rispetto di un equilibrio ambientale eco-compatibile.

3 Generalità

Molte sostanze chimiche presenti nei suoli si riscontrano in forma adsorbita sia nella componente tessiturale a bassa granulometria (argille) sia nella componente umica in relazione ai valori che in esse assume la superficie specifica (Novotny e Chesters, 1989). Pertanto, il destino seguito da tali sostanze è legato a quello che interessa le particelle di suolo soggette ai fenomeni di aggressività atmosferica (erosione, trasporto e deposito). Il meccanismo di distacco e trasferimento delle sostanze chimiche si innesca nel momento in cui le precipitazioni meteoriche raggiungono la superficie del suolo: alcune di queste sostanze vanno in soluzione e muovono trasportate dal deflusso superficiale mentre altre rimangono adsorbite alle particelle di suolo e muovono con esse.

La frazione argillosa del sedimento eroso, in virtù della sua elevata superficie specifica, ritiene la maggior parte dei nutrienti e delle sostanze chimiche adsorbite (Young e Onstad, 1976), (Frere et al., 1977) e, pertanto, conoscere in dettaglio la sua distribuzione granulometrica e confrontarla con quella del suolo da cui originariamente deriva risulta condizione indispensabile ai fini di una corretta modellazione della dinamica dei nutrienti a scala di bacino.

La differenza esistente tra la distribuzione granulometrica del sedimento eroso e quella del suolo originario, dovuta ai processi di erosione selettiva operata dalla corrente idrica, consente infatti di spiegare l'arricchimento (enrichment) del carico di una certa sostanza chimica rispetto al valore presente nel suolo originario.

Allo stato attuale delle ricerche, il concetto di arricchimento in una data sostanza è applicato al contenuto in argilla di un suolo, alla sostanza organica e a tutte le sostanze chimiche adsorbite dalle particelle di suolo come l'azoto ed il fosforo (Young et al., 1986). Questo concetto può essere espresso utilizzando il rapporto di arricchimento (enrichment ratio) definito come il rapporto tra il contenuto di una assegnata frazione granulometrica (ad es. argilla) o di sostanza chimica (ad es. azoto) presente nel sedimento eroso ed il contenuto della stessa frazione presente nel suolo originario (Novotny e Chesters, 1989), (Di Stefano e Ferro, 2002).

L'arricchimento del sedimento eroso nella frazione argillosa può essere considerato un processo a due fasi: l'arricchimento imputabile al trasferimento delle particelle dalla superficie del suolo alla corrente idrica che le veicola (particle entrainment) ed i fenomeni di rideposizione delle particelle grossolane (Novotny e Chesters, 1989).

La selettività delle particelle durante i processi erosivi può verificarsi sia perché la corrente interrill non ha una energia sufficiente a convogliare la maggior parte delle particelle più grossolane, spesso sotto forma di aggregati, sia perché gli aggregati stessi sono soggetti a processi di deposito preferenziale lungo i versanti. Tuttavia, quando la forma predominante di erosione è di tipo rill i processi di tipo selettivo sono poco verosimili dato che la rimozione dei sedimenti dai rill è, in genere, molto efficiente (Meyer et al., 1975). Non mancano i casi comunque in cui la granulometria dei sedimenti risulta anche più grossolana di quella che compete ai suoli originari (Porto et al., 2003). Ciò può verificarsi, ad esempio, in corrispondenza di eventi più gravosi che si verificano

successivamente ad una serie di eventi di bassa entità responsabili di una prima selezione del materiale eroso e quindi di un rivestimento della coltre superficiale del suolo di materiale più grossolano.

Ci sono in letteratura, comunque, pochi tentativi di stabilire la distribuzione granulometrica delle particelle veicolate lungo i versanti e gli elementi del reticolo idrografico di un bacino. Recentemente, Slattery e Burt (1997) hanno confrontato la distribuzione granulometrica effettiva e quella finale, ottenuta sottoponendo il campione ad un processo di rottura degli aggregati, di campioni di sedimento raccolti durante eventi meteorici che hanno provocato deflusso superficiale. Slattery e Burt (1997) hanno determinato che al crescere della portata il carico solido della corrente è costituito da particelle sempre più fine e sempre meno aggregate, probabilmente perché all'aumentare della portata si incrementa la turbolenza della corrente, in moto sul versante, che influenza il meccanismo di rottura degli aggregati.

A scala di bacino la relazione tra la distribuzione granulometrica del sedimento eroso e quella del suolo originario è condizionata anche dal possibile arresto delle frazioni grossolane (deposito selettivo) nelle aree di deposito (ad es. quelle pianeggianti) che le particelle erose, e trasportate, possono incontrare nel percorso idraulico dalla zona di produzione (sediment source) alla sezione di chiusura del bacino (Walling, 1983). Il deposito selettivo, per dimensione delle particelle, a cui il sedimento eroso può essere sottoposto nel trasporto lungo i versanti e nella rete idrografica può determinare, pertanto, un sedimento veicolato che è caratterizzato da una distribuzione granulometrica più fine, cioè arricchita nella componente argillosa, rispetto al suolo originario.

Nel passato, l'arricchimento di una certa sostanza chimica presente nel sedimento eroso è stato spesso attribuito alla selettività dei processi erosivi nei confronti delle frazioni più fine di un suolo senza tenere conto, pertanto, che la corrente in moto sul versante potrebbe essere incapace di trasportare micro e macro-aggregati che contengono una elevata percentuale di argilla. Alberts e Moldenhauer (1981), sulla base di misure condotte con una precipitazione simulata applicata a sei plot sperimentali, sono pervenuti alla conclusione che l'arricchimento dei nutrienti si verifica per tutte le classi dimensionali degli aggregati erosi considerati nella sperimentazione (2-1, 1-0.5, 0.5-0.21, 0.21-0.05 mm) ma con differenti livelli di arricchimento in dipendenza della capacità di trasporto della corrente ruscellante.

Poiché i sedimenti, e le corrispondenti sostanze chimiche adsorbite, sono prodotte da aree (sediment sources) distribuite nel bacino, Di Stefano et al. (2000) hanno suggerito di modellizzare il trasporto delle sostanze chimiche adsorbite facendo ricorso ad un approccio distribuito dei processi di attenuazione del trasporto solido a scala di versante (sediment delivery).

Le difficoltà di una modellazione process oriented o physically based dei processi di erosione (numerosi parametri di input, differenze tra la scala di misura dei parametri di input e la scala di discretizzazione del bacino, incertezza nelle equazioni utilizzate, etc.) ha incrementato l'attrattiva di un semplice modello parametrico come la RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) (Renard et al., 1994). Inoltre, allo stato attuale delle conoscenze, i modelli a base fisica forniscono stime della produzione di sedimenti che hanno un'affidabilità comparabile a quella ottenibile facendo ricorso alla RUSLE (Bingner, 1990), (Risse et al., 1993), (Renard et al., 1994) accoppiata con un criterio di disaggregazione spaziale dei processi di sediment delivery (Ferro e Minacapilli, 1995), (Ferro, 1997), (Ferro et al., 1998c), (Ferro e Porto, 2000).

Nella presente indagine, per un piccolo bacino calabrese interessato da una copertura forestale di eucalitto, viene anzitutto calibrato il modello SEDD attraverso il confronto tra i valori stimati di erosione netta con quelli misurati alla sezione di chiusura. Successivamente viene determinata la distribuzione spaziale del carico di azoto, fosforo e carbonio totale utilizzando sia le misure di concentrazione, delle differenti sostanze chimiche, effettuate sui campioni di suolo distribuiti sulla superficie del bacino sia la distribuzione spaziale della produzione di sedimenti determinata attraverso il modello opportunamente calibrato.

4 L'area di studio: il bacino sperimentale W2

Il micro-bacino W2, ubicato in provincia di Crotone (39°09'10''N, 17°08'10''E) e ricadente nel bacino del Torrente Crepacuore con foce sul Mar Ionio (**Fig. 1**), è gestito dall'Istituto per i Sistemi Agrari e Forestali per il Mediterraneo, Sezione Ecologia e Idrologia Forestale del CNR di Rende (Cs). Il bacino fu attrezzato nel 1978 nell'ambito della ricerca "Conservazione del Suolo" del CNR per verificare l'efficacia nel tempo degli eucalitteti e gli effetti conseguenti alla loro utilizzazione sulla difesa del suolo (Avolio et al., 1980; Iovino e Puglisi, 1991). Il bacino W2 presenta una superficie di 1.375 ha ed una altitudine variabile da 128 m s.l.m. a 85 m s.l.m..

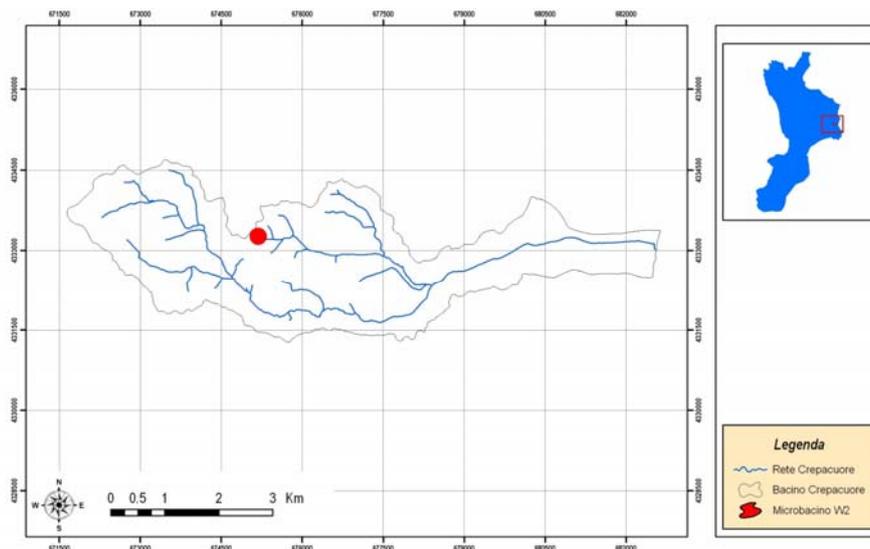


Fig. 1 - Area di studio

Le pendenze variano dal 12 al 69 %. Il suolo presenta una composizione granulometrica a prevalente contenuto di limo e argilla. Il clima, tipicamente mediterraneo, è caratterizzato da una precipitazione medio annua di circa 670 mm concentrata nei mesi autunno-invernali. Il bacino W2 è caratterizzato da una copertura di tipo boschivo derivante da rimboschimenti ad *Eucalyptus occidentalis*. Il soprassuolo si presenta come ceduo al secondo ciclo agamico: la prima ceduazione fu eseguita nel settembre 1978 su una fustaia di dieci anni, la seconda nel 1990. Il bacino è equipaggiato per la misura della piovosità con pluviografo meccanico a bascula con registratore del tipo a carta continua ed intervallo temporale di 20 min (**Fig. 2**).



Fig. 2 – Pluviografo a bascula per la misura delle precipitazioni

La sezione di chiusura è strumentata con un canale di misura del tipo “H-flume” (Brakensiek et al., 1979), in cui viene effettuata la misura del tirante idrico mediante un idrometrografo orizzontale di tipo meccanico con registratore a carta continua ed intervallo temporale di 30 min. All’estremità di valle è posizionato uno stramazzo di forma trapezoidale ad equazione nota, sotto il quale è presente un campionatore di torbide del tipo “Choshocton” (Fig. 3).



Fig. 3 – Edificio di misura dei deflussi e campionatore di torbide

La sospensione viene convogliata in vasche di raccolta (Fig. 4) di adeguate dimensioni (Cinnirella et al., 1998). Alla fine di ogni evento la sospensione raccolta è mescolata accuratamente e vengono prelevati campioni, del volume di un litro, a diverse quote del serbatoio e ne viene determinata la concentrazione solida ($g\ l^{-1}$) mediante essiccamento in stufa a $105\ C^{\circ}$.

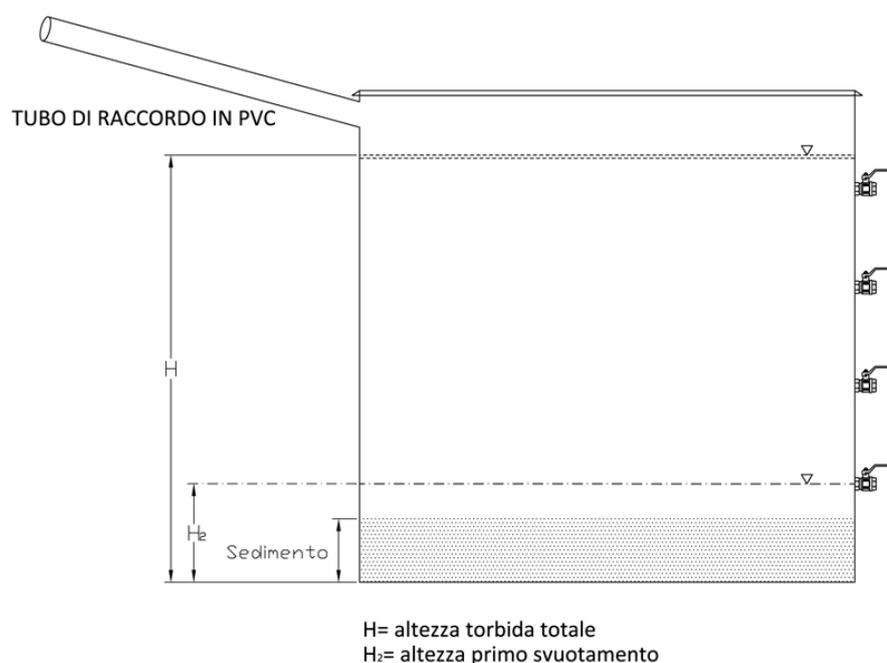


Fig. 4 – Schema relativo alle vasche di raccolta delle torbide

La produzione di sedimenti di ciascun evento è calcolata come prodotto della concentrazione media della sospensione e del volume totale di deflusso misurato dall'idrometrografo. Il valore annuo della produzione di sedimento viene quindi calcolato mediante la somma dei valori relativi a tutti gli eventi verificatisi nell'anno.

5 Le campagne di misura per la stima della produzione di sedimento e del contenuto di C, N e P.

Le indagini di campagna hanno riguardato due tipi di campionamento:

il primo, riguardante i sedimenti raccolti alla sezione di chiusura del bacino, ha richiesto diversi sopralluoghi, ciascuno dei quali condotto al termine di un evento piovoso, consistenti nel prelievo delle torbide secondo la metodologia descritta nel paragrafo precedente. Ciò ha consentito la conoscenza del peso di materiale eroso fuoriuscito dal bacino per un totale di 10 eventi naturali di pioggia verificatisi nel periodo 2005-2006;

il secondo, riguardante le caratteristiche chimico-fisiche dei suoli, ha richiesto il prelievo di 55 campioni di suolo scelti seguendo uno schema di campionamento a griglia (**Fig. 5**) curando di infittire la maglia nelle aree in cui il bacino mostrava una certa irregolarità morfologica e vegetazionale.

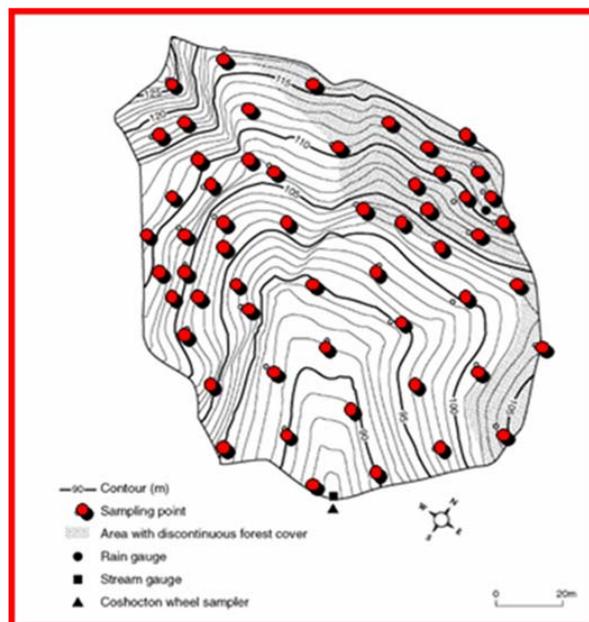


Fig. 5 – Schema di campionamento a griglia utilizzato per il prelievo dei suoli

6 Le analisi di laboratorio presso la University of Western Australia

L'attività svolta presso il laboratorio della University of Western Australia ha riguardato le seguenti fasi:

- 1) essiccazione di ciascun campione di suolo mediante stufa a 105°C per 24 ore;
- 2) stacciatura di ciascun campione a 2 mm e costruzione delle curve granulometriche;
- 3) stacciatura di ciascun campione a 63 µm e prelievo di sottocampioni di peso opportuno per analisi di azoto, carbonio e fosforo.

L'analisi tessiturale è stata effettuata seguendo una procedura di pretrattamento standard (mediante impiego di H₂O₂, cottura a 100°C, centrifugazione e trattamento con esametafosfato e carbonato di sodio) ed una apparecchiatura basata sulla tecnologia laser per il conteggio delle particelle di assegnate dimensioni. Tale dispositivo ha consentito la costruzione di 3 curve granulometriche complete per ciascun campione.

La procedura utilizzata per la determinazione del contenuto di fosforo totale nel terreno si basa su quella originariamente proposta da Mehta et al. (1954) che ha previsto l'impiego di HCl, varie fasi di centrifugazione, trattamento con idrossido di sodio, lettura allo spettrofotometro. Per ciascun campione sono state effettuate 3 ripetizioni.

Il contenuto di carbonio totale C e di azoto totale N è stato misurato utilizzando l'apparecchiatura Carlo-Erba C/N/S analyzer. L'analisi vera e propria è stata preceduta da una pesatura accurata dei campioni di suolo (di peso variabile tra i 20 e i 30 mg) e da una preliminare calibratura dello strumento mediante standard appositamente predisposti. Per ogni punto di misura sono state effettuate 3 ripetizioni in modo da tenere conto della variabilità degli stessi. In **Fig. 6** sono riportate le distribuzioni spaziali delle concentrazioni di fosforo totale (ppm), azoto totale (%) e carbonio totale (%) ricavate mediante interpolazione con procedura kriging delle misure di nutrienti nei 55 campioni esaminati.

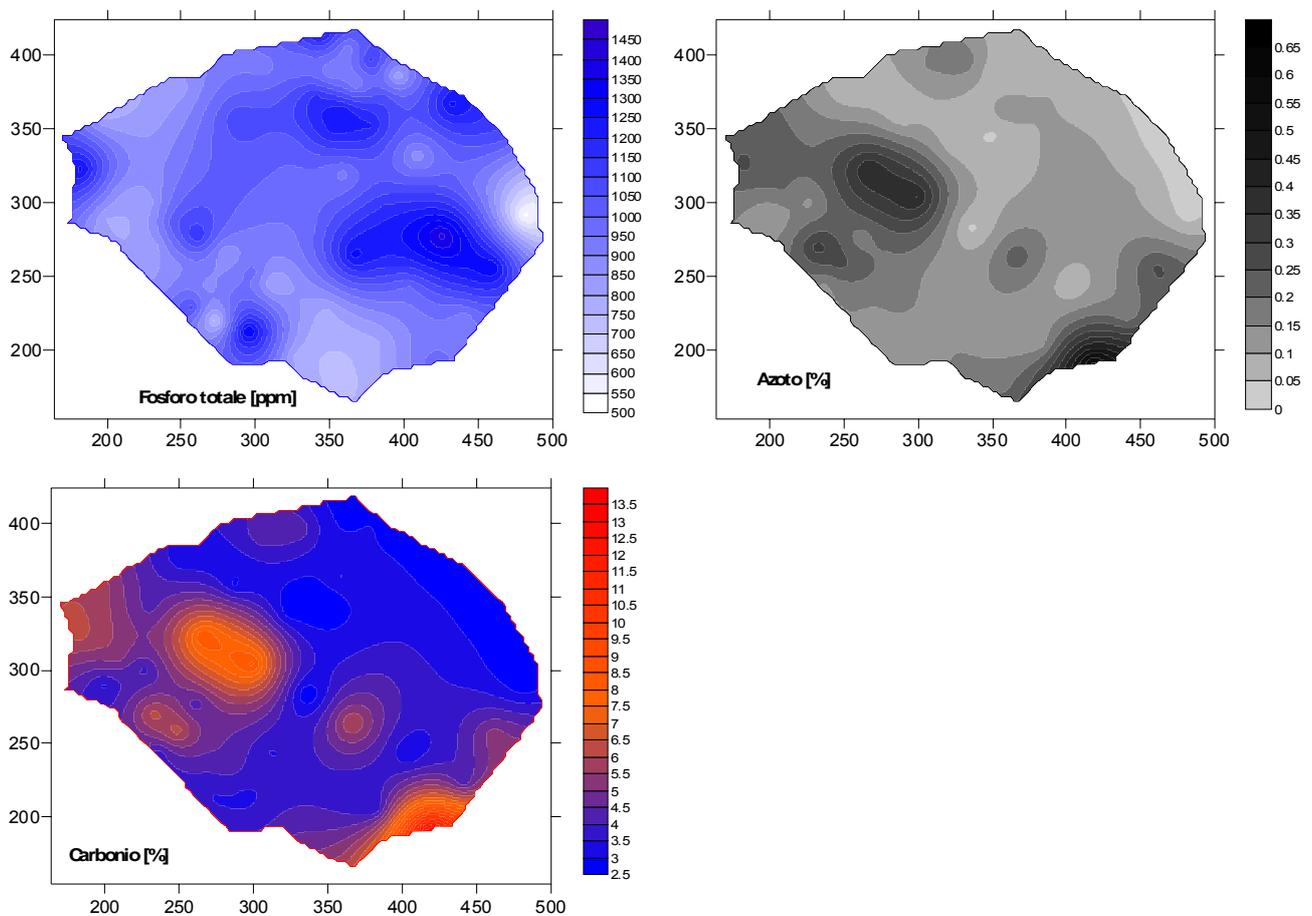


Fig. 6 – Distribuzione spaziale delle concentrazioni di fosforo azoto e carbonio dei suoli

Le tre figure evidenziano una sostanziale equivalenza tra i patterns di azoto e carbonio mentre suggeriscono una divergenza, rispetto ai precedenti, per le concentrazioni di fosforo.

7 Il modello di calcolo SEDD

Il modello SEDD (Sediment Delivery Distributed model) accoppia ad un approccio di tipo parametrico come la Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) un metodo di calcolo del coefficiente di resa solida. Per modellare la disaggregazione spaziale dei processi di trasferimento delle particelle solide, Ferro e Minacapilli (1995) hanno proposto di suddividere il bacino in unità morfologiche, cioè in aree di nota lunghezza di ruscellamento ed a pendenza ed esposizione costanti. Applicando uno schema di tipo Lagrangiano, le particelle sono seguite lungo il percorso idraulico che congiunge l'unità morfologica considerata con il più vicino elemento della rete

idrografica. La produzione di sedimenti di ciascuna unità morfologica è calcolata riducendo la perdita di suolo dell'unità mediante un appropriato coefficiente di resa solida (*Sediment Delivery Ratio*) (Ferro e Porto, 2000). Tale coefficiente SDR_i è calcolato mediante la seguente equazione:

$$SDR_i = \exp(-\beta t_{p,i}) = \exp\left(-\beta \frac{l_{p,i}}{\sqrt{s_{p,i}}}\right) = \exp\left[-\beta \left(\sum_{j=1}^{N_p} \frac{\lambda_{i,j}}{\sqrt{s_{i,j}}}\right)\right] \quad (1)$$

in cui $l_{p,i}$ e $s_{p,i}$ sono rispettivamente la lunghezza (m) e la pendenza ($m\ m^{-1}$) del percorso idraulico della singola unità morfologica che le particelle erose compiono per raggiungere il primo ramo della rete idrografica; β (m^{-1}) è un parametro specifico del modello (Ferro et al., 1998); N_p è il numero delle unità morfologiche localizzate lungo il percorso idraulico; $s_{i,j}$ e $\lambda_{i,j}$ sono rispettivamente la pendenza ($m\ m^{-1}$) e la lunghezza (m) di ogni unità morfologica i localizzata lungo il percorso idraulico j .

La produzione di sedimenti $Y_i(t)$, di ogni singola unità morfologica i in cui il bacino è stato diviso, viene calcolata tramite la seguente equazione:

$$Y_i = SDR_i A_i S U_i \quad (2)$$

in cui A_i è la perdita di suolo ($t\ ha^{-1}$) dalla i -esima unità morfologica, e $S U_i$ rappresenta la superficie (ha) dell'unità morfologica.

La perdita di suolo A_i viene calcolata tramite l'applicazione della RUSLE:

$$A_i = R_{t,i} K_i L_i S_i C_i P_i \quad (3)$$

dove $R_{t,i}$ rappresenta l'indice di aggressività della pioggia ad una data scala temporale t (evento, annua e media annua) della i -esima unità morfologica ($t\ ha^{-1}$ per unità di K_i); K_i il fattore di erodibilità del suolo stimato tramite la procedura proposta da Wischmeier et al. (1971) ($t\ ha^{-1}\ ha\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$); C_i il fattore colturale; P_i il fattore di pratiche antierosive; e $L_i S_i$ il fattore topografico. Quest'ultimo può essere calcolato usando l'espressione proposta da McCool et al. (1987):

$$LS_i = \left(\frac{\lambda_i}{22.13}\right)^{m_i} (10.8 \sin \alpha_i + 0.03) \quad \text{se } \tan \alpha_i < 0.09 \quad (4a)$$

$$LS_i = \left(\frac{\lambda_i}{22.13}\right)^{m_i} (16.8 \sin \alpha_i - 0.5) \quad \text{se } \tan \alpha_i \geq 0.09 \quad (4b)$$

avendo indicato con λ (m) la lunghezza della pendice, α ($^\circ$) l'inclinazione della pendice ed m un coefficiente fornito dalla seguente espressione (McCool et al., 1989):

$$m_i = \frac{f_i}{1+f_i} \quad (5)$$

in cui f rappresenta il rapporto tra l'erosione *rill* e quella *interrill* ed assume il valore fornito dalla formula seguente:

$$f_i = \frac{\sin \alpha_i}{0.0896 (3 \sin^{0.8} \alpha_i + 0.56)} \quad (6)$$

con i simboli noti. La stima della produzione di sedimento Y_S per l'intero bacino risulta pari alla somma della produzione di sedimento Y_i di tutte le unità morfologiche in cui è stato suddiviso. In formula:

$$Y_S = \sum_{i=1}^{N_u} Y_i = R_i \sum_{i=1}^{N_u} K_i C_i L_i S_i \exp\left(-\beta \frac{l_{p,i}}{\sqrt{s_{p,i}}}\right) S U_i \quad (7)$$

La stima del coefficiente β rappresenta un punto cruciale per l'applicazione del modello SEDD. Infatti β dipende principalmente dai parametri morfologici del bacino (Ferro, 1997) ma risulta influenzato anche dalla distribuzione granulometrica del suolo e dai processi di overland flow (Ferro e Porto, 2000). In una precedente analisi Ferro e Porto (2000) hanno mostrato che il coefficiente β segue una legge di distribuzione di tipo normale e pertanto il valore mediano β_m dei valori stimati di β_e è stato assunto, per il periodo 1978-1997, come rappresentativo dei processi di erosione e trasporto a lungo termine. Lo stesso approccio è stato seguito a scala annua pervenendo ad un valore rappresentativo di β_a per lo stesso periodo. Allo scopo di testare un ulteriore criterio di stima dei coefficienti β_e e β_a è stato seguito un secondo tipo di approccio che mette in relazione gli stessi parametri con il coefficiente di deflusso $RC_{e,a}$ rappresentante il rapporto tra il volume di deflusso $D_{e,a}$ (mm) ed il corrispondente valore di precipitazione $A_{e,a}$ (mm) (avendo indicato con i i simboli al pedice e,a i valori corrispondenti alla scala di evento o, alternativamente, a quella annua). La relazione esistente tra $\beta_{e,a}$ e $RC_{e,a}$ può essere espressa tramite la seguente forma matematica:

$$\beta_{e,a} = c + d \ln RC_{e,a} \quad (8)$$

in cui c e d sono due coefficienti risultanti dal migliore adattamento tra i dati misurati e quelli calcolati di produzione di sedimenti. La (8), con riferimento a 55 eventi acquisiti durante il periodo di funzionamento del bacino compreso tra il 1978 ed il 1994, ha mostrato una maggiore affidabilità rispetto all'approccio che fa uso del valore mediano del coefficiente di taratura (Callegari et al., 2007).

8 L'applicazione del modello di calcolo SEDD e la determinazione del carico inquinante

Nella presente indagine l'eq. (7), accoppiata all'eq. (8) per la stima di β_e , è stata applicata per stimare la produzione di sedimento corrispondente a 10 eventi di pioggia acquisiti durante il periodo compreso tra dicembre 2005 e gennaio 2007. Tali stime sono state utilmente confrontate con le misure di produzione di sedimento relative agli stessi eventi piovosi con l'obiettivo di verificare preliminarmente l'affidabilità del modello sulla perdita di suolo. Il confronto tra misure e stime di produzione di sedimento, riportato in **Fig. 7**, conferma l'abilità predittiva del modello SEDD.

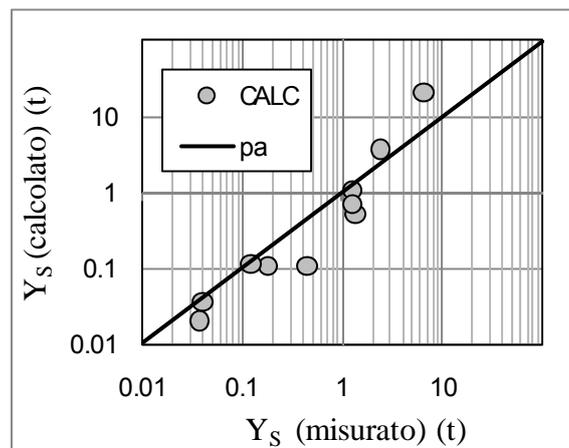


Fig. 7 – Confronto tra misure di produzione di sedimento e valori stimati dal SEDD

I valori riportati in **Fig. 7** sono ovviamente riferiti alla sezione di chiusura del bacino in corrispondenza alla quale sono stati campionati i sedimenti. Pertanto, come spiegato dall'eq. (7),

questi valori rappresentano i risultati, a scala di evento, della sommatoria dei contributi di produzione di sedimento di ciascuna delle 38 unità morfologiche in cui è stato diviso il bacino (Ferro & Porto, 2000). Tali contributi, moltiplicati per i valori di concentrazione dei nutrienti misurati nei suoli consentono di stabilire il carico di nutrienti corrispondente. In altri termini, sovrapponendo i contorni di ciascuna unità morfologica alle mappe di Fig. 6 è stato ricavato il valore rappresentativo della concentrazione di P, N e C per ogni unità. Tale valore, moltiplicato per il valore di erosione netta stimato dal SEDD nell'area corrispondente, ha consentito di pervenire al carico di nutrienti in uscita da ciascuna unità. Confrontando le 10 sommatorie (1 per ciascun evento) dei 38 valori di carico in uscita con il carico misurato nei sedimenti è stato possibile ottenere informazioni circa la parentela tra il contenuto di nutrienti nei suoli originari e quello effettivamente fuoriuscito dal bacino attraverso i sedimenti. Il confronto, per ciascun nutriente, tra il carico misurato alla sezione di chiusura e quello stimato dal modello SEDD sommando il contributo di ciascuna unità morfologica, è riportato in Fig. 8.

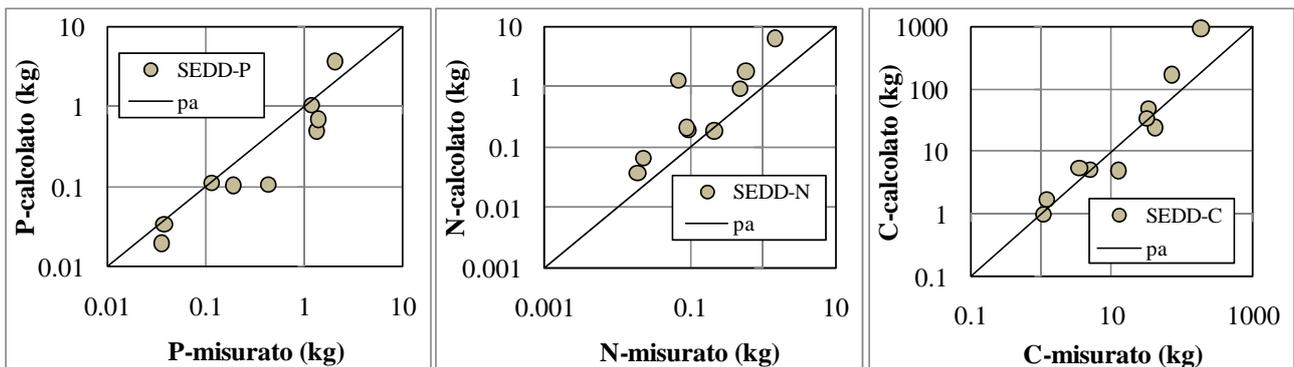


Fig. 8 – Confronto tra misure di carico di nutrienti alla sezione di chiusura e valori stimati dal SEDD

I grafici in Fig. 8, per la loro modalità di deduzione, dovrebbero mostrare una sostanziale equivalenza tra i dati misurati e stimati dal modello, essendo quest'ultimo, appositamente calibrato per il bacino in esame. Tuttavia, i punti individuati dai confronti mostrano una dipartita dalla linea di perfetto accordo evidenziando una sottostima per i valori di fosforo e una sovrastima per azoto e carbonio.

Al fine di indagare le ragioni di tale dipartita si è pensato di ricorrere alle informazioni ottenute dalle indagini tessiturali relative sia ai suoli originari sia ai sedimenti. In particolare, dalle curve granulometriche ottenute per i 55 campioni di suolo e i 10 campioni di sedimento sono state ricavate le corrispondenti superfici specifiche (SSA). I 10 rapporti tra il valore di SSA di ciascun evento con il valore medio di SSA relativo ai suoli sono stati messi a confronto con i 10 rapporti tra valori misurati e stimati del carico solido (Fig. 9) al fine di stimare il fattore di correzione corrispondente.

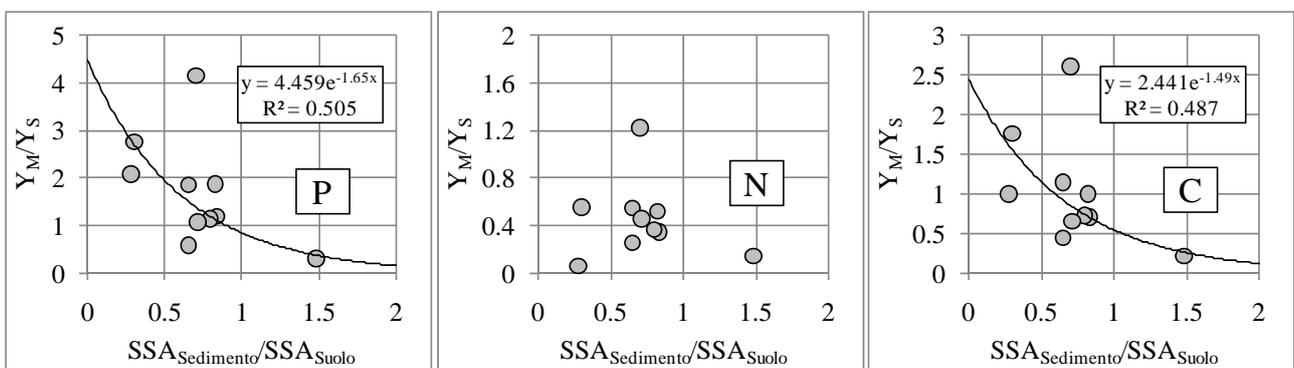


Fig. 9 – Confronto tra carico di nutrienti e superficie specifica delle particelle

I grafici di **Fig. 9**, eccezion fatta per l'azoto (figura centrale), evidenziano la presenza di un trend tra le coppie di valori anzidette lasciando intravedere una certa influenza da parte della granulometria sui rapporti di assorbimento dei nutrienti. Pertanto, utilizzando le equazioni delle curve interpolanti riportate in nei grafici corrispondenti al fosforo ed al carbonio, sono stati stimati i 10 corrispondenti valori del fattore di correzione. Infine, i valori di produzione di sedimento ricavati dal SEDD sono stati moltiplicati per tale fattore al fine di correggere le stime di primo tentativo. I confronti finali tra carico solido misurato e calcolato (solo per i casi di P e C) sono riportati in **Fig. 10**.

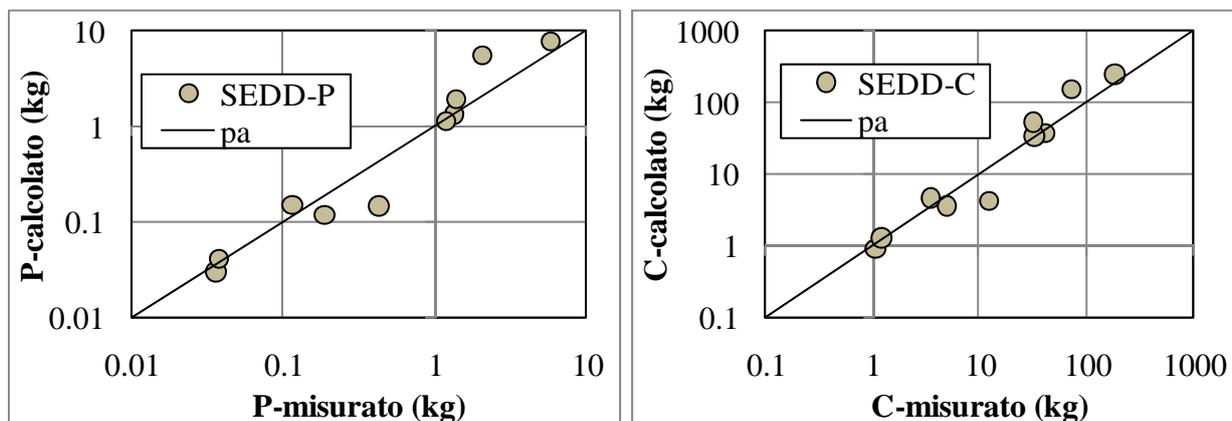


Fig. 10 – Confronto tra misure di carico di nutrienti alla sezione di chiusura e valori corretti stimati dal SEDD

I grafici di **Fig. 10** mostrano un sensibile miglioramento delle stime rispetto a quanto evidenziato nei grafici corrispondenti di **Fig. 8** in cui non era stato applicato il fattore di correzione granulometrico.

9 Conclusioni

Sebbene il numero ridotto di eventi analizzati in questa indagine non consenta di effettuare appropriati test statistici per verificare le ipotesi formulate in precedenza, il ruolo assunto dalla differente granulometria dei suoli e dei sedimenti sembrerebbe importante ai fini della stima del carico di nutrienti in uscita da un bacino. Tuttavia, quanto ricavato nella presente analisi, pur essendo soddisfacente per il caso di fosforo e carbonio, non chiarisce il comportamento associato all'azoto che non manifesta la stessa tendenza di P e C. Tuttavia, il rapporto tra le concentrazioni di N nel sedimento e nel suolo evidenzia un trend abbastanza netto con il rapporto tra le superfici specifiche corrispondenti (**Fig. 11**).

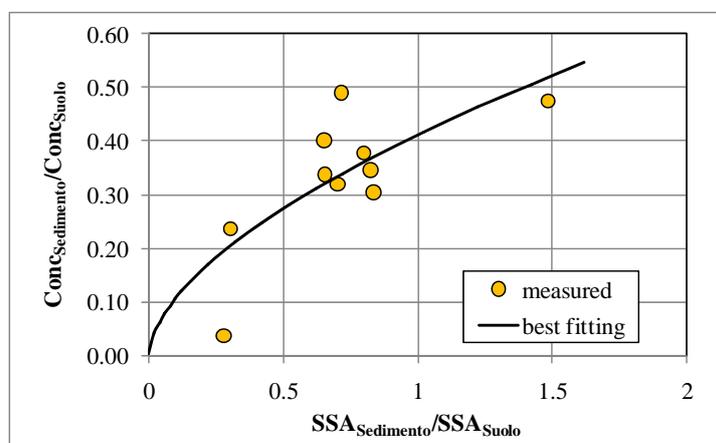


Fig. 11 – Confronto tra il rapporto di concentrazioni di N e le superfici specifiche corrispondenti al sedimento ed al suolo

Pertanto, la dispersione evidenziata dal grafico centrale di **Fig. 9** potrebbe essere dovuta anche ad una dimensione campionaria ancora non sufficiente per trarre delle conclusioni definitive circa il comportamento di N. Di conseguenza, risulta necessario approfondire le analisi fin qui condotte analizzando un maggior numero di eventi e estendendo ove possibile le indagini ad ulteriori siti sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- Callegari G., Catona F., Ferro V., Porto P. (2007). Validating SEDiment Delivery Distributed (SEDD) model in a small Calabrian basin. Accettato per la pubblicazione su *Advances in GeoEcology*, 41 (in stampa).
- Di Stefano C., Ferro V. (2002). Linking clay enrichment and sediment delivery processes. *Biosystems Engineering*, 81, 4, 465-479.
- Ferro V., Porto P. (2000). Sediment delivery distributed (SEDD) model. *Journal of Hydrological Engineering, ASCE*, 5, 4, 411-422.
- Frere M.H., Woolhiser D. A., Caro J.H., Stewart B.A., Wischmeier W.H. (1977). Control of nonpoint water pollution from agriculture: some concepts. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32, 260-264.
- He, Q., Walling, D.E. (1996). Interpreting particle size effects in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments. *J. Environ. Radioactivity*, Vol. 30(2): 117-137.
- Novotny V., Chesters G. (1989). Delivery of sediment and pollutants from non-point sources: a water quality perspective. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44, 6, 568-576.
- Palis R.G., Okwach G., Rose C.W., Saffigna P.G. (1990). Soil erosion processes and nutrient loss. I. The interpretation of enrichment ratio and nitrogen loss in runoff sediment. *Australian Journal of Soil Research*, 28, 623-639.
- Porto, P., Walling, D.E., Tamburino, V., Callegari, G. (2003). Relating Caesium-137 and Soil Loss from Cultivated Land. *Catena*, Vol. 53: 303-326.
- Walling D.E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65, 209-237.
- Young R.A., Onstad C.A. (1976). Predicting particle-size composition of eroded soil. *Transactions of the ASAE*, 19, 1071-1075.
- Young R.A., Olness A.E., Mutchler C.K., Moldenhauer W.C. (1986). Chemical and physical enrichments of sediment from cropland. *Transactions of the ASAE*, 29, 1, 165-169.