



Flooding in Huila, Colombia - February 2017. Credit: UNGRD

# LA REOLOGIA

## nelle colate detritiche

# La reologia è la scienza che si occupa della deformazione e del flusso della materia (Bingham, 1929)

La teoria dell'elasticità lineare e la meccanica dei fluidi newtoniani sono gli approcci classici da usare per descrivere i comportamenti semplici dei materiali solidi (in condizioni di piccola deformazione) e di materiali liquidi.

## Materiali solidi:

L'applicazione di uno sforzo  $\tau$  produce una deformazione  $\gamma$  che è linearmente proporzionale al valore istantaneo dello sforzo stesso.

## Materiali liquidi:

L'applicazione di uno sforzo  $\tau$  produce una condizione di flusso, caratterizzata da una velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$  (ovvero da un gradiente di velocità) che è linearmente proporzionale al valore istantaneo dello sforzo stesso. Per i flussi di taglio la viscosità  $\eta$  rappresenta il fattore di proporzionalità tra sforzo  $\tau$  e velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$ .

Per la descrizione del comportamento abbiamo quindi, ad un estremo, le deformazioni elastiche dei materiali in fase solida che seguono la legge di Hooke, all'altro, il flusso newtoniano di liquidi e gas.

**VISCOSITA'**: è una proprietà dei fluidi che indica la resistenza allo scorrimento.  
Dipende dal tipo di fluido e dalla temperatura.

E' definita come rapporto tra lo sforzo tangenziale  $\tau$  necessario per produrre il flusso a taglio e la velocità di deformazione.

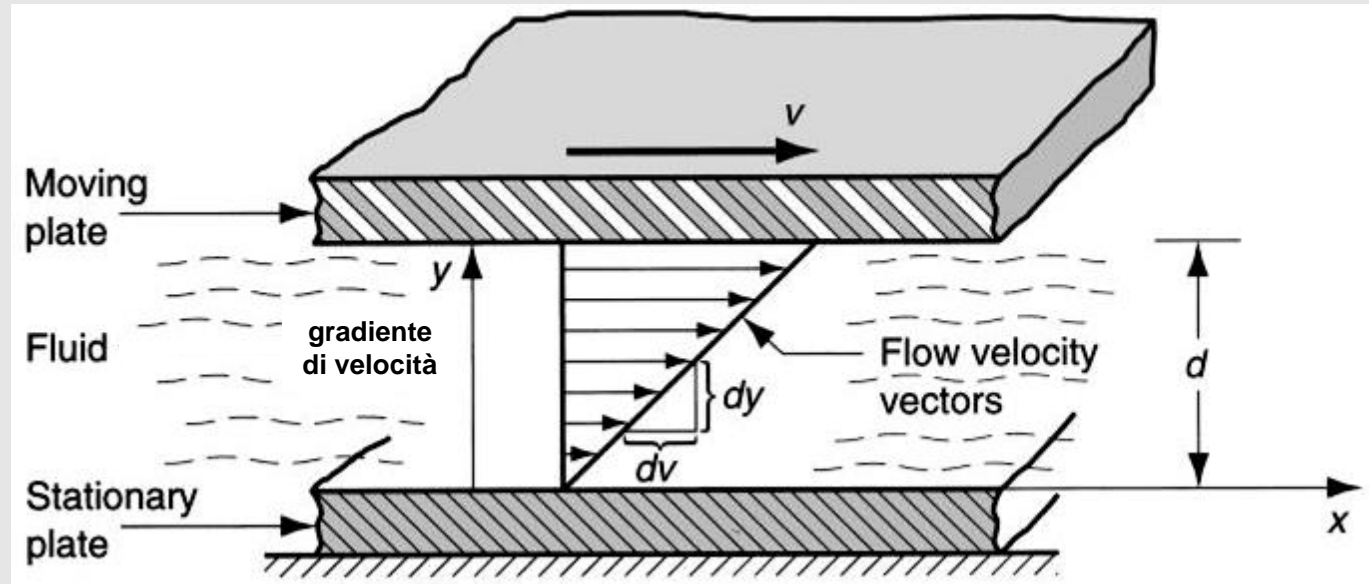
$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Unità di misura

$$[\eta] = \text{Ns} / \text{m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

$$[\dot{\gamma}] = \text{s}^{-1}$$

$$[\tau] = \text{Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$$



## Curve di flusso

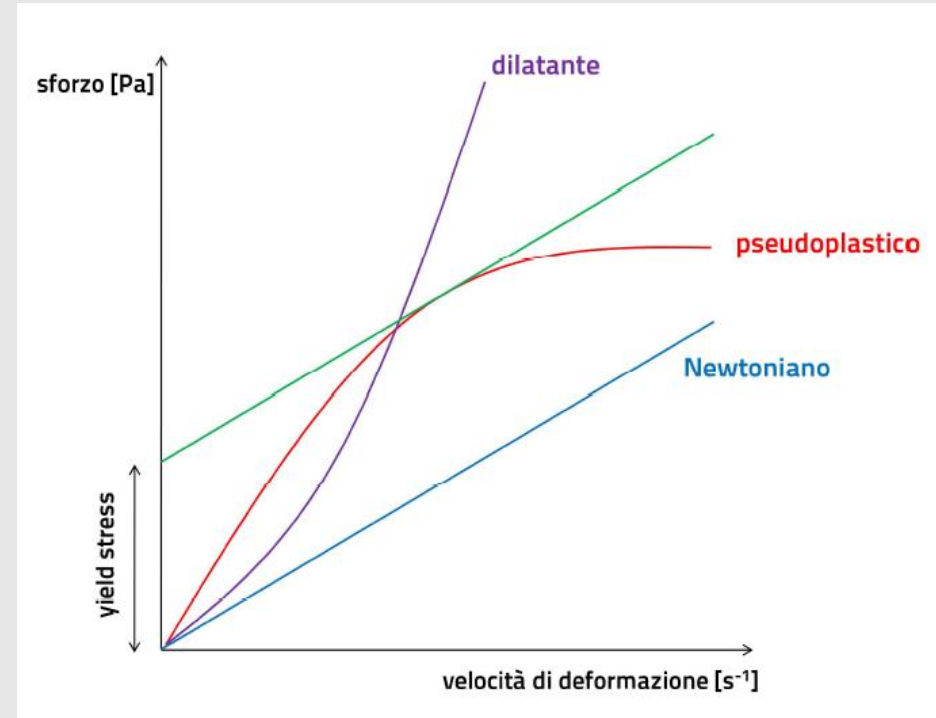
La viscosità è la grandezza necessaria e sufficiente a descrivere il comportamento dei fluidi newtoniani.

Per i fluidi newtoniani il valore della viscosità è indipendente dalla velocità di deformazione ed è funzione della temperatura e in misura minore della pressione.

Per molti sistemi la viscosità non è una proprietà dipendente soltanto dalla temperatura e dalla pressione, né è la sola proprietà necessaria e sufficiente per descrivere, secondo la relazione di newton, il comportamento reologico nelle diverse condizioni di moto e deformazione.

Tali sistemi sono nominati **non newtoniani**.

Nei fluidi non newtoniani la viscosità dipende quindi anche dalla condizione di moto ovvero dalla velocità di deformazione.



Lo **yield stress o limite di scorrimento** è lo sforzo necessario affinché, nei fluidi non newtoniani, si abbia il flusso.

Nella prassi si incontrano molti fenomeni che non trovano alcuna possibile spiegazione negli approcci classici quali la teoria dell'elasticità e la meccanica dei fluidi Newtoniani.

L'argomento centrale della reologia è quindi la definizione di altre equazioni costitutive o **modelli reologici** diversi dalle semplici leggi lineari (Newton, Hooke).

### **Lo scopo è:**

- Interpretare fenomeni macroscopici
- Analizzare e risolvere problemi di trasporto o nei quali è in gioco il moto o la deformazione di sistemi.
- Fornire criteri e parametri utili.

**Se la concentrazione volumetrica dei sedimenti supera il 9% il fluido comincia a comportarsi come non newtoniano.**

Lo studio reologico delle sospensioni iperconcentrate è legato alla necessità di realizzare una corretta modellazione dei flussi di sedimenti che sempre più spesso si incontrano in natura.

Una corretta caratterizzazione reologica permette una migliore quantificazione della forza di impatto ed una stima più precisa della capacità di propagazione del flusso, al fine di progettare opportune opere di difesa e di delimitare le zone a rischio.

Le sospensioni di sedimenti sottili hanno un comportamento reologico molto differente da quello delle sospensioni di sedimenti più grossolani. La differenza sta più nella composizione mineralogica che non nelle dimensioni delle particelle.

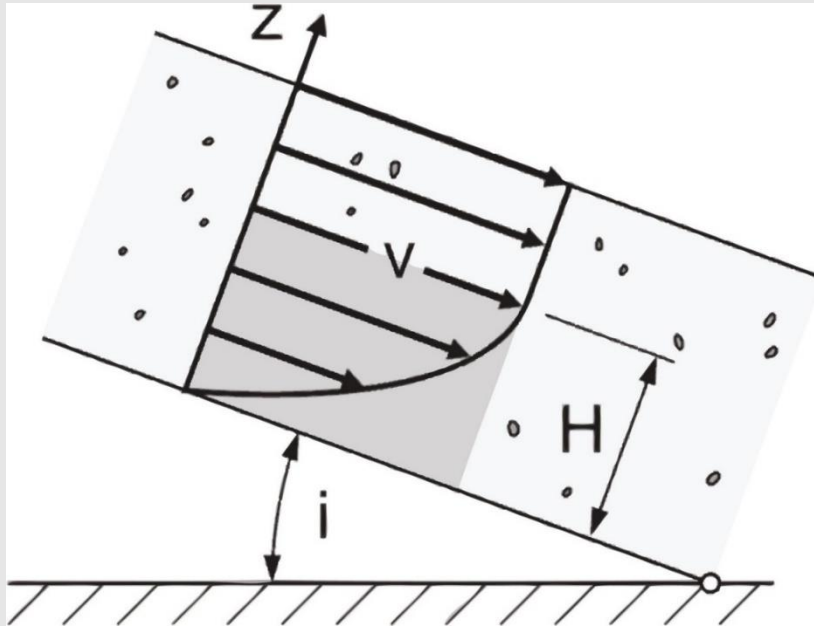
I sedimenti grossolani sono costituiti principalmente da calcite, dolomite, quarzo e feldspati, mentre i sedimenti più sottili nella maggior parte dei casi sono costituiti da minerali argillosi.

La differente struttura cristallina dei minerali implica molte differenze nelle proprietà fisiche che si manifestano con un diverso comportamento reologico.

La composizione mineralogica può giocare un ruolo più importante rispetto alla distribuzione granulometrica nelle proprietà reologiche delle sospensioni di sedimenti.

# Distribuzione semplificata del profilo verticale di velocità in una colata detritica

da Schatzmann, 2005



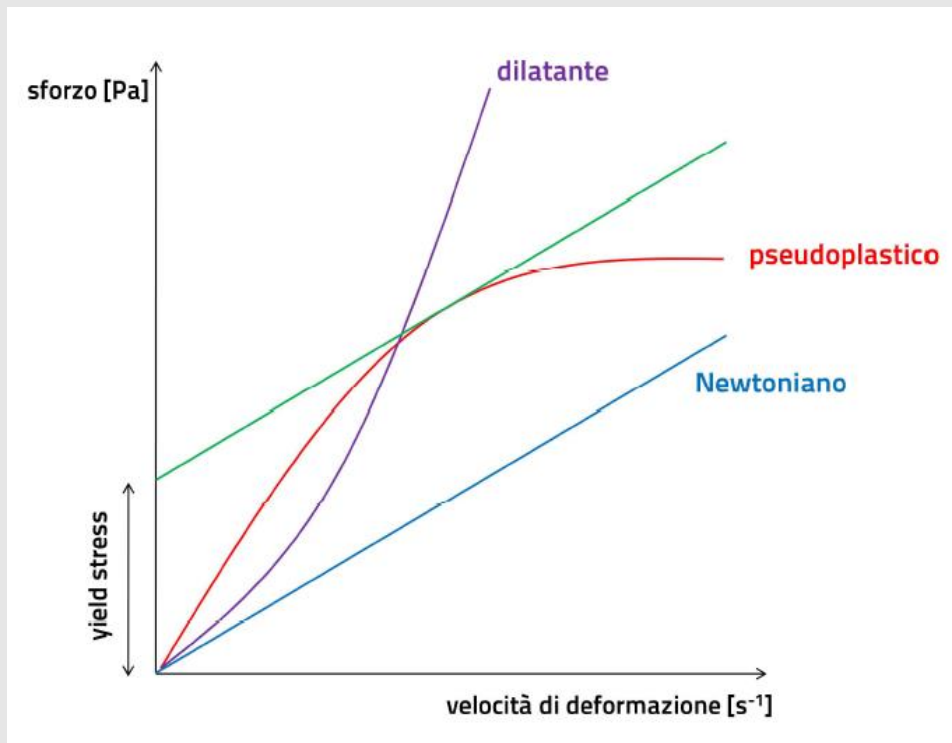
Nella figura è schematizzata la distribuzione verticale della velocità in una colata detritica che scorre in un canale avente inclinazione  $i$ .

Verticalmente una colata detritica può essere suddivisa in due zone, una inferiore ( $H$ ) dove si ha un rapido aumento delle velocità e una superiore dove le velocità si mantengono costanti.

Schatzmann (2005) descrive in maniera dettagliata la zona di taglio nelle diverse tipologie di colate detritiche. Nei **debris flow granulari** le collisioni e l'attrito tra i grani causano a scala macroscopica una distribuzione di velocità molto più complessa di quella illustrata in figura mentre alla scala microscopica dei fluidi interstiziali può esistere lo stato di taglio a flusso laminare. Nei **debris flow viscosi** il criterio della zona di taglio è ben soddisfatto, in quanto possono essere considerati pressoché monofasici, anche se lo spessore dello strato di taglio può variare nel tempo e nello spazio in funzione della dimensione massima del materiale detritico trasportato dalla colata stessa.

Correntemente i modelli reologici più utilizzati in letteratura per la descrizione delle colate sono:

- **Modello reologico di Bingham**
- **Modello dilatante**
- **Modello pseudoplastico**
- **Modello di Herschel Bulkley**



$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} + C \left( \frac{du}{dy} \right)^\beta$$
 Modello dilatante

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy}$$
 Modello di Bingham

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{du}{dy} - C \left( \frac{du}{dy} \right)^\beta$$
 Modello pseudoplastico

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$
 Modello Newtoniano

$\tau$ : resistenza al taglio

$\tau_y$ : yield stress

$\eta$ : viscosità

$du/dy$ : velocità di deformazione

$C$ : costante tipica del fluido  
analizzato



# Modello di Bingham

I primi sistematici sforzi volti ad una migliore conoscenza dei debris flow furono fatti da Johnson e Yano e Daido (1965): si accorsero che i debris flow presentano proprietà sia dei fluidi viscosi sia dei solidi plastici. Johnson per descrivere il comportamento dei debris flow adotta il modello Reologico di Bingham:

In questo modello il flusso avviene se lo sforzo di taglio applicato supera una certa resistenza di soglia  $\tau_0$

$$\tau = \tau_y + \eta \frac{dv}{dy}$$

In termini generali, se lo sforzo applicato è minore dello sforzo di soglia, il fluido si comporta come una sostanza allo stato solido rispondendo alla sollecitazione con una deformazione finita.

Se lo sforzo applicato è invece maggiore, la risposta è una deformazione continua.

La resistenza al flusso o deformazione delle colate detritiche deriva dalla coesione, dall'angolo di attrito e dalla viscosità. Coesione ed angolo di attrito causano resistenza al flusso sia in condizioni statiche che dinamiche, mentre la viscosità influenza la resistenza al flusso solo durante il movimento.

# Modello Dilatante

Takahashi (1978, 1980, 1981) ha formulato un modello di movimento del debris flow basato sul concetto, introdotto da Bagnold (1954), di pressione dispersiva causata dalla collisione tra particelle; **questo modello è detto dilatante**. Tra le altre cose, esso spiega in modo qualitativo la gradazione inversa che caratterizza i depositi di debris flow.

Gli esperimenti condotti in laboratorio da Bagnold dimostrarono che quando una miscela con una concentrazione relativamente alta di solidi granulari è in movimento, le particelle più grossolane tendono a migrare verso la superficie. Questo risulta dal sollevamento prodotto quando, per effetto di collisioni, vengono trasmesse forze tra le particelle.

Questo spiega il fatto che nelle colate detritiche i massi più grossolani tendono a migrare verso la superficie e verso il fronte. Evidenza che si riscontra anche nei depositi. Bagnold chiamò **pressione dispersiva (p)** questa forza di sollevamento e trovò che essa è direttamente proporzionale al quadrato del diametro di una particella ed al gradiente di velocità:

$$p = 0.042 \delta D^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \cos \phi$$

dove  $\phi$  è l'angolo di attrito interno dinamico,  $D$  è il diametro della particella e  $\delta$  è la concentrazione lineare dei granuli.  $\delta$  è espressa dalla seguente equazione:

$$\delta = \frac{C_V^{1/3}}{(C_{\max})^{1/3} - C_V^{1/3}}$$

dove  $C_V$  è la concentrazione di volume e  $C_{\max}$  è la massima concentrazione possibile.

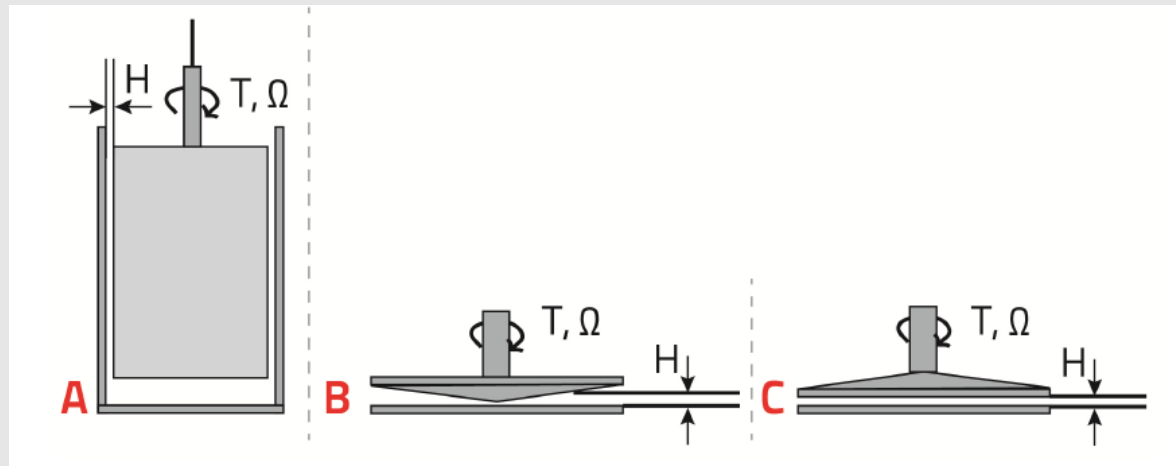
# Metodologie per i determinare i valori di viscosità $\eta$ e lo yield stress $\tau_y$ =limite di scorrimento

- reometri
- piano inclinato
- canale inclinato
- slump test
- **Esperimenti su modello fisico di grandi dimensioni**

Il problema maggiore nella determinazione della caratteristiche reologiche delle colate detritiche è la riproduzione del fenomeno. Questo a causa della granulometria del materiale coinvolto.

È possibile, per la maggior parte dei casi, valutare solamente le caratteristiche reologiche della matrice più fine.

# REOMETRO



**Configurazioni geometriche dei sistemi reometrici:** (A) sistema a cilindri concentrici; (B) sistema cono-piatto; (C) sistema a piatti paralleli (modificata da Schatzmann, 2005).

Si possono analizzare frazioni **granulometriche fini  $<62.5 \mu\text{m}$**   
Possono essere utilizzate diverse geometrie e configurazioni  
**Configurazioni:** Controlled rate, Controlled stress

Solitamente il piatto superiore, il cilindro interno, il cono vengono ruotati in moto da ottenere una zona di taglio all'interno del campione. Viene applicato un momento torcente ( $T$ ) tale da ottenere una determinata velocità di rotazione  $\Omega$ . In base a questi due parametri è possibile ottenere la velocità di deformazione e lo sforzo di taglio e quindi la viscosità.

Le differenze principali tra le geometrie riguardano i campi di velocità di deformazione e di viscosità che possono essere esplorati nelle prove.

# PREPARAZIONE DEL CAMPIONE

Per effettuare le analisi reologiche è necessario separare dalla frazione fine di ciascun campione un'aliquota significativa composta da particelle inferiori ai **62.5  $\mu\text{m}$** . Tale operazione viene realizzata tramite setacciatura per via umida del materiale sabbioso-limoso (setaccio A.S.T.M. Series, Mesh/n°230, Giuliani, Torino). Previa decantazione, viene rimossa l'acqua in eccesso e il campione viene asciugato in forno a 110°C per 18-24 ore.

48 ore prima delle analisi reologiche il campione viene preparato alla concentrazione volumetrica fissata, mescolando le adeguate quantità di materiale argilloso-limoso ed acqua distillata. Il campione così realizzato viene sigillato con parafilm onde prevenire l'evaporazione dell'acqua.

Al fine di ricavare, tramite curve di interpolazione, i coefficienti necessari alla modellazione numerica, ogni campione deve essere analizzato a diverse concentrazioni volumetriche, almeno tre per ottenere dati sufficienti ad una buona correlazione. A seconda della mineralogia del materiale analizzato sono stati scelti diversi valori di concentrazione, nel complesso racchiusi in un range dal 26% al 64% in volume.

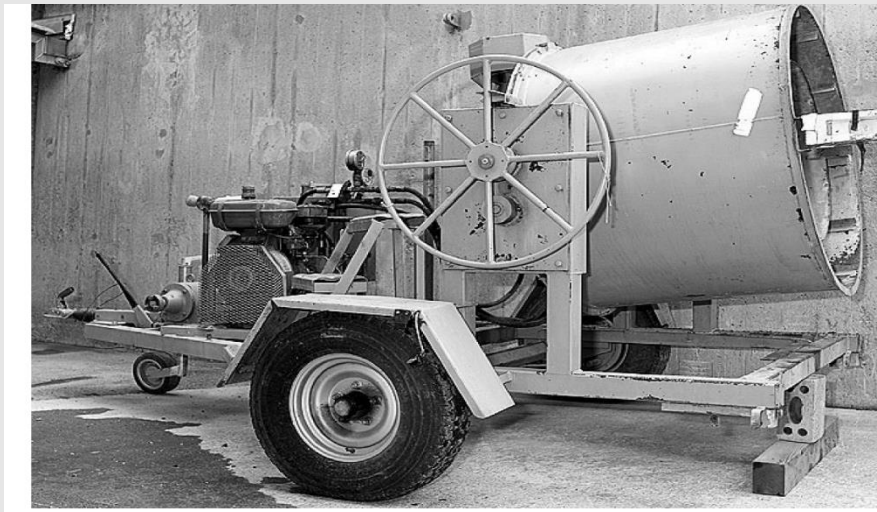


Al fine di studiare le caratteristiche reologiche delle colate detritiche sono stati sviluppati strumenti a grande scala.

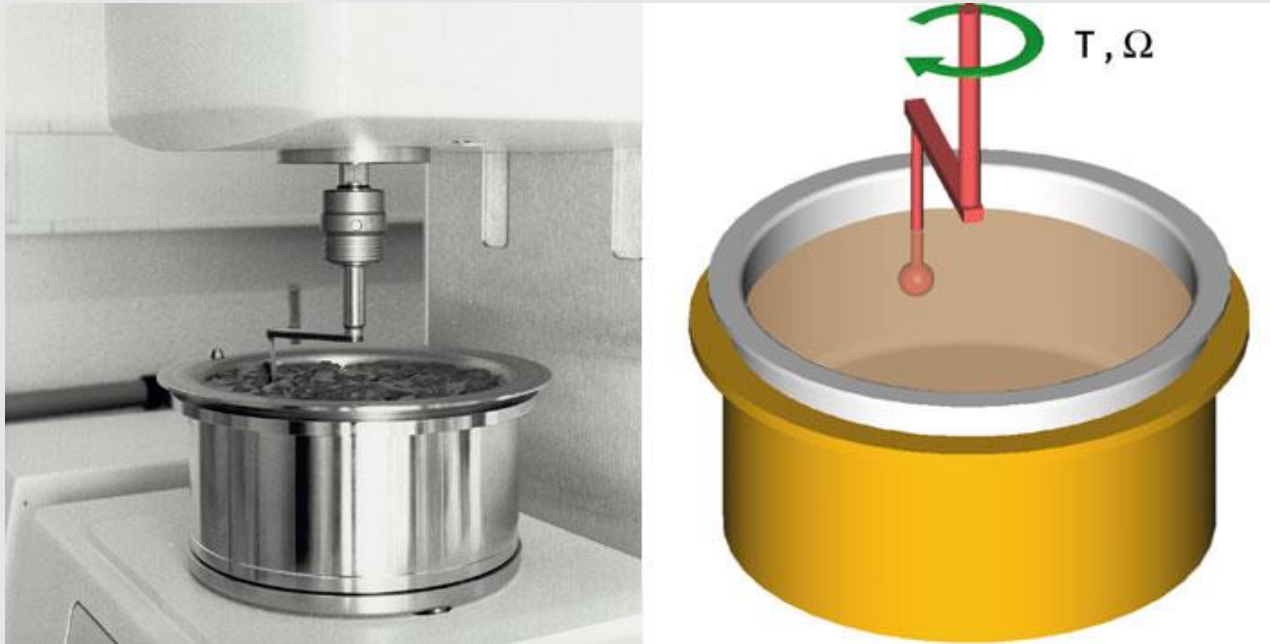
La geometria utilizzata è quella dei cilindri coassiali.

Permettono di analizzare miscugli di acqua e sedimento con granulometria massima di 20-35 mm.

Richiedono però l'utilizzo di quantità di campione elevate



# REOMETRO A SFERA ROTANTE (BMS – BALL MEASURING SYSTEM)



Rispetto ai reometri convenzionali è possibile analizzare granulometrie maggiori (fino a 5 mm), utilizzando però ridotte quantità di campione (0.5 l).

La sfera rotante viene trascinata attraverso un dato fluido con velocità differenti.

Vengono misurate le forze necessarie a trasportare la sfera.

# CANALE INCLINATO

Tramite il canale inclinato è possibile determinare lo yield stress

Il metodo consiste nel far fluire un miscuglio di sedimento e acqua su un piano inclinato e determinare lo spessore del deposito finale.

$$\tau_y = \rho g R_h \cdot \sin(i)$$

$$R_h = \frac{h_0 \cdot b}{h_0 + 2b}$$

Dove:

$\rho$ : densità del fluido

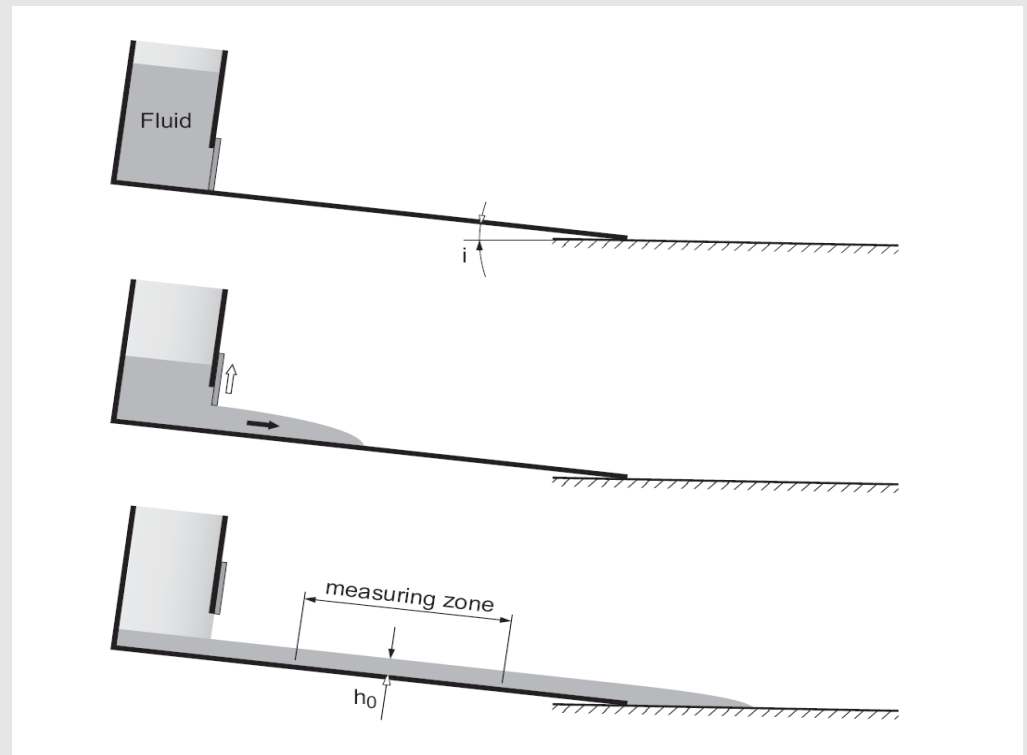
$g$ : gravità

$R_h$ : raggio idraulico

$h_0$ : altezza deposito

$b$ : larghezza canale

$i$ : l'angolo di inclinazione del piano rispetto l'orizzontale





# PIANO INCLINATO

Un volume definito di fluido è versato su un piano inclinato. Guidato dalla gravità il fluido si espande tridimensionalmente.

Misurando l'altezza del deposito è possibile determinare l'yield stress

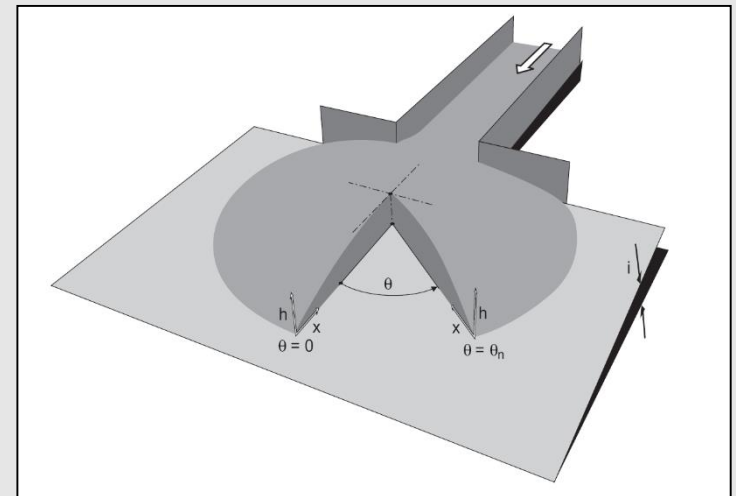
$$\tau_y = \rho \cdot g \cdot h_0 \cdot \sin(i)$$

$\rho$ : densità del fluido

$g$ : gravità

$h_0$ : altezza deposito

$i$ : l'angolo di inclinazione del piano rispetto l'orizzontale



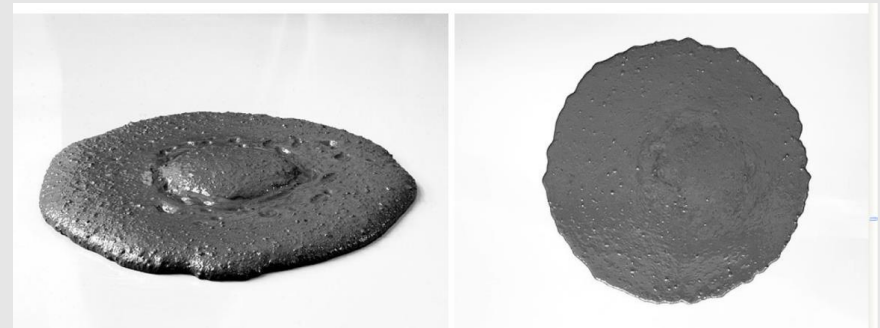
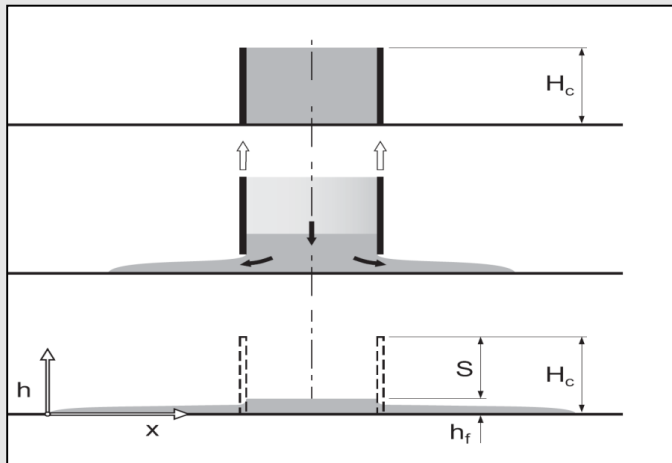
# SLUMP TEST

Per eseguire lo slump test è necessario un cilindro aperto. il cilindro è posizionato su un piano orizzontale. il cilindro viene alzato in modo da permettere al fluido di “collassare”. il fluido si espande radialmente sul piano orizzontale.

Lo yield stress viene determinato sulla base dell’altezza  $S$  che è la differenza tra l’altezza iniziale e l’altezza finale del fluido.

$$\frac{S}{H_c} = 1 - 2 \cdot \frac{\tau_y}{\rho \cdot g \cdot H_c} \left( 1 - \ln \left( 2 \cdot \frac{\tau_y}{\rho \cdot g \cdot H_c} \right) \right)$$

lo yield stress  $\tau_y$  è definito per iterazione



# ESPERIMENTI SU MODELLO FISICO DI GRANDI DIMENSIONI

A causa delle difficoltà nell'osservare le colate detritiche in natura, spesso l'analisi dei debris flow è stata fatta mediante modelli fisici in laboratorio.

Le canalette artificiali sono di dimensioni ridotte, i volumi coinvolti non superano una certa soglia e la tipologia del materiale il più delle volte è ridotta a miscele di argilla, sabbie e limo.

Difficoltà di tipo economico ed organizzativo limitano l'effettuazione di prove a scala reale.

Il canale artificiale in cemento armato, costruito dallo U.S. Geological Survey presso l'H.J. Andrews Experimental Forest in Oregon (Stati Uniti), è lungo 95 m, largo 2 m e profondo 1.2m. Il letto è liscio ed ha una pendenza costante di 31° lungo i primi 88m, mentre lungo gli ultimi 7m diminuisce gradualmente fino ai 3° della superficie di sbocco e deposito. Dieci metri sopra la testa del canale è posizionata una vasca in acciaio, dotata di apposita paratoia, nella quale viene caricata la miscela di prova (massimo 20 m<sup>3</sup>). Lungo tutto lo scivolo e sulla piazza di arresto sono installati strumenti per la misura della profondità, degli sforzi e delle pressioni esercitati dal flusso della colata. Inoltre telecamere e macchine fotografiche riprendono le diverse fasi di ciascuna prova. In alcune prove è stata utilizzata una miscela poco assortita di sabbia e ghiaia con clasti di 32mm di diametro (ridotto anche per ragioni di sicurezza) e una frazione fine pari all'1% ( $D < 63 \mu\text{m}$ ); in altre, invece, è stata utilizzata una miscela di limo, sabbia e ghiaia con una maggior percentuale di frazione fine (2-4%). La miscela di sola sabbia e ghiaia è rappresentativa di debris flow a scarsa coesione; con l'aggiunta di limo si cerca di studiare l'influenza della matrice fine sulla reologia della colata.



Canale artificiale dell'U.S. Geological Survey (da Iverson et al., 1992)

# VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITA'

**La definizione delle pericolosità considera:**

Previsione tipologica (tipo di dissesto)

Previsione spaziale (dove)

Previsione dell'evoluzione (estensione areale)

Definizione della magnitudo (volume e velocità)

Previsione temporale (quando)

CARTA DEI  
DISSESTI

CARTA DELLA  
PERICOLOSITÀ

**Previsione spaziale (DOVE):** è necessario definire le aree che sono o che possono essere interessate dalle colate detritiche.

**Previsione dell'evoluzione (ESTENSIONE AREALE):** è necessario individuare le possibili vie di propagazione del fenomeno franoso, tenendo conto delle caratteristiche topografiche dall'area di studio, delle opere di protezione presenti. (definizione tramite modelli)

### Definizione della magnitudo (VOLUME) e della VELOCITA'

Magnitudo delle frane in rapporto al loro volume (Fell, 1994)

Descrizione	Volume (m <sup>3</sup> )
Estremamente grande	$> 5 \cdot 10^{-6}$
Molto grande	$1 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-6}$
Mediamente grande	$2.5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$
Media	$5 \cdot 10^{-4} - 2.5 \cdot 10^{-5}$
Piccola	$5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
Molto piccola	$5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-2}$
Estremamente piccola	$< 5 \cdot 10^{-2}$

Velocità delle frane e possibili danni (Curden & Varnes, 1994)

Velocità	Dani osservabili	Velocità
Estrem. rapido	Catastrofe di eccezionale violenza; edifici distrutti, molti morti, fuga impossibile	5 m/s
Molto rapido	Perdita di alcune vite umane; velocità troppo elevata per l'evacuazione delle persone	3 m/min
Rapido	Evacuazione possibile, distruzione di strutture ed immobili	1.8 m/h
Moderato	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute	13 m/mese
Lento	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo	1.6 m/y
Molto lento	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate	16 mm/y
Estrem. lento	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Possibile costruzione di edifici, con precauzioni	< 16 mm/y

# INTENSITA' DELLE COLATE DETRITICHE (VOLUME \* VELOCITA')

## BUWAL, 1997

Criteri di intensità  
per le colate  
h=altezza deposito  
V=velocità

### FORTE

$h > 1 \text{ m}$  e  $V > 1 \text{ m/s}$

### MEDIA

$h < 1 \text{ m}$  o  $V < 1 \text{ m/s}$

### DEBOLE

nessun flusso

	Classificazione dell'intensità del fenomeno di debris flow		
Criterio	Intensità bassa	Intensità media	Intensità alta
BUWAL (1997)	Nessun flusso	$h < 1 \text{ m}$ oppure $V < 1 \text{ m/s}$	$h > 1 \text{ m}$ e (oppure ) $V > 1 \text{ m/s}$
Rickenmann (2001)	$h < 0.5 \text{ m}$ e $V < 0.5 \text{ m/s}$	$h < 1.5 \text{ m}$ e $1 \text{ m/s} \leq V \leq 1.5 \text{ /s}$	$h > 1.5 \text{ m}$ oppure $V > 1.5 \text{ m/s}$
	Classificazione delle zone di <u>pericolo</u> da debris flow Intensità del fenomeno combinata con la probabilità di accadimento dell'evento: tempo di ritorno compreso fra 100 e 300 anni		
Petrascheck e Kienholz (2003)	Pericolo basso	Pericolo moderato	Pericolo alto

# PREVISIONE TEMPORALE

**Previsione temporale (quando):** consiste essenzialmente nella definizione della probabilità di accadimento di eventi franosi.

La pericolosità è espressa in termini di probabilità annua, da cui si ricava il tempo di ritorno di un fenomeno.

$$T = \frac{1}{P_{annua}}$$

**Tempo di ritorno**

La previsione temporale può essere definita attraverso:

- **Analisi di serie storiche di eventi di dissesto**
- **Analisi delle serie temporali di fattori di innesco:** si basa sulla analisi statistica di serie relative ai fattori innescanti quali precipitazioni, temperature etc.

### **Tipi di pericolo legati a colate di detrito:**

- impatto diretto, alta energia, flussi con detriti molto grossolani
- impatto indiretto, bassa energia, seppellimenti
- da piena post colata di detrito: diversione del canale e divagazione sul conoide, effetti erosivi su superfici non protette.

È possibile valutare la pericolosità a grande scala (dettaglio) e a piccola scala (scala regionale)

### **Valutazione preliminare a scala regionale:**

- Bibliografia
- Documenti storici
- Interpretazione di foto aeree
- GIS
- Rilievi di campagna

Otengo una **carta della pericolosità** (qualitativa) che permette di identificare le priorità e cioè le aree che necessitano uno studio più dettagliato e/o misure più urgenti di mitigazione.

### **Analisi di dettaglio per i singoli conoidi alluvionali:**

- metodi empirici
- modelli numerici



# STRUMENTI PER LA ZONIZZAZIONE

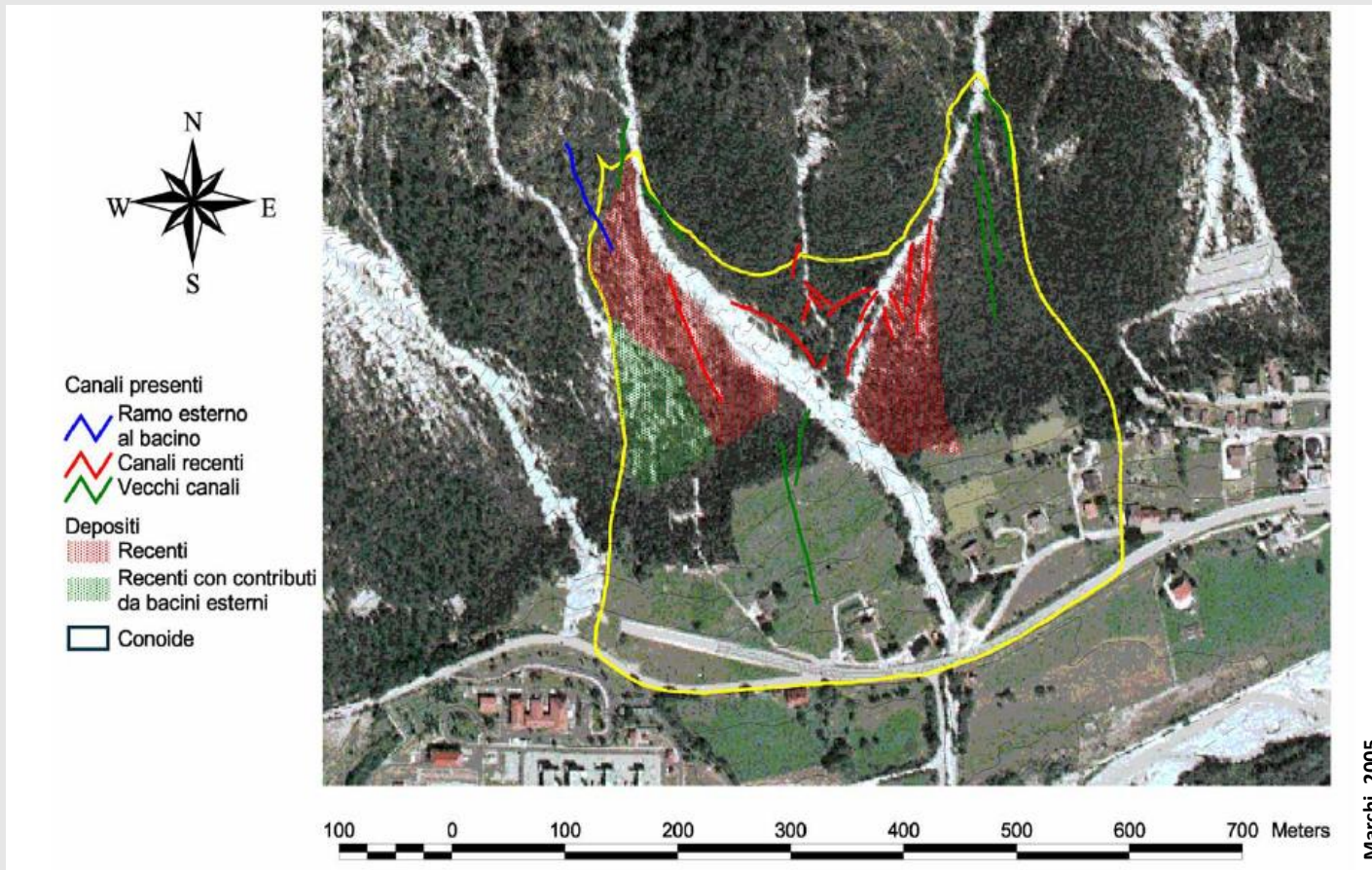
**Mappatura sulla base di indicatori di campo e utilizzo di documentazione storica** (a scala regionale e di bacino)

Vale la teoria: “ *dove si sono verificate colate nel passato queste si ripeteranno “ e dove sono giunte le colate nel passato, ritorneranno”*

Gli indicatori di campo possono essere dati dalle forme deposizionali, solitamente ancora facilmente riconoscibili in aree non urbanizzate.

- **Metodi empirici** (a scala di bacino)
- **Utilizzo di modelli di calcolo** (mono-dimensionali e bi-dimensionali) a scala di bacino

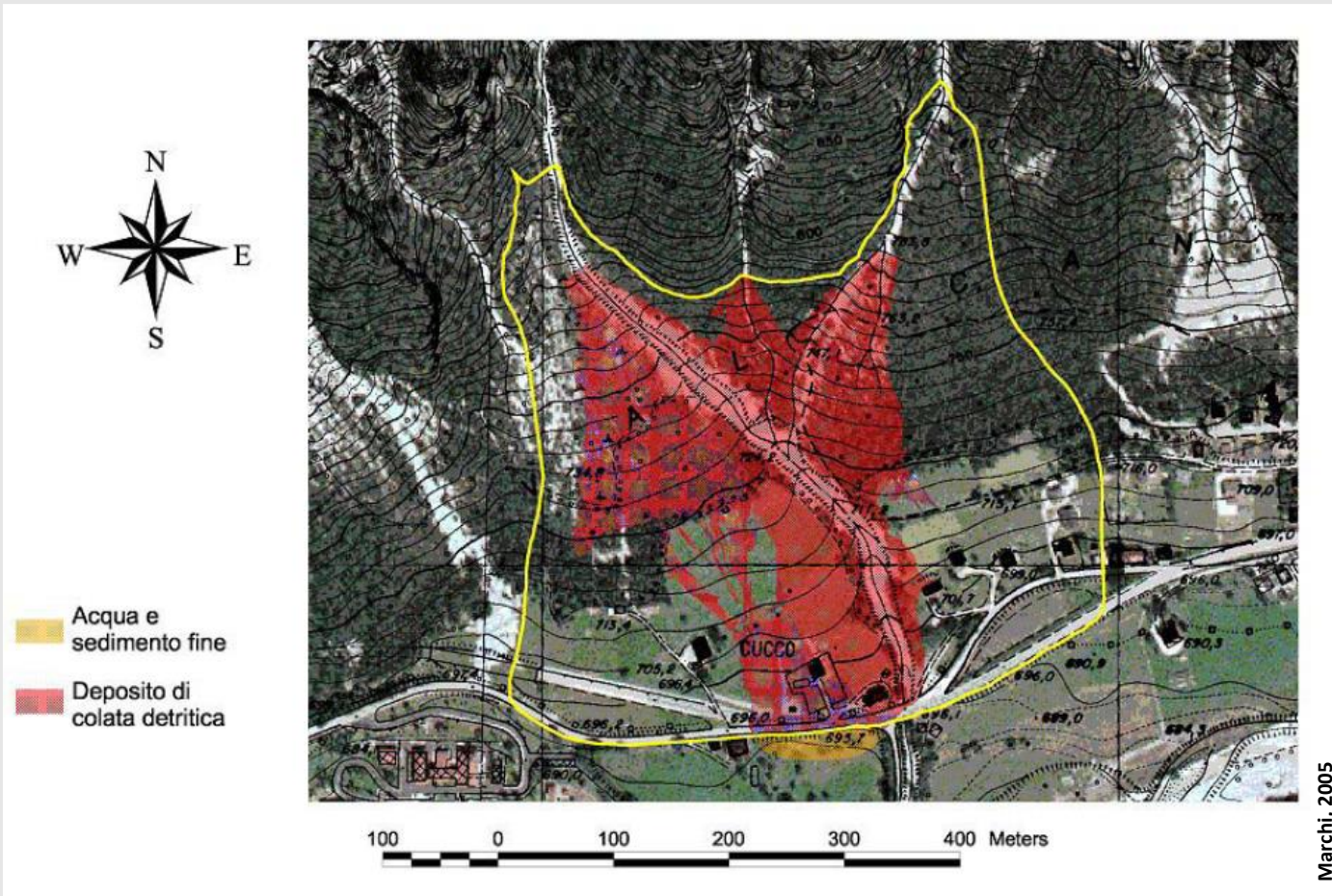
# ESEMPIO DI MAPPATURA SULLA BASE DI INDICATORI DI CAMPO



Bacino del Rio Cucco (Malborghetto Valbruna)

Studio effettuato prima dell'alluvione del 29 agosto 2003.

# MAPPATURA FINALE

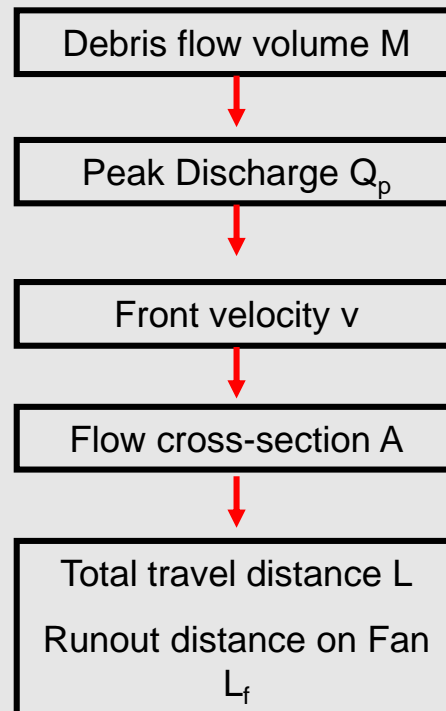


Bacino del Rio Cucco  
(Malborghetto Valbruna)

Espansione della colata  
detritica del 29 agosto 2003

È possibile **valutare aree di espansione delle colate di detrito tramite metodi di tipo empirico.**

La definizione delle zone interessate da colate detritiche può essere fatta in funzione delle caratteristiche del fenomeno (**VOLUME**) e della topografia dell'area di studio. Sulla base di formule empiriche vengono definiti parametri quantitativi.



# VOLUME DELLE COLATE DETRITICHE

La valutazione del volume delle colate detritiche è un aspetto importante nella scelta delle misure per la riduzione del rischio

Il volume è importante perché:

- è in relazione con altre variabili;
- per definire le misure di protezione (strutturali e non strutturali);
- per il dimensionamento delle piazze di deposito.

<b>METODOLOGIA</b>	<b>NOTE</b>
<b>Utilizzo di dati storici</b>	Analisi probabilistica di serie storiche
<b>Equazioni empiriche e semiempiriche</b>	Vengono solitamente definite su base statistica. Possono essere utilizzate per avere una stima del volume mobilizzabile.
<b>Metodi geomorfologici</b>	Prevedono rilevamento in campagna e la definizione del potenziale volume. Possono essere soggettivi

# UTILIZZO DEI DATI STORICI

L'utilizzo della documentazione storica può dare informazioni utili sulla tipologia dei processi, sulla frequenza dei processi di maggior intensità e in alcuni casi su dati quantitativi riguardo l'entità del processo. In particolar modo dove presenti i dati storici sono utili per l'individuazione di relazione tra volumi detritici trasportati e la frequenza degli eventi. Queste relazioni possono essere indagate a scala regionale o a scala di singolo bacino.

## **Fonte dati:**

Monografie pubblicate, archivi comunali, relazioni tecniche, pubblicazioni.

Bisogna porre attenzione nel riconoscimento tipologico dei processi torrentizi (dalle descrizioni non è sempre facile distinguere le colate detritiche rispetto gli altri processi).

Verificare la congruità dei volumi riportati nei documenti con l'assetto topografico delle zone di deposito.

Da sottolineare che nelle alpi italiane si ha una scarsità o assenza di dati prima della metà del XIX secolo. Si hanno segnalazioni ma mancano stime di volumi.

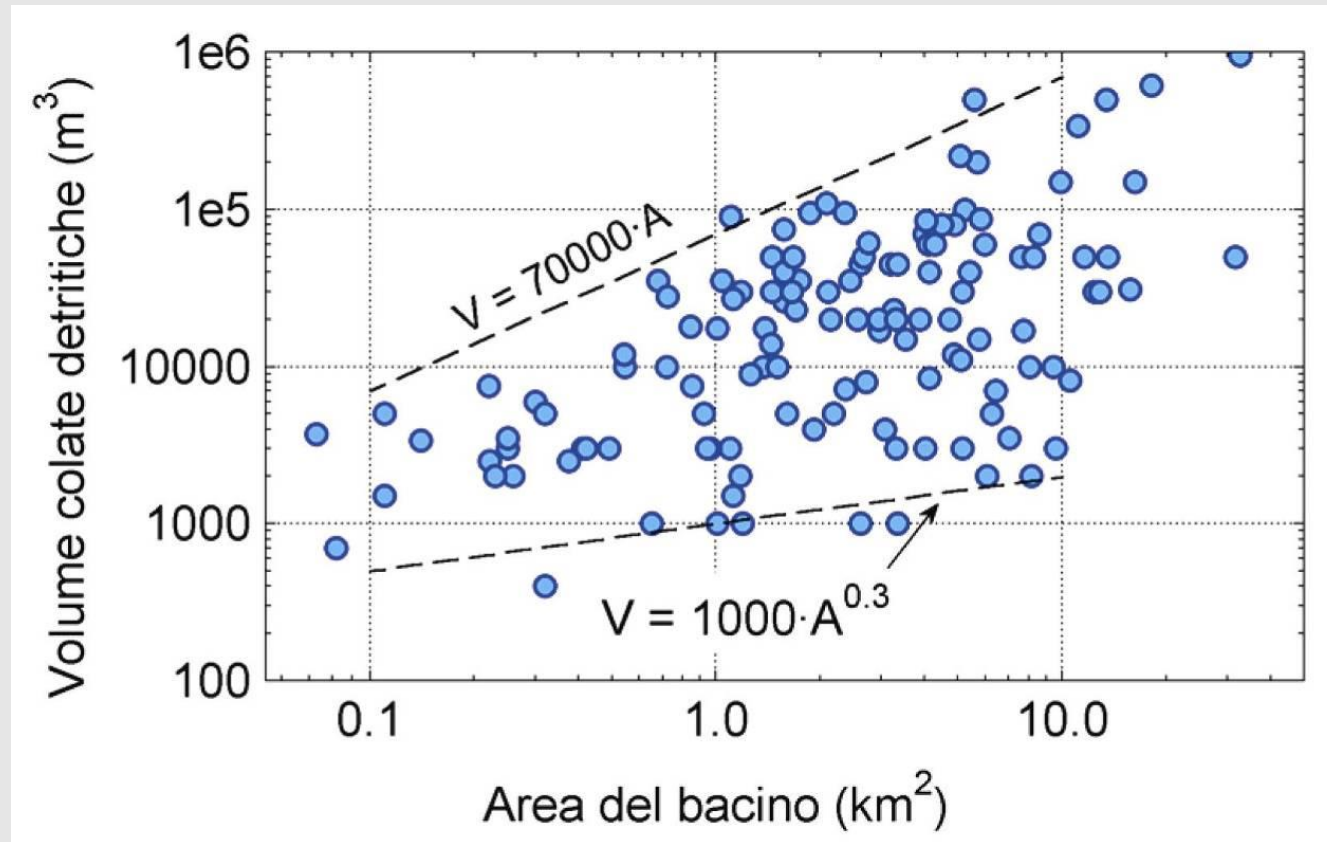
## **Vantaggi:**

- Stime basate su dati raccolti nel bacino oggetto di studio
- Valutazioni di volumi corrispondenti a determinati tempi di ritorno

## **Limitazioni:**

- Serie storiche raramente disponibili e di modesta numerosità

# ESEMPIO DI UTILIZZO DEI DATI STORICI



Definizione di linee di involuppo empiriche.

Nel grafico sono riportati i valori massimi per ogni bacino. Tali linee servono per avere una stima del volume mobilizzabile in un bacino data la sua area.

# FORMULE SEMI-EMPIRICHE

In letteratura sono presenti *numerose espressioni che calcolano i volumi delle colate detritiche a partire da variabili in grado di esprimere sinteticamente l'influenza delle caratteristiche fisiche del bacino sull'entità dei fenomeni.*

Fra le **variabili utilizzate** come predittori in queste formule si hanno:

- **Parametri morfometrici del bacino e del conoide alluvionale**
- **Indici espressivi delle condizioni geolitologiche e della copertura vegetale.**

Metodi utilizzati per lo sviluppo delle formule:

Metodi di natura statistica

Metodi riconducibili alla taratura di un modello concettuale

## **Vantaggi:**

- Facilità e rapidità di applicazione

## **Limiti:**

- **Grossolana approssimazione dei risultati:** i parametri utilizzati non riescono a comprendere la complessità dei processi, i dati impiegati per lo sviluppo delle espressioni sono approssimati.



# ESEMPIO DI UTILIZZO DI FORMULE SEMI-EMPIRICHE

Formula	N. dati	Tipo di metodo	Regione	Fonte bibliografica
(1) $V = K \cdot A_d \cdot S_c$	1420	semi-empirico	Austria	Kronfellner-Kraus (1985)
(2) $V = 45 \cdot A_d^{0.9} \cdot S_c^{1.5} \cdot IG$	62	semi-empirico	Provincia di Trento (IT)	D'Agostino et al. (1996)
(3) $V = 65000 \cdot A^{1.35} \cdot S_c^{1.7}$	86	semi-empirico	Italia Nord-orientale	Marchi e D'Agostino (2004)
(4) $V = V_r (2.9 \cdot S_c^2)$	86	semi-empirico	Italia Nord-orientale	Marchi e D'Agostino (2004)
(5) $V_{100} = 0.49 \cdot A_d \cdot I_b^{1.6}$ $IGM \cdot (SNV + 2)^{0.2}$ (utilizzabile per $I_b < 200$ %)	12	semi-empirico	Alpi Francesi	Bianco et al. (2001)
(6) $V = L_c \cdot (6.4 \cdot S_f - 23)$ $7\% < S_f < 15\%$ $V = L_c \cdot (110 - 2.5 \cdot S_f)$ $15\% < S_f < 40\%$	82	empirico (linea di inviluppo)	Svizzera	Rickenmann (1997)

V volume della colata detritica (volume trasportato in un singolo evento) (m<sup>3</sup>)

V<sub>100</sub> volume centennale della colata detritica (m<sup>3</sup>)

V<sub>r</sub> volume di deflusso liquido responsabile della formazione della colata detritica (m<sup>3</sup>)

A<sub>d</sub> area del bacino (km<sup>2</sup>)

S<sub>c</sub> pendenza media dell'asta torrentizia (% nelle eq. 1 e 2; m/m nelle eq. 3 e 4)

I<sub>b</sub> indice di rilievo del bacino (corrisponde all'indice di Melton espresso in %):

$$I_b = \left[ (H_{max} - H_{min}) / \sqrt{A_d} \right] \cdot 100 \quad H_{max} \text{ è l'altitudine massima nel bacino; } H_{min} \text{ è l'altitudine minima nel bacino}$$

K fattore di torrenzialità (Kronfellner-Kraus, 1985)

IG indice geolitologico (D'Agostino et al., 1996)

IGM indice geolitologico (Brochet et al., 2002)

SNV superficie non coperta da vegetazione (%)

L<sub>c</sub> lunghezza dell'asta torrentizia (m)

S<sub>f</sub> pendenza del conoide (%)

# FATTORE DI TORRENZIALITA' K

Esprime sinteticamente l'influenza che l'assetto geomorfologico del bacino, la presenza di dissesti e la disponibilità di sedimento hanno sui volumi detritici mobilizzabili in occasione di eventi estremi.

Il fattore di torrenzialità viene determinato sulla base dell'area del bacino (A) e di due parametri a e b i cui valori sono determinati per le diverse regioni del territorio austriaco.

$$K = a / e^{b \cdot A^d}$$

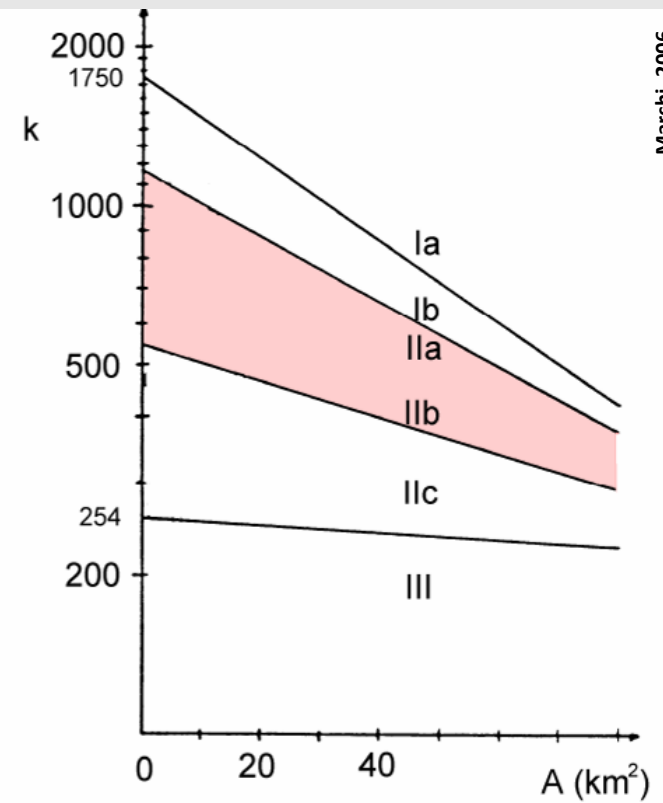
Determinazione del fattore di torrenzialità  $k$  (Kronfellner-Kraus)

$$K = a / e^{b \cdot A}$$

$A$  area del bacino (km<sup>2</sup>)  
 $a, b$  parametri regionali (Austria)

	a	b
Ia	1750	0.018
Ib, IIa	1150	0.014
IIb	540	0.008
III	254	0.0016

D'Agostino et al. (1996),  
 Trentino Occidentale:  
 a: 667; b: 0.005



# INDICE GEOLITOLOGICO (I.G.)

Viene calcolato tramite una media ponderata dell'estensione degli affioramenti delle rocce appartenenti a diverse classi litologiche con dei punteggi che esprimono la propensione dei vari litotipi alla produzione di sedimento.

CLASSE LITOLOGICA	PUNTEGGIO I.G.
Copertura quaternaria	5
Filladi	4
Rocce terrigene	3
Rocce laviche degradate, tufi basaltici	2
Rocce calcaree	1
Rocce porfiriche, granitiche, dioritiche	0

**D'Agostino et al.,1996.**

I punteggi possono essere cambiati in funzione delle condizioni di fratturazione e alterazioni locali.

# METODI GEOMORFOLOGICI

Con questo termine vengono indicate le **procedure che pervengono alla determinazione dei volumi delle colate detritiche sulla base di rilievi delle aree sorgenti di sedimento.**

La valutazione dei potenziali apporti di detrito riguarda alvei torrentizi, sponde instabili o in erosione e frane connesse alla rete idrografica.

Metodi:

- Scheuringer (1988)
- **Hungr et al. (1984)**
- **Spreafico (1999)**

Tali metodi prevedono l'individuazione delle aree sorgenti di sedimento lungo la rete idrografica e quindi la stima dei volumi per unità di lunghezza del collettore.

## Vantaggi:

- flessibilità con cui è possibile procedere alla determinazione dei volumi
- non richiedono dati su eventi avvenuti in passato, quindi sono sempre applicabili

## Limiti:

- soggettività nella valutazione dei volumi, che riguarda soprattutto la stima degli spessori erodibili.

# HUNGR (1984)

La **rete idrografica del bacino studiato viene suddivisa in tratti omogenei**, per quanto riguarda le **caratteristiche di erodibilità**. Ad ogni tratto omogeneo viene attribuito un tasso di erosione unitario (**apporto detritico unitario del canale  $e_i$** ) che indica il volume erodibile per unità di lunghezza del collettore. I valori di  $e_i$  vengono quindi moltiplicati per le lunghezze dei vari tratti.

**Il volume complessivo mobilizzabile è quindi dato dalla somma dei contributi dei vari tratti considerati.**

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

Dove:

$n$  è il numero di tratti considerati

$L_i$  è la lunghezza espressa in metri del tratto omogeneo

il metodo è applicabile in bacini di superficie approssimativamente compresa tra 1 e 3 Km<sup>2</sup>

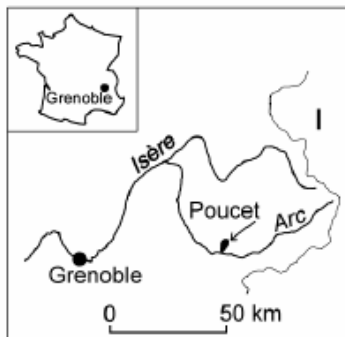
Classe	Pendenza alveo (°)	Materiale alveo	Sponde	Condizioni di stabilità	Apporto detritico unitario (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> )
A	20 - 35	Roccia	Non erodibili	Stabile (virtuale assenza di detrito)	0 - 5
B	10 - 20	Sottile strato di detrito o suolo sciolto su roccia	Non erodibili (roccia)	Stabile	5 - 10
C	10 - 20	Copertura detritica o morena	Altezza < 5 m	Stabile	10 - 15
D	10 - 20	Copertura detritica o morena	Detrito, altezza > 5 m	Angolo di riposo del materiale	15 - 30
E	10 - 20	Copertura detritica o morena	Detrito, altezza > 20 m	Sponde potenzialmente instabili (area in frana)	Fino a 200 (sorgente di detrito localizzata)

Valori indicativi dell'apporto detritico unitario (da Hungr et al., 1984).

Questi valori proposti per la British Columbia appaiono validi anche per regioni a clima umido per le medie latitudini.

## Esempio: T. Poucet, Alpi Francesesi

- Riconoscimento di tratti di canale omogenei
- Determinazione della lunghezza
- Assegnazione di un valore dell'apporto di sedimento unitario



### Extrait de la légende

1 n° d'une section de lit (cf. tableau 8)

 Dépôts torrentiels récents

Berges  
 hauteur < 1 m  
 hauteur 1-5 m  
 hauteur 5-10 m  
 hauteur > 10m

(Brochot et al., 2002)

N° de bief	Type de chenal	Apport unitaire de sédiment $e_i$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume de sédiments V (m <sup>3</sup> )
1	C	10	2 500
2	C	10	10 500
3	C	10	1 250
4	C	10	5 000
5	C	10	5 000
6	D	15	1 275
7	D	30	4 500
8	D	15	1 500
9	D	15	10 800
10	E	260	26 000
11	E	50	25 000
12	C	10	3 000
13	D	15	2 550
14	D	15	1 725
15	C	10	1 850
16	D	15	4 500
Volume total:			106 950

# SPREAFICO et al. (1999)

Anche questo metodo propone l'esecuzione di rilievi geomorfologici lungo la rete idrografica per la quantificazione del volume di materiale solido mobilizzabile.

Rispetto al metodo di Hungr et al. (1984) che indica dei valori degli apporti detritici unitari comprensivi del contributo di alveo e sponde, **il metodo di Spreafico prevede una quantificazione separata tra alveo e sponde.**

Sorgenti di sedimento localizzate e di particolare rilevanza, quali frane che interessano le sponde, devono essere oggetto di apposite valutazioni di dettaglio.

**Il volume mobilizzabile per l'intero bacino è dato dalla somma dei contributi stimati per i diversi tratti in cui è stato suddiviso l'alveo e per le sorgenti di sedimento su sponde e versanti.**



## Volume erodibile da un tratto di alveo torrentizio:

$$V_{c,i} = k_1 \cdot L_i \cdot b_i \cdot d_i$$

dove:

$L_i$ : lunghezza del tratto d'alveo (m)

$b_i$ : larghezza media del tratto del canale (m)

$d_i$ : profondità media di erosione (m)

$k_1$ : coefficiente di riduzione adimensionale

## Volume erodibile dalle sponde:

$$V_{s,i} = k_2 \cdot Ls_i \cdot hs_i \cdot ds_i$$

dove:

$Ls_i$ : lunghezza del tratto di sponda (m)

$hs_i$ : altezza della sponda (m)

$ds_i$ : profondità media di erosione (m)

$k_2$ : coefficiente di riduzione adimensionale

# Volume erodibile sorgente localizzata

$$V_{p,i} = k_3 \cdot \frac{Lp_i \cdot hp_i}{2} \cdot dp_i$$

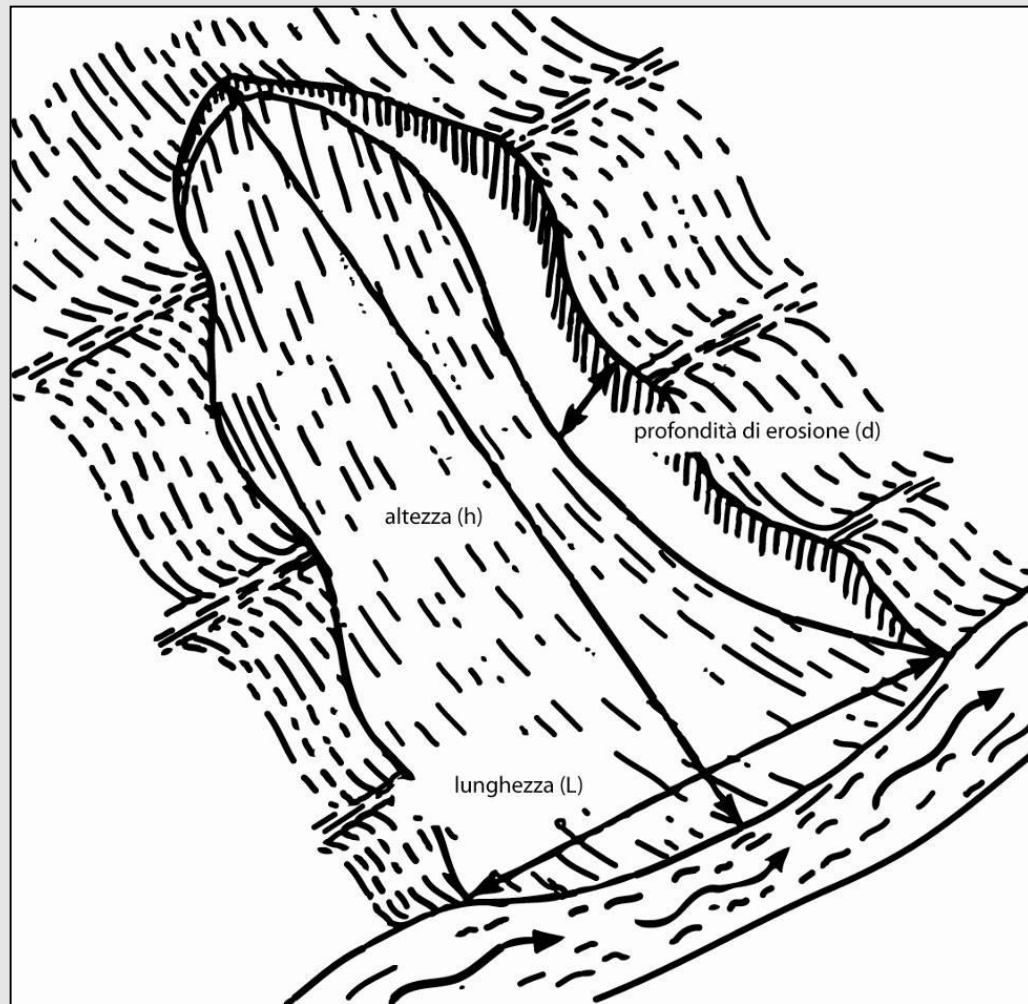
dove:

$Lp_i$ : lunghezza del tratto di sponda (m)

$hs_i$ : altezza sorgente (m)

$ds_i$ : profondità media di erosione (m)

$k_2$ : coefficiente di riduzione  
adimensionale



La sorgente localizzata viene assimilata in questo caso ad un triangolo.

Volume erodibile dall'alveo:  
indicazioni per la stima del  
coefficiente di riduzione  $k$   
(da Spreafico et al., 1999).

OBJET	Facteurs de réduction $k_{jit}$ pour le processus de transport	
	Charriage	Lave torrentielle
Lit partiellement rocheux	$\frac{L_{GA} - L_F}{L_{GA}}$	$\frac{L_{GA} - L_F}{L_{GA}}$
Blocs $> d_{90}$	$\frac{L_{GA} - L_B}{L_{GA}}$	1
Très gros blocs <sup>1)</sup>	$\frac{L_{GA} - L_{BL}}{L_{GA}}$	$\frac{L_{GA} - L_{BL}}{L_{GA}}$
Seuils en bois, bon état	0.3 - 0.5	0.8 - <sup>12)</sup>
Seuils en bois, état défectueux <sup>2)</sup>	0.8 - 1	1
Seuils en pierres, bon état	0.3 - 0.5	0.5 - 0.8
Seuils en pierres, état défectueux	0.5 - 0.8	0.8 - 1
Seuils en béton	0.3 - 0.5	0.5 - 0.8 <sup>3)</sup>
Danger d'obstruction	0.6 - 0.8	1

- 1) par ex. provenant de processus de versants (matériel d'éboulement)  
 2) considérer rupture du seuil  
 3) considérer rupture de certains seuils, mais pas de toute la série

$L_{GA}$  = Longueur du tronçon du cours d'eau  
 $L_F$  = Longueur du tronçon rocheux  
 $L_B$  = Longueur du tronçon avec blocs  $> d_{90}$   
 $L_{BL}$  = Longueur du tronçon avec de très gros blocs  
 (par ex. matériel d'éboulement)

**Nella scelta del valore è importante tenere in considerazione i vari fattori che possono influire sul tasso di erosione**

**fattori che influiscono sull'erosione:**

- spessore della copertura detritica
- pendenza dell'area sorgente di sedimento
- granulometria
- coesione
- presenza di copertura vegetale
- capacità erosiva della corrente

**Valori di erosione delle sponde:**

**frequenti i valori tra 0.5 - 1 m fino a 2 m per aree localizzate instabili.**

# IN DEFINITIVA: PER CALCOLARE IL VOLUME???

**Per la valutazione dei volumi potenzialmente mobilizzabili delle colate detritiche non esiste una metodologia univoca da utilizzare.**

In presenza di **dati storici** relativi ad un bacino questi vanno valorizzati (possono essere degli importanti termini di paragone).

I **metodi geomorfologici** costituiscono parte fondamentale di una seria valutazione del volume mobilizzabile. Il loro limite è la soggettività delle valutazioni, sono però applicabili ovunque.

Le **formule empiriche** possono fornire utili indicazioni ma che vanno considerate criticamente. È preferibile utilizzare espressioni sviluppate nella stessa area di studio.

# DETERMINAZIONE DELLE PORTATE

Le portate di picco delle colate detritiche possono essere determinate per mezzo di relazioni che legano queste variabili ai volumi delle colate stesse.

Relazioni fra volumi e portate di picco delle colate detritiche.

Espressione	N. dati	Tipologia delle colate	Fonte bibliografica
$Q_p = 0.135 V^{0.78}$	~ 50	colate detritiche granulari	Mizuyama et al. (1992)
$Q_p = 0.0188 V^{0.79}$	~ 100	colate detritiche a matrice fangosa	Mizuyama et al. (1992)
$Q_p = 0.050 V^{0.9}$	12	colate detritiche granulari	Bovis e Jakob (1999)
$Q_p = 0.0028 V^{1.01}$	9	colate detritiche a matrice fangosa	Bovis e Jakob (1999)

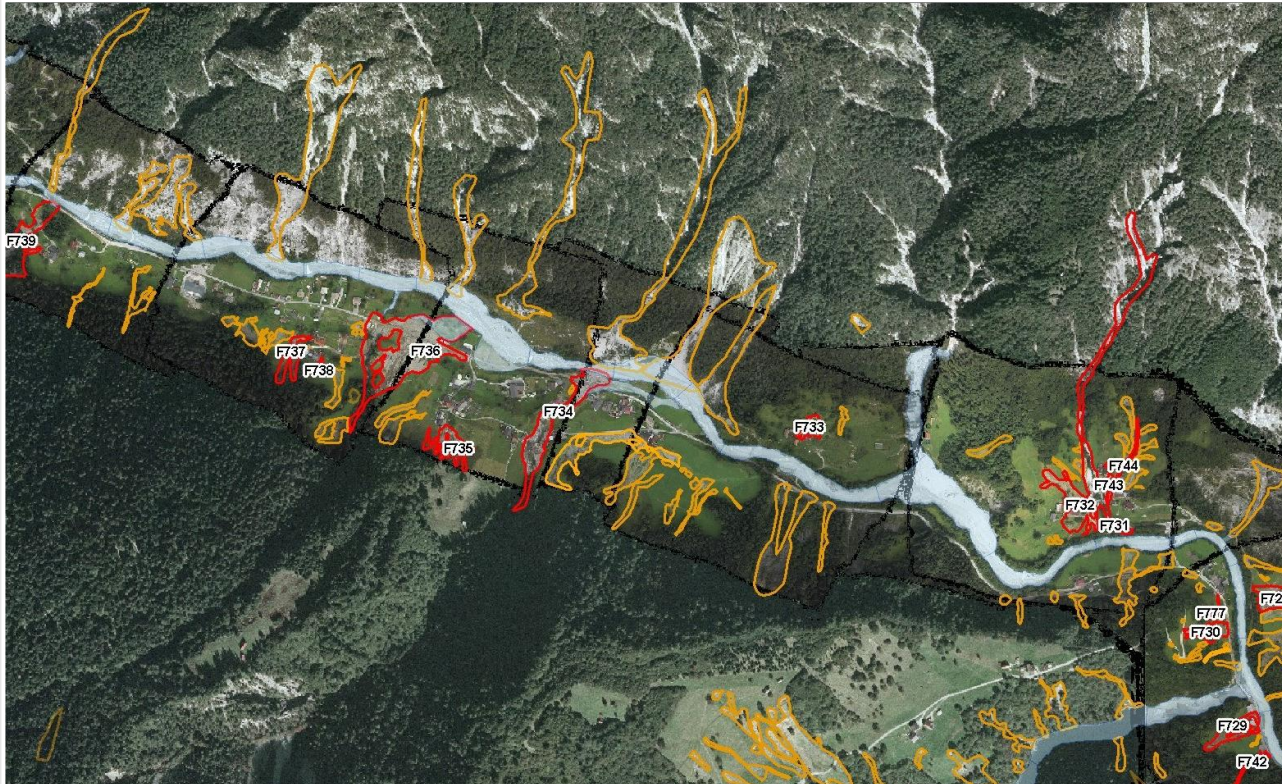
A parità di volume solido complessivamente mobilitato dalla colata, **le colate di tipo granulare danno luogo a valori della portata al colmo notevolmente più elevati rispetto le colate di fango.**

**Le formule sono utili per avere un stima della portata di picco delle colate.** Bisogna però porre attenzione che derivano in alcuni casi da torrenti oggetto di monitoraggio, ma più spesso da rilievi post evento. In questo ultimo caso le stime delle portate sono fatte sulla base delle tracce che si riferiscono alla miscela acqua – sedimento mentre le stime dei volumi sono fatti solo la frazione solida.

**INOLTRE IL VOLUME COMPLESSIVO DI UNA COLATA DERIVA SPESSO DA PIÙ PULSAZIONI.**

# ESEMPIO DI MODELLAZIONE DI COLATE DETRITICHE

## IL SOFTWARE FLO-2D



Alluvione 2003, courtesy  
Protezione Civile FVG  
Carta dei dissesti post evento

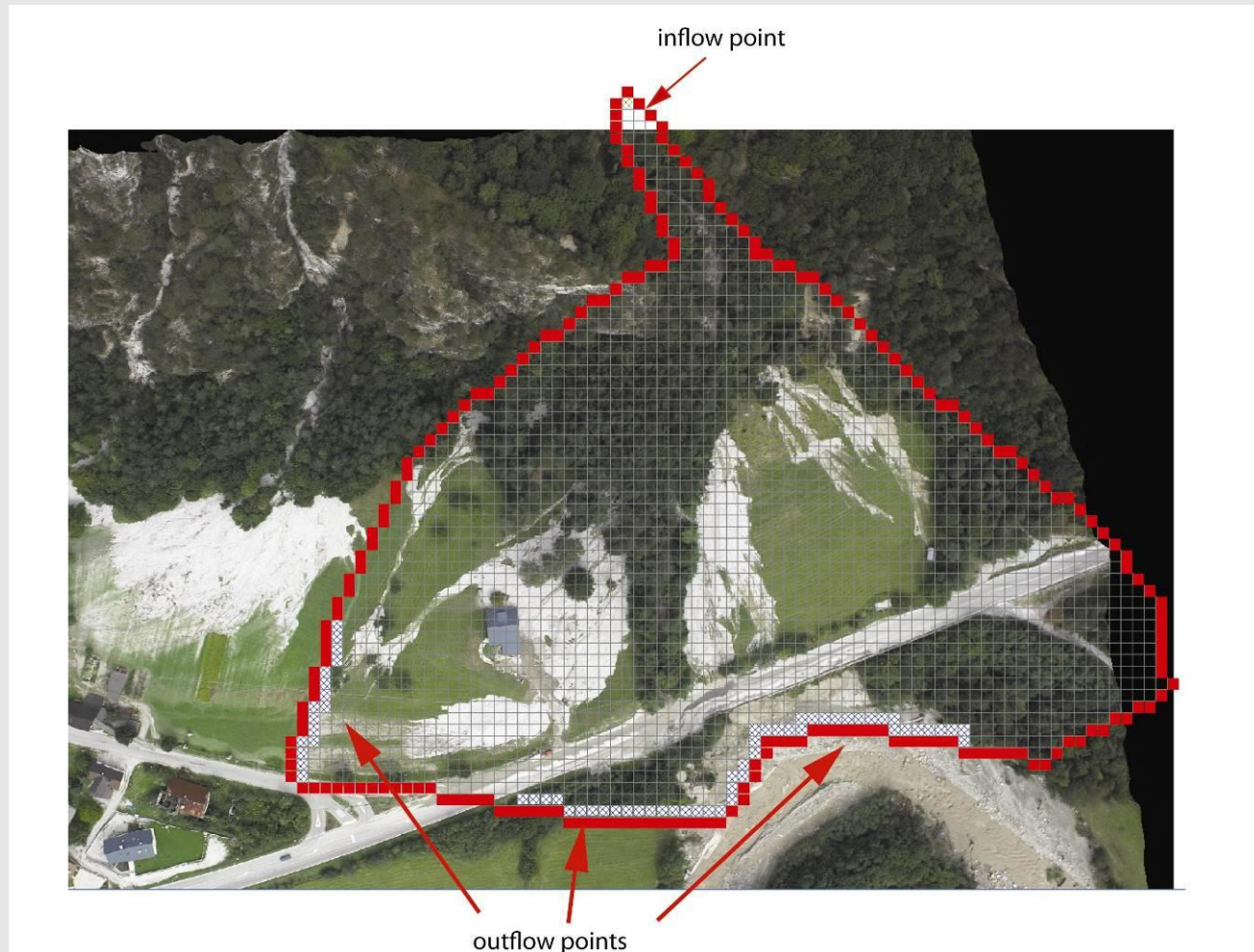
# Parametri di input nel software Flo-2D

- DTM data (from CTRN or laser scann data)
- Computational domain (cell size 5x5 m)
- Inflow points / Outflow points
- Inflow hydrograph and  $C_v$
- 12 couples of rheological parameters (choosed from bibliography)

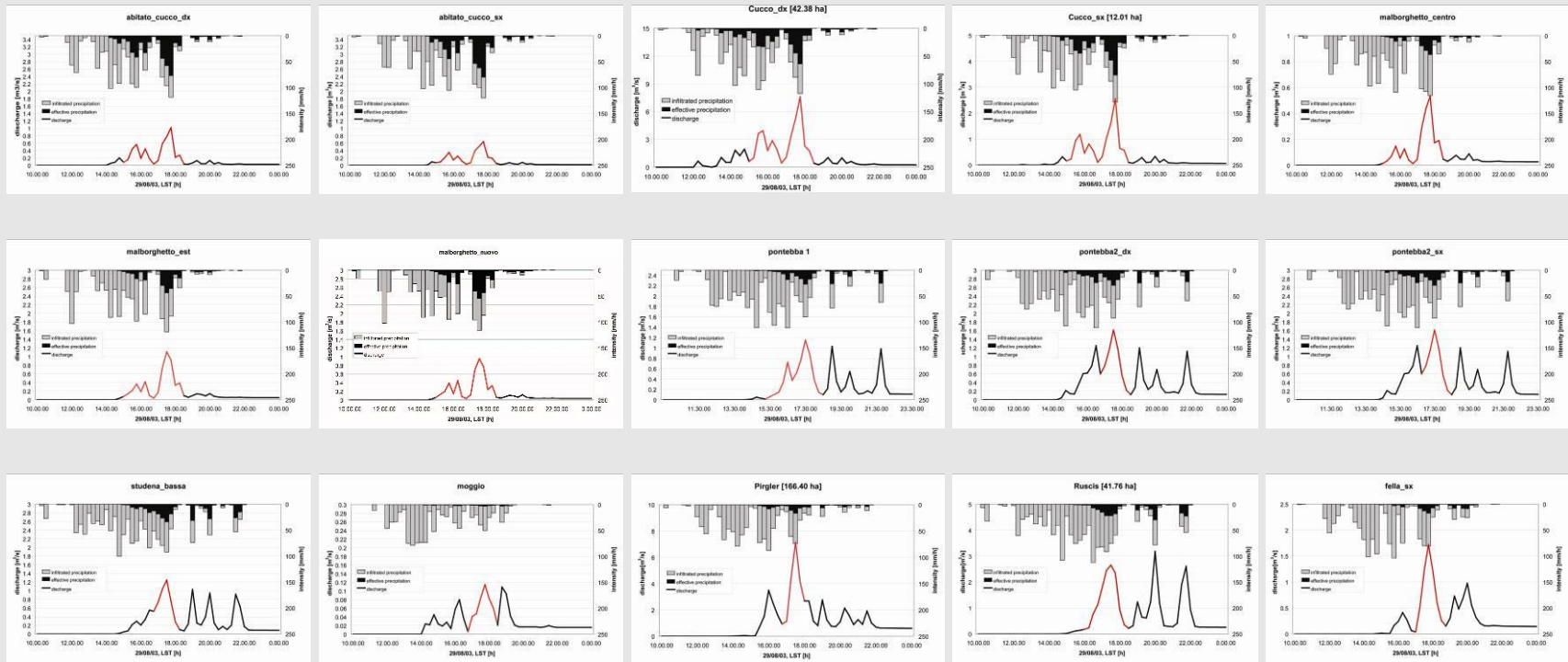


# FLO-2D: input file (an example)

Computational domain  
(5x5 m)  
From CTRN or laser scanner data where available



# Alluvional event: 29 august 2003



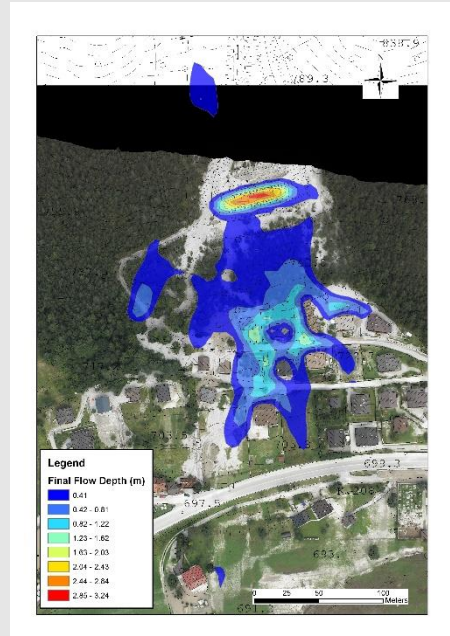
Borga et al. (Department of Territory and Sour-Forest Systems, Padova University)

# FLO-2D, BACK ANALYSIS: I PARAMETRI REOLOGICI UTILIZZATI

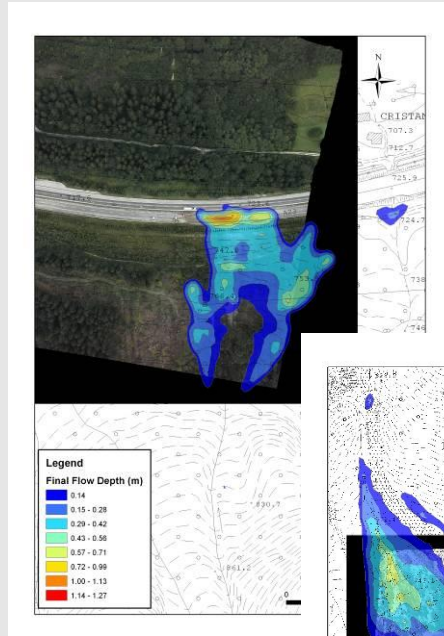
Simulation	$\eta$		$\tau$		Model
	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	
Simulation 1	0.036	22.1	0.181	25.7	Aspen Pit 1
Simulation 2	0.0538	14.5	2.72	10.4	Aspen Pit 2
Simulation 3	0.00136	28.4	0.152	18.7	Aspen Natural Soil
Simulation 4	0.128	12	0.0473	21.1	Aspen Mine Fill
Simulation 5	0.000495	27.1	0.0383	19.6	Aspen Watershed
Simulation 6	0.000201	33.1	0.291	14.3	Aspen Mine Source Area
Simulation 7	0.00283	23	0.0345	20.1	Glenwood 1
Simulation 8	0.0648	6.2	0.0765	16.9	Glenwood 2
Simulation 9	0.00632	19.9	0.000707	29.8	Glenwood 3
Simulation 10	0.000602	33.1	0.00172	29.5	Glenwood 4
Simulation 11	0.0075	14.39	2.6	17.48	Dai et. al (1980)
Simulation 12	0.0075	14.39	0.152	18.7	Tecca et al.

Boniello M. A., Calligaris C., Lapasin R., and Zini L. (2010) Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed - Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 989-997. doi:10.5194/nhess-10-989-2010. ISSN: 1561-8633

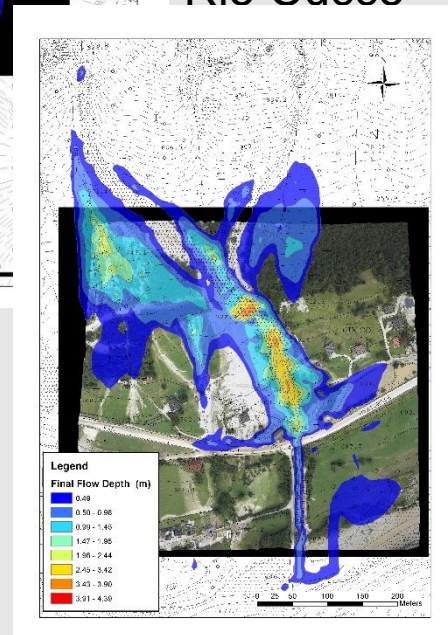
# FLO-2D: back-analysis



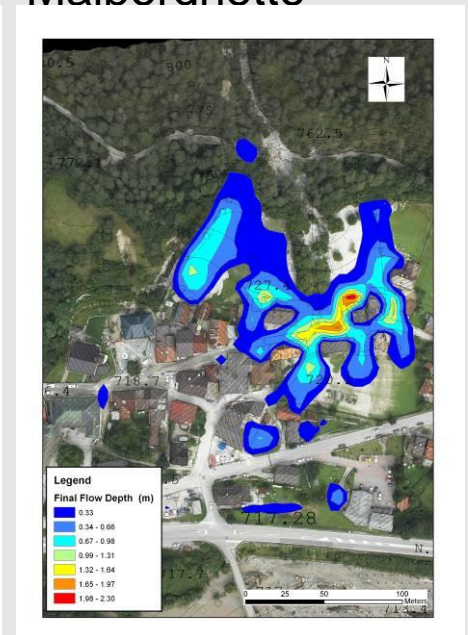
Abitato  
Cucco



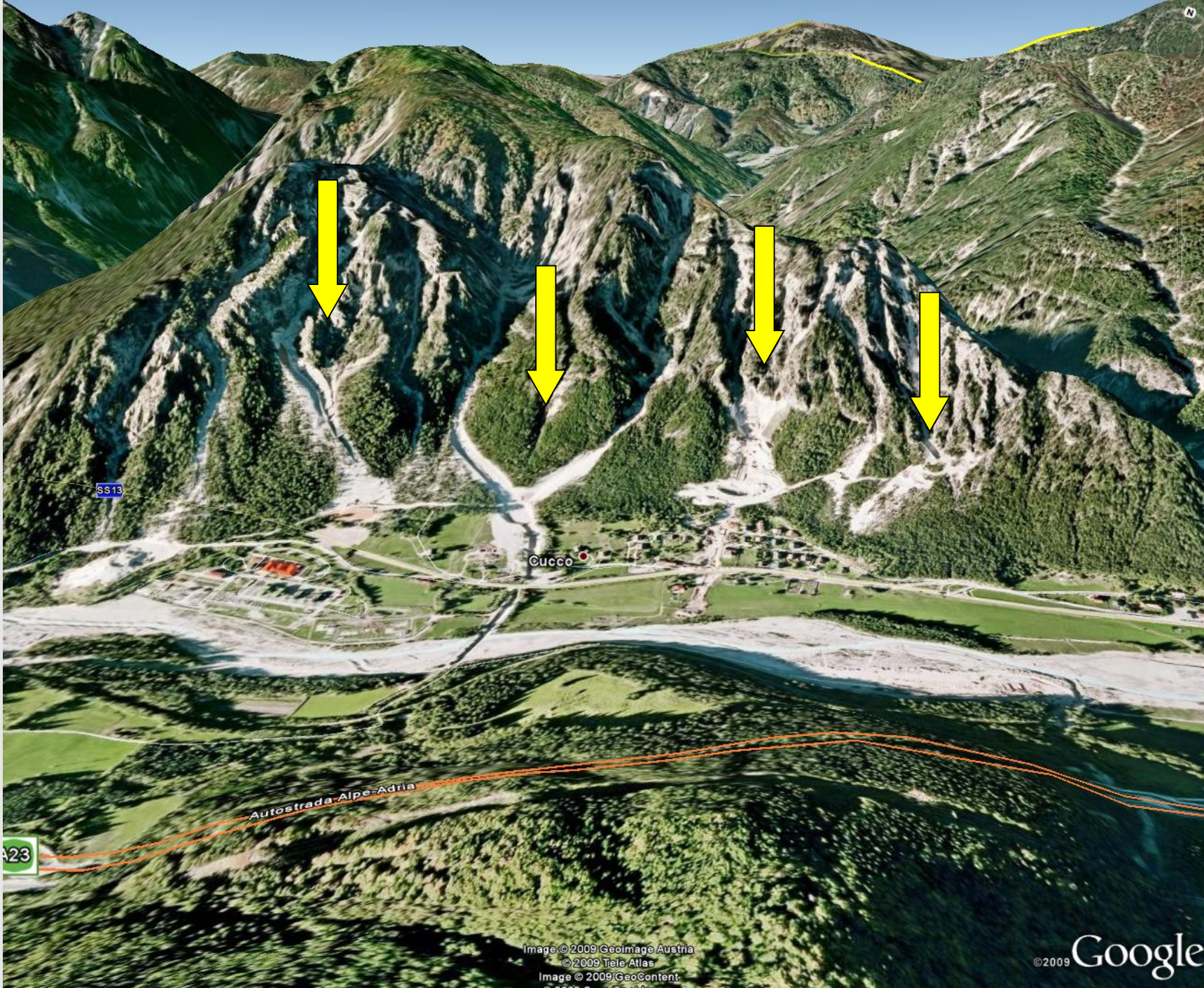
Fella sx



Rio Cucco



Malborghetto



SS13

Cucco

Autostrada Alpe-Adria

A23

Image © 2009 Geoimage Austria  
© 2009 Tele Atlas  
Image © 2009 GeoContent  
© 2009 Cnes/Spot Image

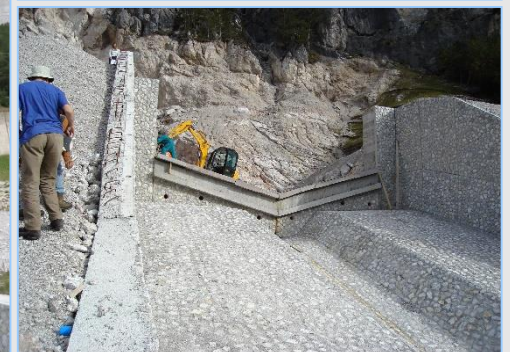
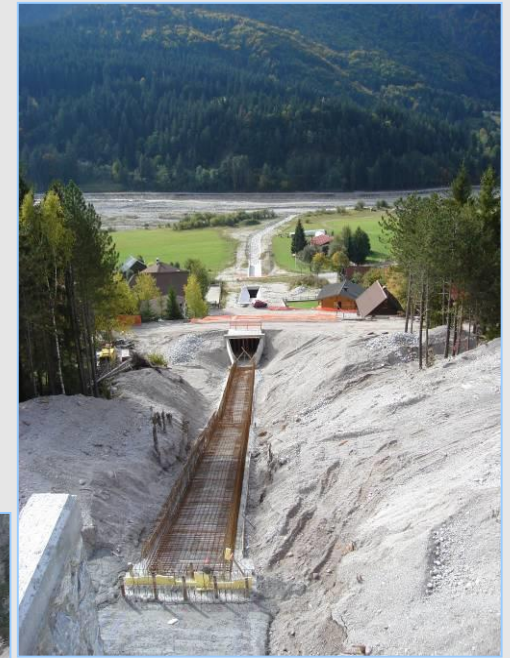
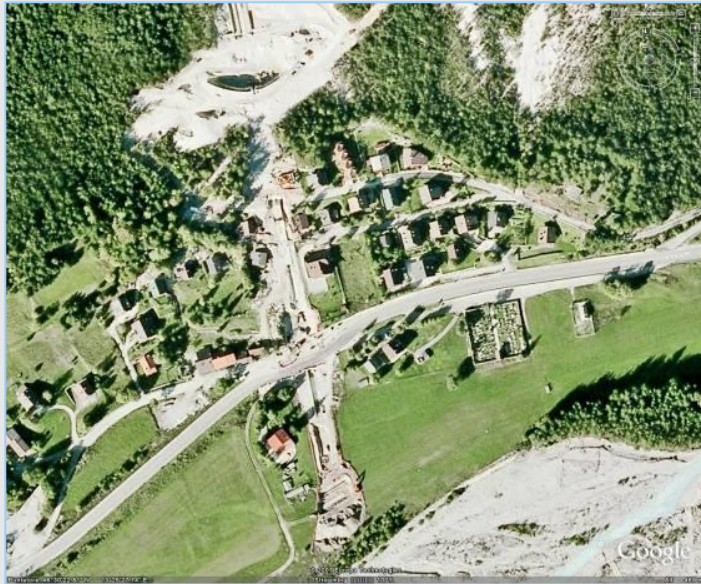
© 2009 Google

Data di acquisizione delle immagini: 10.011.2006

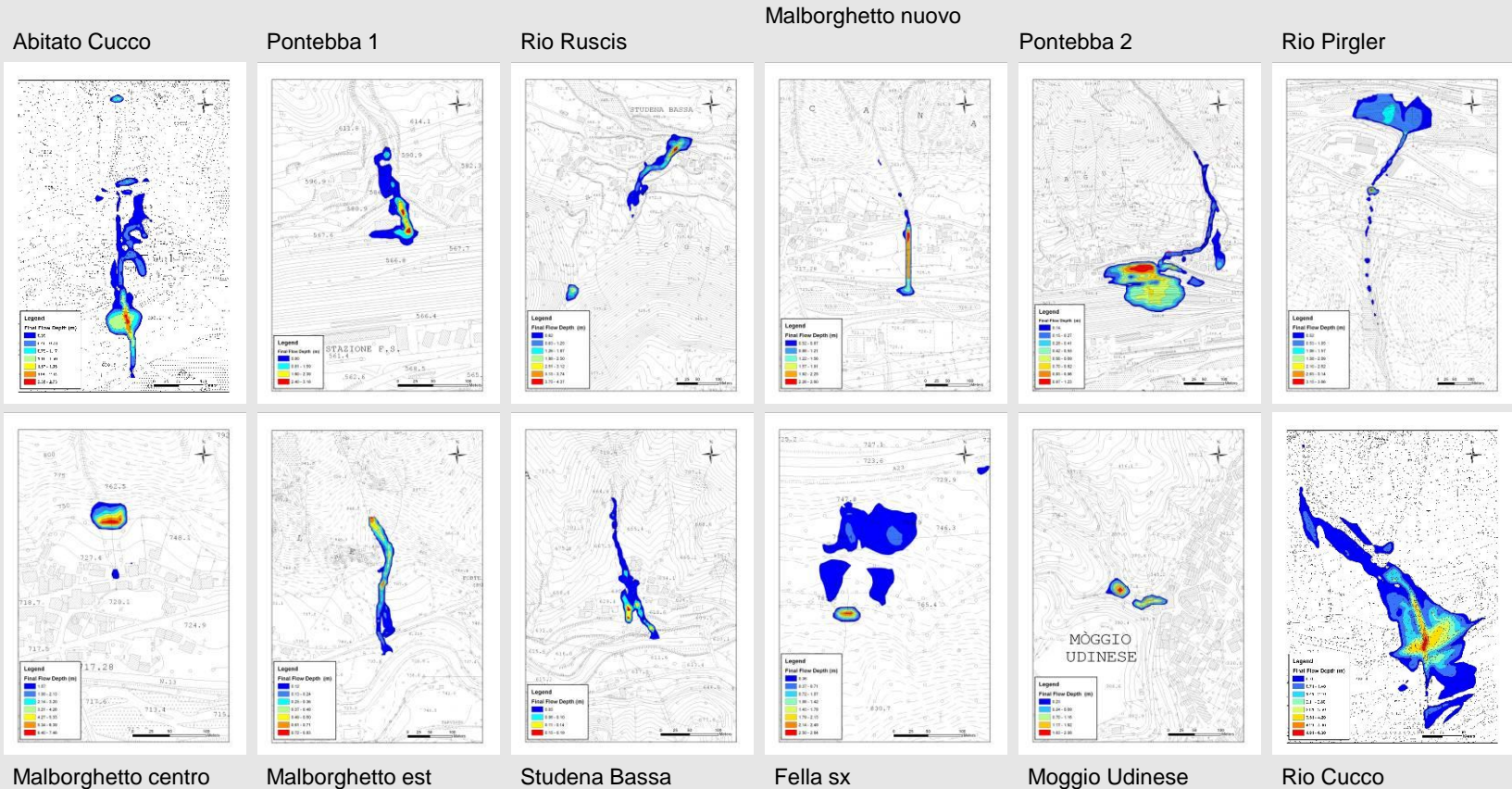
46°33'29.08" N 13°26'00.17" E 1749 m elev

1.39 km Alt

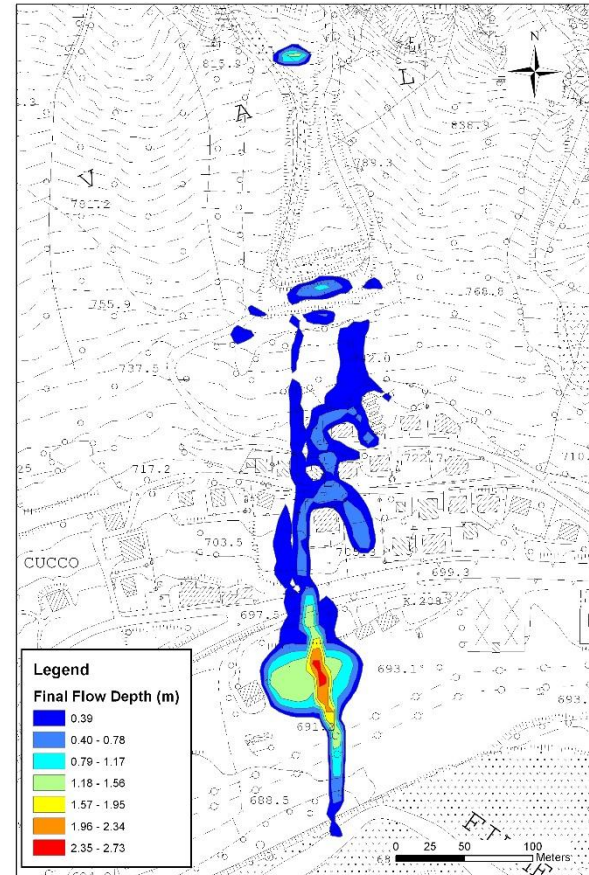
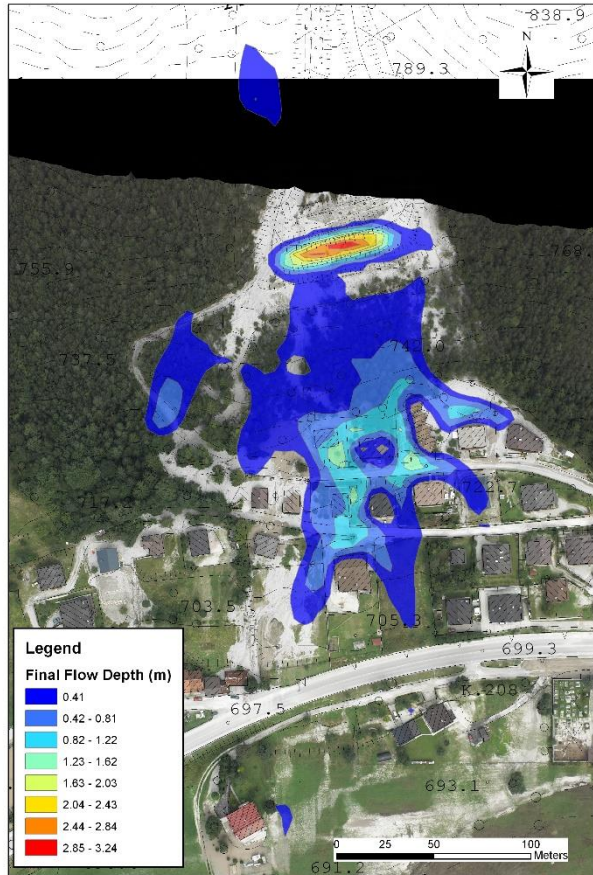
# OPERE DI MITIGAZIONE: Abitato Cucco



# FLO-2D: simulazioni realizzate tenendo in considerazione le opere di mitigazione



# FLO-2D: CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI



Images that compare simulations obtained before and after the realised mitigation works.



# MAPPE DI PERICOLOSITA' RESIDUA

