



Provincia di Udine
Provincie di Udin

Il rilievo geomorfologico dei corsi d'acqua *La loro evoluzione e stima del trasporto solido*

Udine, 1 dicembre 2006

Comprensione dei meccanismi del trasporto solido in ambiente montano

Lorenzo Marchi

Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica
(CNR IRPI)

lorenzo.marchi@irpi.cnr.it

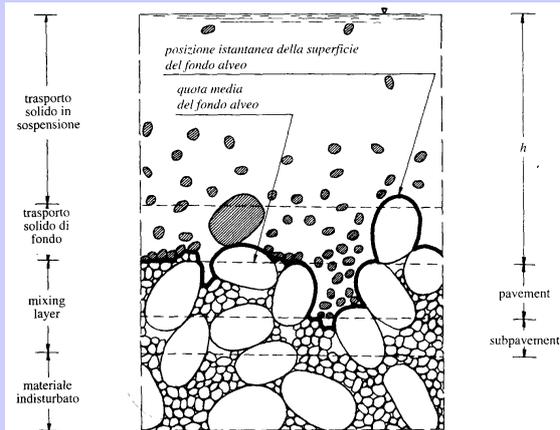


Classificazione e fenomenologia dei processi torrentizi

colate detritiche (*debris flow*) e piene
con trasporto solido

↓
diversa concentrazione solida

↓
diverso comportamento reologico



Colate detritiche: miscele solido-liquide ad elevata concentrazione (in prima approssimazione fluidi monofasici) - acqua e solidi si muovono con la stessa velocità.

Piène idriche con trasporto solido: il sedimento trasportato al fondo ha velocità diversa da quella dell'acqua con sedimento in sospensione in cui è immerso.

Lorenzo Marchi
(CNR IRPI Padova)

Trasporto AL FONDO e IN SOSPENSIONE

Main hydrological and sedimentological data of recorded floods

R , runoff; Q_p , peak discharge; T , estimated recurrence interval for Q_p ; Y_b , total amount of deposited coarse bedload; Y_s , total amount of suspended sediment; P_s , suspended sediment as a percentage of total sediment transport; $S.S.C._{max}$, maximum suspended sediment concentration; (1) and (2), first and second part of the flood.

Flood	June 17, 1991	October 5, 1992	October 2, 1993	July 18, 1994	September 14, 1994 ⁽¹⁾	September 14, 1994 ⁽²⁾	August 13, 1995	October 15, 1996
R (10^3 m^3)	134.84	126.78	130.70	11.18	17.52	195.86	21.25	243.13
Q_p ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	4.00	2.90	4.30	1.80	3.74	10.4	2.72	2.96
T (years)	2-3	1-2	3	1	2	30-50	1-2	1-2
Y_b (kg)	66,768	15,922	17,462	0	17,120	1,523,680	10,614	94,673
Y_s (kg)	44,267	3041	26,656	28,661	198,000	1,385,000 ^a	63,875	191,322
P_s (%)	40	16	60	100	92	48	86	67
$S.S.C._{max}$ (g l^{-1})	3.7	1.2	1.7	7.8	30.0	57.9	6.6	15.5

^aApproximate value: continuous records not available for the final part of the recession limb.

Pierson e Costa, 1987

Una classificazione sulla base della reologia dei fenomeni.

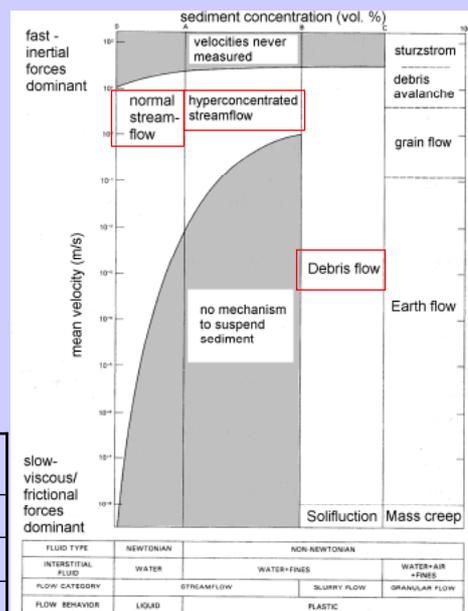
Concentrazione del sedimento e velocità.

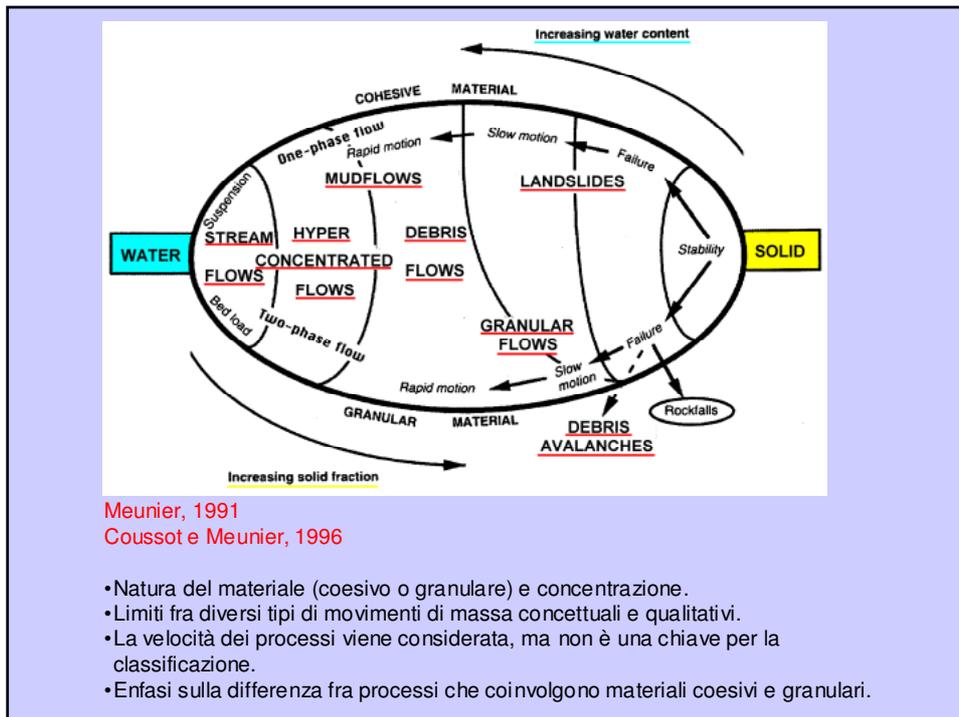
I limiti indicati nel diagramma sono approssimati e solo in parte derivano da osservazioni sperimentali.

Concentrazione solida in volume:

$$C_v = \frac{V_s}{V}$$

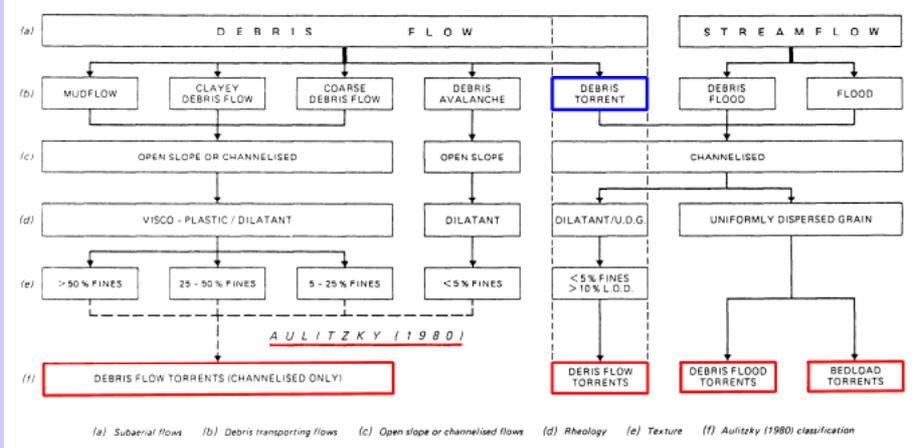
Flow	C_v (%)	Density (g/cm^3)
Water flood	0 - 20	1.0 - 1.33
Hyperc. flow	20 - 47	1.33 - 1.80
Debris flow	47 - 77	1.80 - 2.30





Materiale	Contenuto d'acqua	Condizioni particolari	Velocità	Denominazione
Detrito	saturo	canale ben definito contenuto idrico; accresciuto rispetto al materiale in situ	estremamente rapido	Colata di detrito (Debris flow)
Fango	limite di liquidità o superiore	colata di detrito fine	molto rapido	Colata di fango (Mud flow)
Detrito	presenza di acqua "libera"	piena	estremamente rapido	Piena di detriti (Debris flood)
Detrito	variabile	assenza di canale ben definito; area sorgente ripida e relativamente superficiale	estremamente rapido	Valanga di detrito (Debris avalanche)
Rocce frammentate	variabile, spesso materiale asciutto	roccia intatta nella zona sorgente; grandi volumi	estremamente rapido	Valanga di roccia (Rock avalanche)

Hungar et al. (2001); la classificazione comprende anche altri fenomeni franosi.



Slymaker, 1988

Riprende in parte una precedente classificazione di Aulitzky, fornendo un inquadramento a colate detritiche canalizzate, povere di argilla e ricche di materiale organico, definite *debris torrent*.

Termine utilizzato in Usa Nord-occidentali e Canada e ritenuto equivoco da altri autori (Pierson e Costa, 1987).

Trasporto di detrito legnoso grossolano

Il fenomeno del trasporto di legname durante un evento di piena può assumere caratteristiche estremamente variabili:

- *trasporti in massa o congestionati*
- *elementi flottanti singoli e non congestionati*

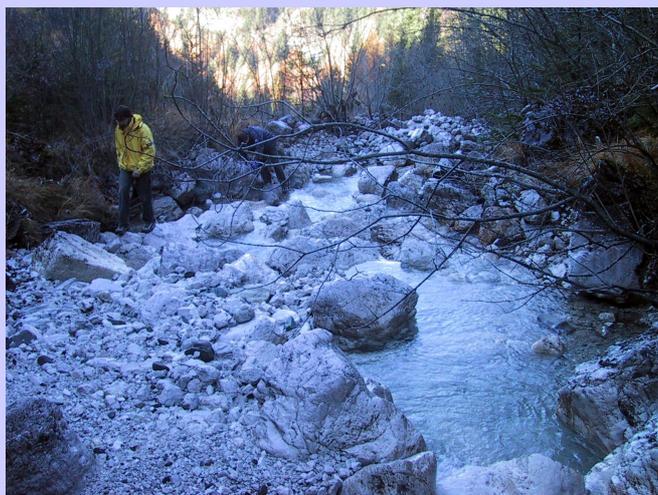
Il legname flottante, spesso sottovalutato o trascurato in fase progettuale, può rappresentare un serio pericolo:

- può **aumentare la portata totale** fino a 1/5 rispetto a quella liquida e solida "ordinaria" (+ 20%)
- può formare **ostruzioni** lungo i collettori (dighe temporanee) che, in seguito alla loro successiva rottura, possono provocare notevoli **picchi di piena con trasporto solido o a colate detritiche**.

Trasporto di detrito legnoso grossolano



Alvei interessati da piene idriche con trasporto solido



Piena con trasporto solido: osservazioni post-evento

Val Racines (BZ), 1989



morfologia depositi

- caratteristiche sedimentologiche
- distinzione fra i depositi e le zone non interessate

Canali interessati da colate detritiche – caratteri distintivi dei depositi



Depositi di piena iperconcentrata – piena di detriti



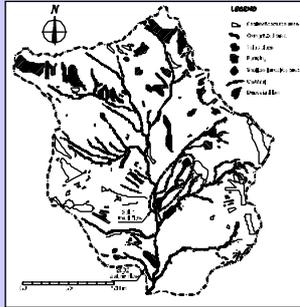
Quali caratteri distintivi?

Fenomenologia dei processi di trasporto solido ed aspetti quantitativi: studi in bacini attrezzati

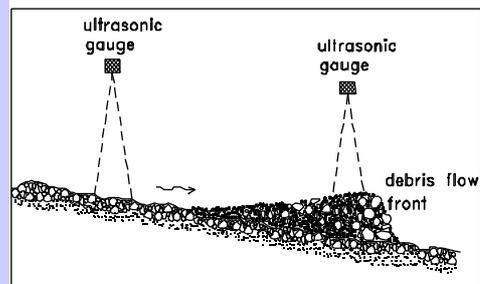
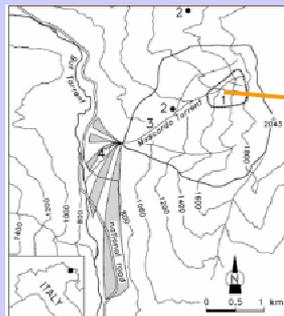
Vantaggi dello studio del trasporto solido in piccoli bacini attrezzati

- Raccolta di dati quantitativi di elevata qualità
- Possibilità di studiare l'evoluzione della dinamica del sedimento a scala pluriennale
- Opportunità di concentrare negli stessi bacini ricerche afferenti anche ad altre discipline

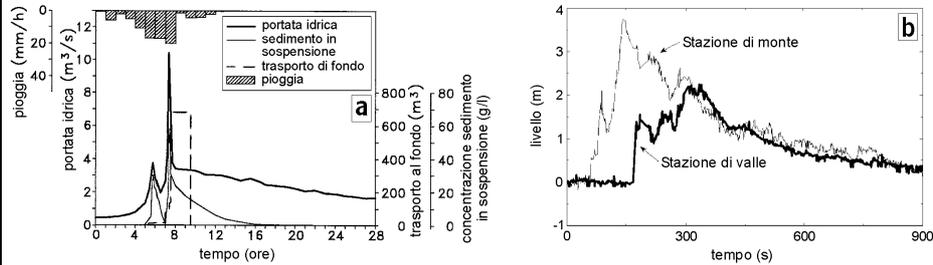
Rio Cordon (Dolomiti Venete)



Torrente Moscardo (Alpi Carniche)



Fenomenologia dei processi torrentizi



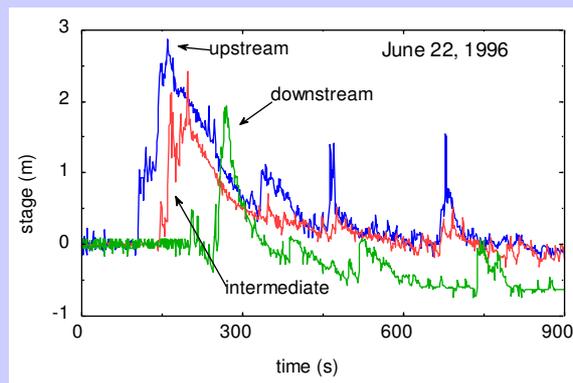
Piena con trasporto solido
(Rio Cordon, Dolomiti)

Colata detritica
(Torrente Moscardo, Alpi Carniche)

Colata detritica: minor durata complessiva;
tempo al colmo molto più breve

Piena con trasporto solido: possibile misurare separatamente i deflussi liquidi,
il trasporto in sospensione e quello al fondo.

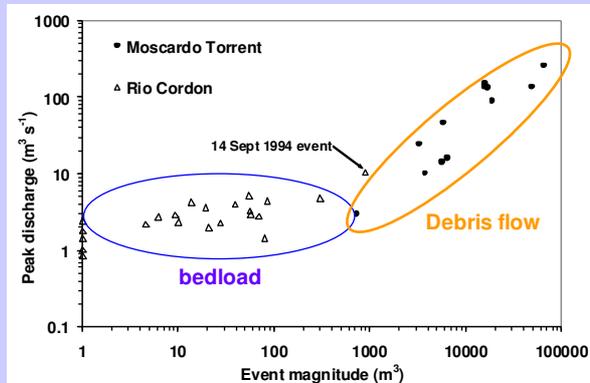
Idrogrammi delle colate detritiche



Gli "idrogrammi" delle colate detritiche presentano caratteristiche particolari. E' tipica la breve durata del ramo ascendente, che corrisponde all'improvviso presentarsi del fronte (*snout*) della colata. Si riconosce talvolta un'onda iniziale (*precursory surge*), spesso costituita da una miscela a concentrazione più bassa, che precede il fronte. In corrispondenza del picco della colata si ha la maggior concentrazione di massi di grosse dimensioni. Nella fase discendente dell'idrogramma si manifestano spesso delle onde secondarie.

Relazioni fra volumi trasportati (*magnitude*) e portate di picco

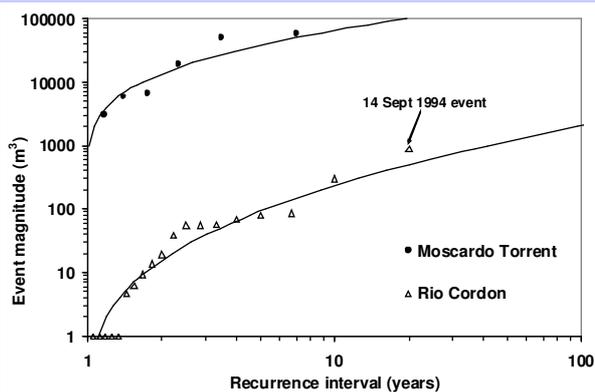
Bacini di dimensioni simili:
non è stato necessario
rapportare i valori alle
superfici



- Emerge una certa continuità fra gli andamenti della relazione nei due bacini (trasporto al fondo per il Cordon, colate detritiche per il Moscardo), anche se l'assenza di sovrapposizione non permette di trarre conclusioni definitive
- L'aumento delle portate di picco all'aumentare dei volumi è molto più rapido per il Moscardo e la relazione fra le due variabili è più stretta
- Nel Rio Cordon, solo la piena del settembre 1994 raggiunge volumi di trasporto confrontabili ai più piccoli eventi registrati nel torrente Moscardo (circa 1,000 m³)

Relazioni fra volumi trasportati e frequenza degli eventi

Volumi massimi annuali
trasportati in un singolo
evento – regolarizzazione
con la distribuzione log-
normale.



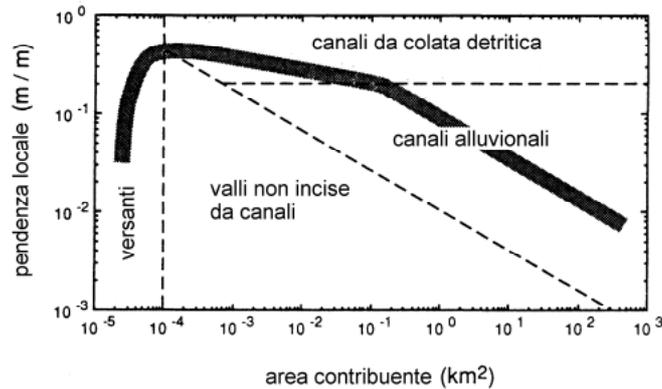
I volumi di sedimento trasportati dal Rio Cordon (trasporto al fondo) sono di gran lunga inferiori a quelli mobilizzati in forma di colate detritiche nel torrente Moscardo (circa 3 ordini di grandezza)

- Rio Cordon: pendenza dell'alveo inferiore al torrente Moscardo e profilo "a gradini" (alternanza di tratti a diversa pendenza)
- Le condizioni di alimentazione solida differiscono nettamente nei due bacini:
 - disponibilità di sedimento limitata nel bacino del Rio Cordon;
 - quantità di detrito illimitate presenti nel bacino del torrente Moscardo

Variabilità spaziale dei processi

In uno stesso bacino è possibile riconoscere tratti della rete idrografica nei quali le colate detritiche rappresentano il processo di trasporto dominante ed altri interessati unicamente da piene idriche con trasporto solido.

In termini generali, la predominanza dei due processi è controllata dai relativi rapporti fra pendenza locale ed estensione dell'area presente a monte



(Da Montgomery e Fofoula-Georgiou, 1993)

Lorenzo Marchi
(CNR IRPI Padova)

Variabilità spaziale dei processi

Jof di Montasio (UD),
settembre 1993

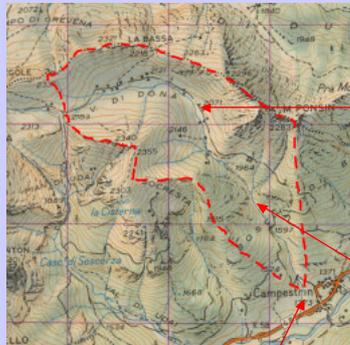
- Zona di innesco (collasso di una morena) colata detritica;
- Depositi di colata detritica in corrispondenza di una diminuzione di pendenza;
- Formazione di un conoide alluvionale: non colata detritica; piena iperconcentrata ?



Variabilità spaziale dei processi

Possibile una diversa successione, da monte a valle, dei tratti di rete idrografica interessati dai vari processi di trasporto del sedimento.

1. Parte superiore del torrente: bassa pendenza, solo piena idrica.
2. Parte intermedia: forti pendenze, instabilità spondale ed erosione d'alveo, colata detritica.
3. Depositi di colata detritica sul conoide.



Bacino del Rio Dona
(Val di Fassa, TN,
evento del luglio 1989)

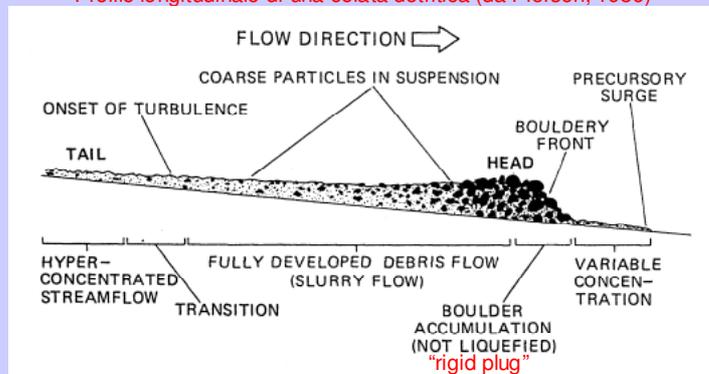
Variabilità temporale dei processi

Le colate detritiche si manifestano tipicamente attraverso pulsazioni, con l'improvvisa comparsa di onde caratterizzate da un fronte ripido e ben definito.

Le singole pulsazioni sono solitamente di breve durata ma possono succedersi, intervallate da brevi periodi di stasi, anche per parecchie ore o per più giorni.

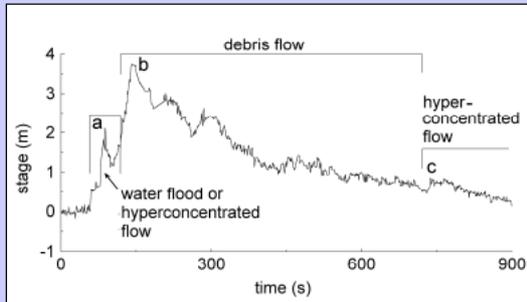
La presenza di numerose pulsazioni può essere espressione delle caratteristiche idrauliche del fenomeno o, in alcuni casi, può essere dovuta al fatto che l'apporto di materiale solido è dato da fenomeni franosi di grandi dimensioni.

Profilo longitudinale di una colata detritica (da Pierson, 1986)



Lorenzo Marchi
(CNR IRPI Padova)

Variabilità temporale dei processi



Variabilità temporale dei processi



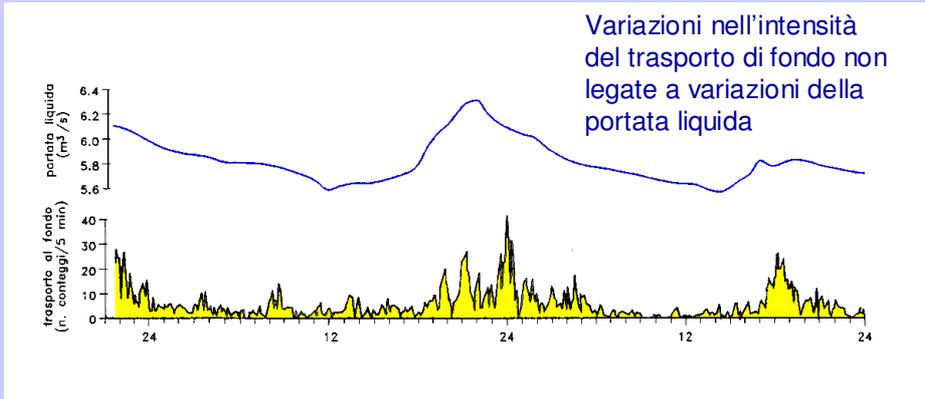
Nella fase terminale di una colata detritica, la concentrazione risulta solitamente bassa ed il fluido ha spesso le caratteristiche di una corrente iperconcentrata o di una corrente idrica con trasporto solido.

In questa fase si ha spesso una parziale erosione del materiale depositato nelle fasi precedenti del fenomeno. Per tale ragione, spesso si osservano i depositi lasciati dalla corrente fuori dall'alveo ed ai lati dello stesso, mentre quelle all'interno del canale risultano asportati.

Variabilità temporale dei processi
 carattere pulsativo del trasporto di fondo

Squaw Creek (USA)

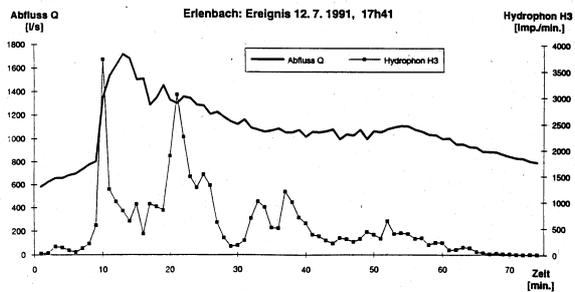
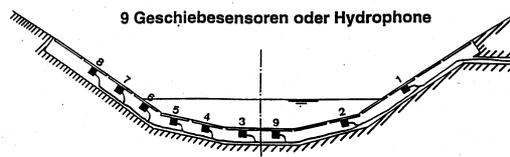
Misura del trasporto solido di fondo per mezzo di traccianti magnetici



Erlenbach (CH)

Idrofoni: studio delle variazioni temporali del trasporto solido

Variabilità temporale dei processi
 carattere pulsativo del trasporto di fondo

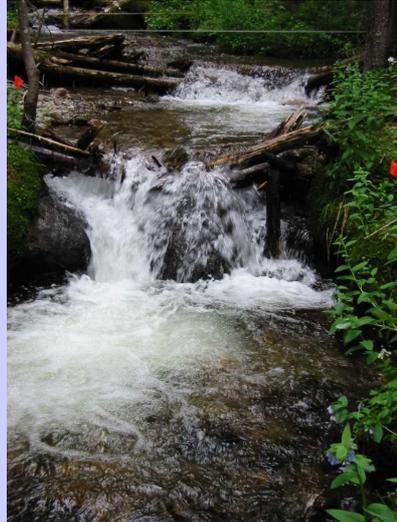


Assetto morfologico degli alvei

Condizionamento esercitato dalla dinamica del sedimento nei corsi d'acqua montani a forte pendenza condizionano sull'assetto morfologico degli alvei.

Torrenti con trasporto al fondo ed in sospensione: frequente presenza di forme di fondo ben definite e correlabili alla pendenza locale, alla larghezza del canale e alle granulometrie dominanti.

Esempio: morfologie a gradinata (*step-pool*)



Lorenzo Marchi
(CNR IRPI Padova)

Assetto morfologico degli alvei

Torrenti interessati da colate detritiche: solitamente non presentano forme di fondo chiaramente riconoscibili.

Zone di deposito: i forti apporti detritici da monte sono in grado di sommergere le forme di fondo eventualmente presenti.

Tratti d'alveo in erosione: distruzione dell'assetto morfologico dell'alveo (fino alla completa asportazione della copertura detritica presente prima dell'evento).



Assetto morfologico degli alvei

Forme di fondo relativamente stabili in torrenti interessati da colate detritiche.

Possono svilupparsi se, fra due successivi eventi, si verificano piene idriche con trasporto solido in grado di modificare l'assetto caotico e non strutturato che l'alveo.



Determinazione a scala di evento dei volumi trasportati

Trasporto al fondo

- Valutazione della disponibilità di sedimento ed applicazione di formule per la capacità di trasporto

Colate detritiche

- Elaborazione probabilistica di dati storici
- Formule empiriche e semi-empiriche
- Osservazioni geomorfologiche di terreno e confronto con i volumi solidi mobilizzabili valutati su base idrologica

Capacità di trasporto → Schoklitsch (1962)

$$Q_s = \frac{2.5}{\rho_s / \rho} S^{3/2} (Q - Q_c) \cong 0.94 S^{3/2} (Q - Q_c)$$

- Q: portata liquida (m³/s);
Q_c: portata critica di inizio del trasporto (m³/s);
Q_s: portata solida (m³/s);
S: pendenza fondo (meglio della linea dell'energia) (m/m)
ρ_s: densità dei sedimenti (2600 – 2700 kg/m³);
ρ: densità dell'acqua (1000 kg/m³)

$$Q_c = 0.26 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{5/3} \frac{D_{40}^{1.5}}{S^{7/6}} B \cong 0.60 B \frac{D_{40}^{1.5}}{S^{7/6}}$$

B: larghezza del letto (m)

Capacità di trasporto → Smart e Jaeggy (1983)

$$q_s = 4 \left(\frac{D_{90}}{D_{30}} \right)^{0.2} \frac{1}{\frac{\rho_s}{\rho} - 1} q S^{1.6} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau} \right)$$

- q: portata liquida unitaria; q=Q/B (m²/s);
q_s: portata solida unitaria; q_s=Q_s/B (m²/s);
τ: sforzo tangenziale medio;
τ_c: sforzo tangenziale critico

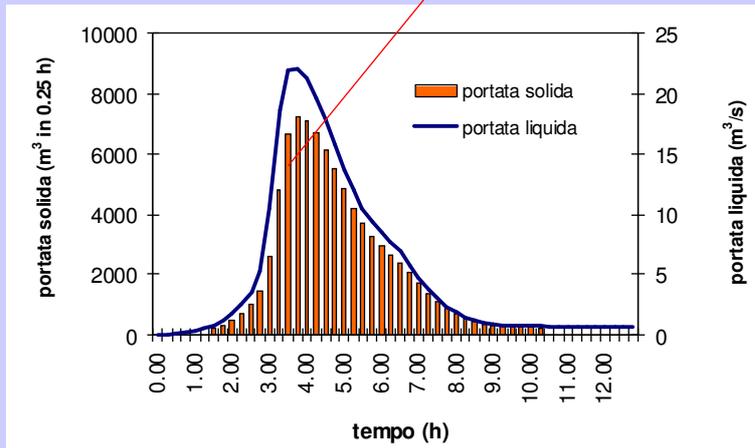
Nella forma
semplificata e
trascurando τ_c

$$q_s = 2.5 q S^{1.6}$$

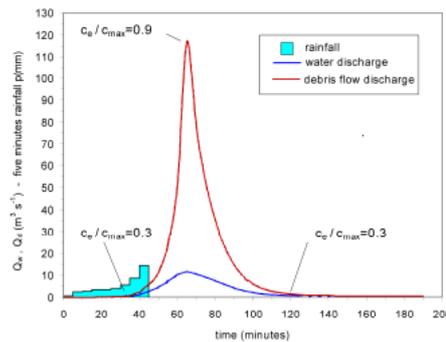
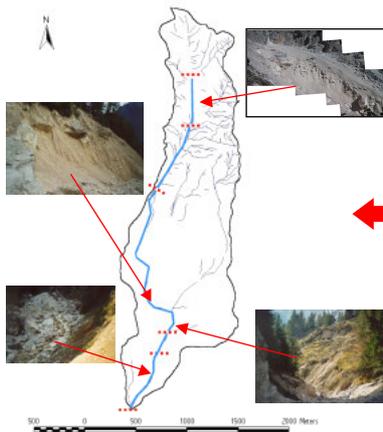
$$c'_V = \frac{q_s}{q} = 2.5 S^{1.6}$$

Applicando una formula sulla capacità di trasporto ad un idrogramma di piena, lo posso suddividere in una successione di stati pseudo-stazionari di durata Δt , ciascuno dei quali contribuisce con un volume:

$$\Delta V_s = q_s B \Delta t$$



Colate detritiche - confronto fra volumi solidi disponibili e volumi mobilizzabili da parte dei deflussi liquidi



volumi solidi disponibili – osservazioni geomorfologiche

volumi solidi mobilizzabili – analisi idrologica

Colate detritiche - determinazione dei volumi solidi disponibili: osservazioni geomorfologiche di terreno

Valutazione dei volumi di detrito presenti lungo la rete idrografica e disponibili per essere mobilizzati.

Hungr et al. (1984); Scheuringer (1988); Spreafico et al. (1999)

- individuazione delle aree sorgenti di sedimento collegate alla rete idrografica;
- stima dei volumi per unità di lunghezza del collettore.

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \cdot e_i$$

V volume totale (m^3)

L_i lunghezza dei tratti di torrente di caratteristiche uniformi (m)

e_i apporto detritico per unità di lunghezza (m^3m^{-1})

Portata di picco di una colata detritica – metodo volumetrico

Valuta la capacità posseduta da una portata di acqua chiara (Q_0) di mobilizzare un ammasso di materiale solido in condizioni di completa saturazione.

Assunzioni:

la colata si forma per diluizione del detrito presente nel canale in seguito ad aggiunta d'acqua;

la velocità di avanzamento del fronte è praticamente uguale a quella dell'acqua in arrivo.

(Takahashi, 1978; Armanini, 1999)

$$Q_p = Q_0 \cdot \frac{c^*}{c^* - c}$$

c concentrazione di volume della fase solida nella colata

c^* concentrazione solida di massimo impaccamento del materiale prima della mobilizzazione; spesso si assume $c^* = 0.65$

Q_0 portata liquida di picco

Applicazione del metodo volumetrico alla determinazione di un idrogramma di colata detritica

Ipotesi di lavoro

La colata viene innescata da un evento pluviometrico di forte intensità e breve durata (evento temporalesco con durata inferiore od uguale all'ora) di assegnato tempo di ritorno (p.e. 200 $T_r = 200$ anni).

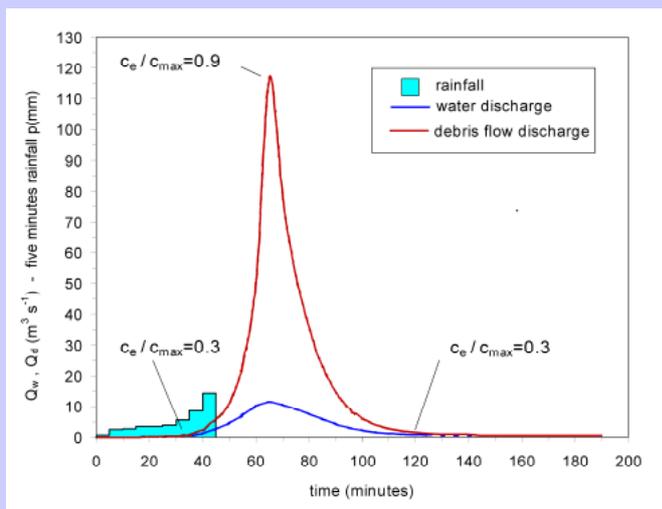
L'alveo dispone di una quantità illimitata di sedimenti; viene cioè mobilizzato tutto il sedimento asportabile dalla portata liquida. Più precisamente, la disponibilità illimitata di sedimento viene ipotizzata in concomitanza del transito della portata di colmo dell'idrogramma.

Variazione della concentrazione solida nel corso dell'evento.

Per il picco: $c = 0.9 c^* \Rightarrow Q_p = 10 Q_0$

il primo valore della portata del debris flow Q_d per un valore di $c = 0.3 c^*$ ($c = 0.2$; l'arrivo di una colata detritica viene spesso preceduto da un flusso iperconcentrato). Si determinano i successivi valori di Qd ammettendo un andamento lineare di c (da $c = 0.3 c^*$ a $c_v = 0.9c^*$) in funzione del tempo. Procedura analoga si applica per la fase calante della colata.

Idrogramma della colata liquida: confronto fra i volumi solidi mobilizzabili e quelli rilevati sul terreno



Dall'analisi idrologica:
 $V_{\text{solido}} \approx 80000 \text{ m}^3$

Disponibile in base a rilievi di terreno:
 $V_s \approx 66500 \text{ m}^3$



Grazie per l'attenzione



Comprensione dei meccanismi del trasporto solido in ambiente montano

Lorenzo Marchi (CNR IRPI Padova)

Udine, 1 dicembre 2006



Provincia di Udine
Provincia di Udine



Grazie per l'attenzione