

# Genesi ed evoluzione delle forre

Pieruccioni Diego

[diegopieruccioni@isprambiente.it](mailto:diegopieruccioni@isprambiente.it)



Foto di S. Iannelli

Corso nazionale di aggiornamento culturale  
online in Geologia

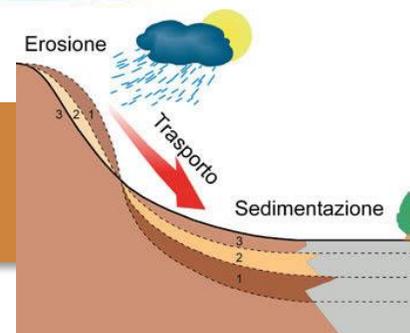
12-28 Novembre 2024



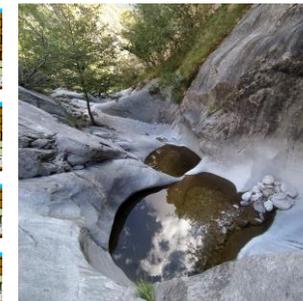
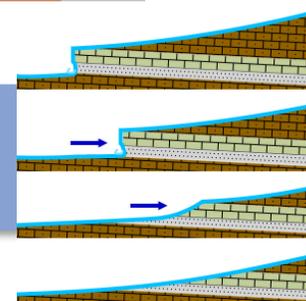
# Introduzione alla dinamica fluviale



## Il trasporto fluviale



## L'erosione fluviale

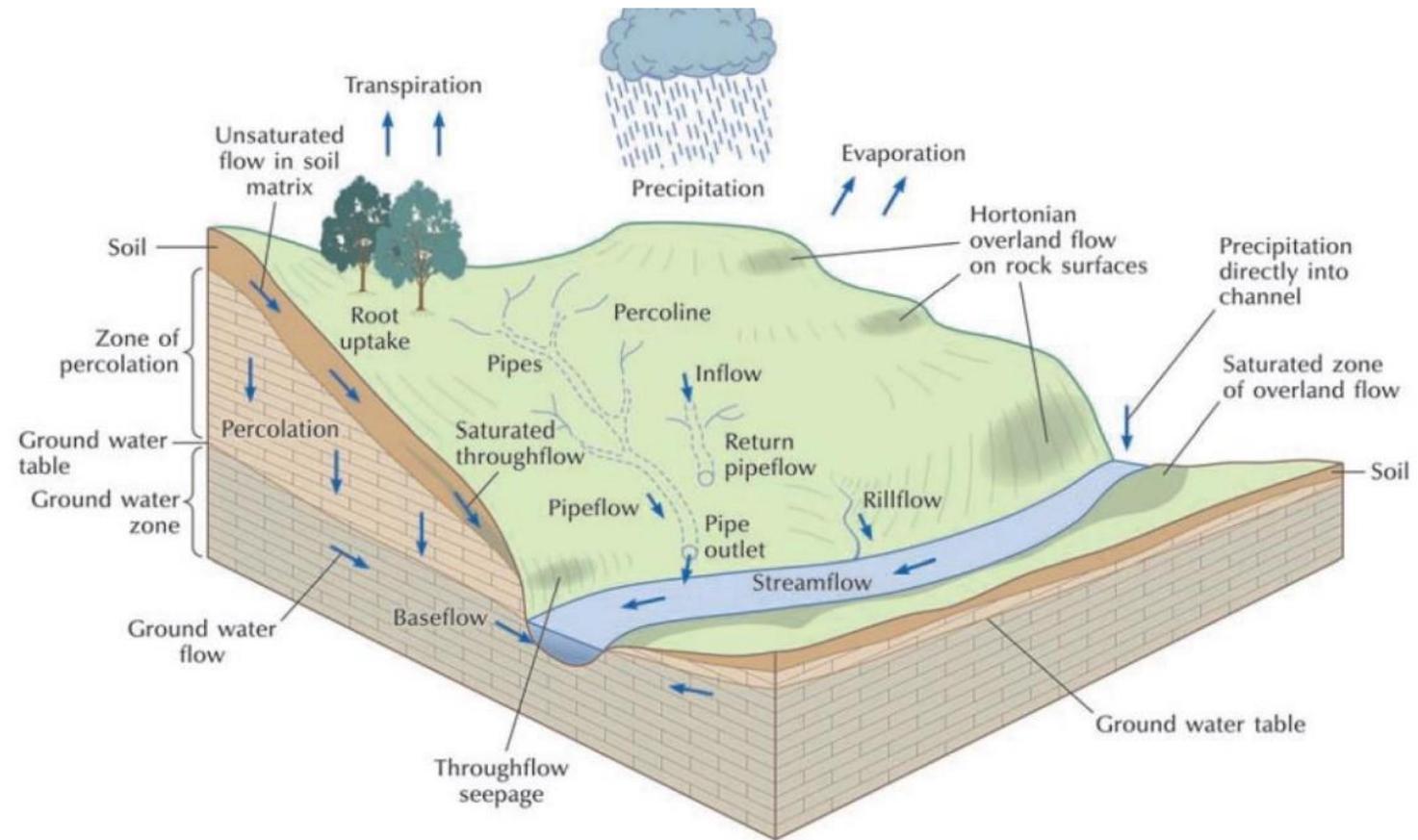
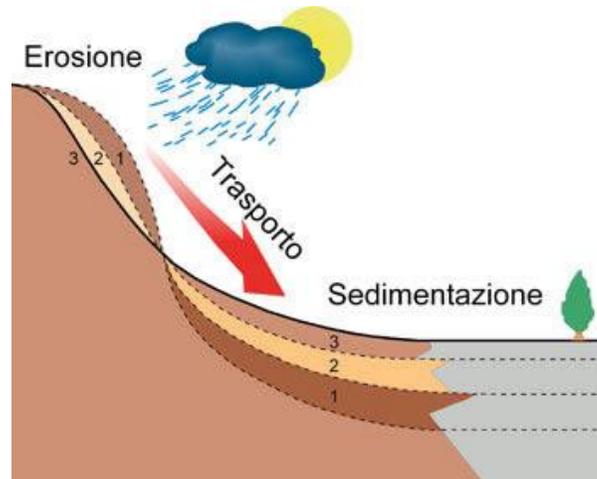


## Morfologia delle forre



# Elementi di dinamica fluviale

Negli alvei fluviali, o letti, si manifestano le azioni morfologiche dei corsi d'acqua, con processi di erosione, trasporto e sedimentazione. Le sponde dell'alveo non sono sempre definite in modo netto; esondazioni e divagazioni fanno sì che il modellamento fluviale possa estendersi ad aree molto vaste, particolarmente in pianura. In modo indiretto l'azione fluviale si fa sentire anche sui versanti delle valli e nei bacini in cui i corsi d'acqua sfociano. Un bacino idrografico costituisce una unità naturale in senso morfologico, oltre che in senso idrologico.



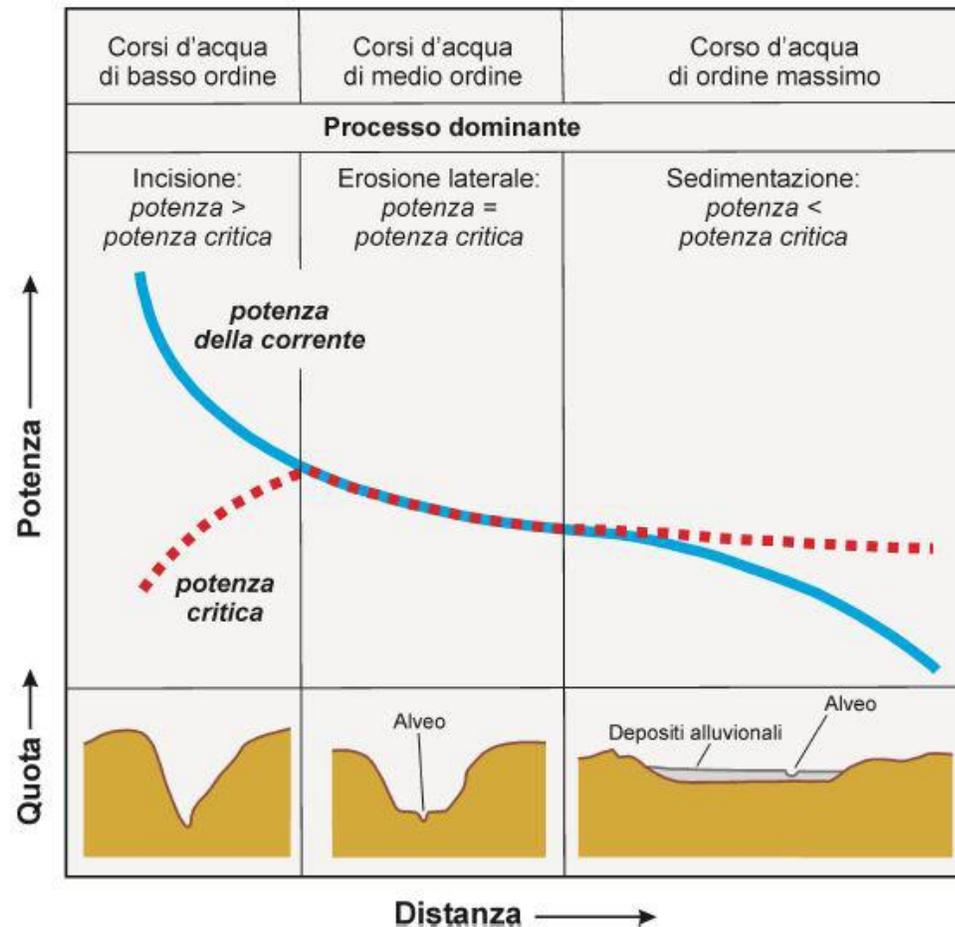
Schema dei processi di modellamento morfologico all'interno di un bacino idrografico.

# Elementi di dinamica fluviale

Il lavoro svolto dall'acqua nell'alveo del fiume prende origine dal fatto che essa è dotata di una velocità, a sua volta causata dalla forza di gravità, che agisce perché ci sono dei dislivelli. In termini di energia, **l'energia potenziale di cui l'acqua è dotata all'origine**, per essere ad un'altitudine superiore rispetto alla foce, **si trasforma in energia cinetica**; ma poiché vediamo che nell'insieme la velocità non aumenta progressivamente verso la foce, è chiaro che **tale energia va spesa negli attriti interni**, dovuti soprattutto alla turbolenza, negli attriti lungo il fondo e le sponde, oltre che al lavoro di distacco, di trasporto e logorio dei materiali solidi.

Il lavoro principale di **modellamento dell'alveo** si ha quando **l'energia disponibile è massima**, ovvero **durante le piene**.

Nei periodo di magra, quando l'energia disponibile è ridotta, si svolge solo un'azione di lenta modifica delle forme precedentemente realizzate

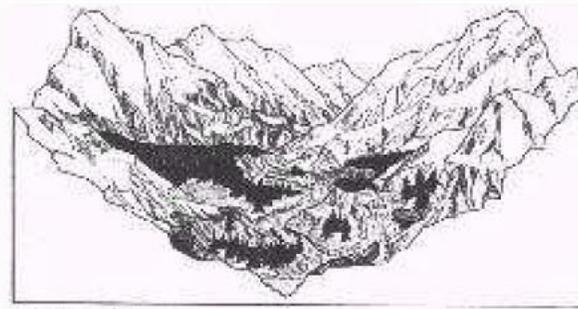


Schema che mette in relazione l'energia potenziale dell'acqua, in base al rilievo topografico, e l'energia cinetica dispersa durante il tragitto verso la foce

# Elementi di dinamica fluviale

In base all'energia in gioco si possono individuare differenti morfologie degli alvei fluviali:

❖ **Tratto montano:** si hanno pendenze elevate; sezione generalmente stretta e profonda; dimensioni rilevanti del materiale solido trasportato; carattere spiccatamente torrentizio.



❖ **Tratto medio-vallivo:** alveo poco inciso, piuttosto ampio, spesso ramificato e con andamento planimetrico variabile nel tempo (migrazione barre fluviali); dimensioni del materiale solido ridotte rispetto al tratto montano.



❖ **Tratto vallivo:** pendenza del fondo contenuta; tortuoso, spesso meandriforme; sezione in genere larga e poco profonda; dimensioni contenute del materiale solido trasportato.



# Forma e tracciato degli alvei fluviali

Gli alvei naturali, in relazione alla loro dinamica e alla tipologia roccia attraversata, si possono distinguere in:

## Alvei a fondo fisso

Sono **incisi in roccia massiva**, e praticamente privi di sedimenti, esclusi grandi blocchi che invadono l'alveo stesso. Sono tipici di zone montane, con forti pendenze, non sono di grandi dimensioni e sono in erosione più o meno accentuata indipendentemente dalle caratteristiche geomorfologiche, climatiche e litologiche.



Esempio di alveo a fondo fisso (Sa Spendula, Sardegna; da M. Mastinu)

## Alvei a fondo mobile

Sono la tipologia di alvei più numerosi, e costituiscono i fiumi principali di un bacino idrografico. La potenza dell'acqua è molto variabile ed **i sedimenti possono essere trasportati o sedimentati in funzione dell'energia disponibile** in quel momento. Sono presenti soprattutto nelle zone vallive medie e inferiori, formando anche grandi pianure alluvionali. Possono avere grandi dimensioni.

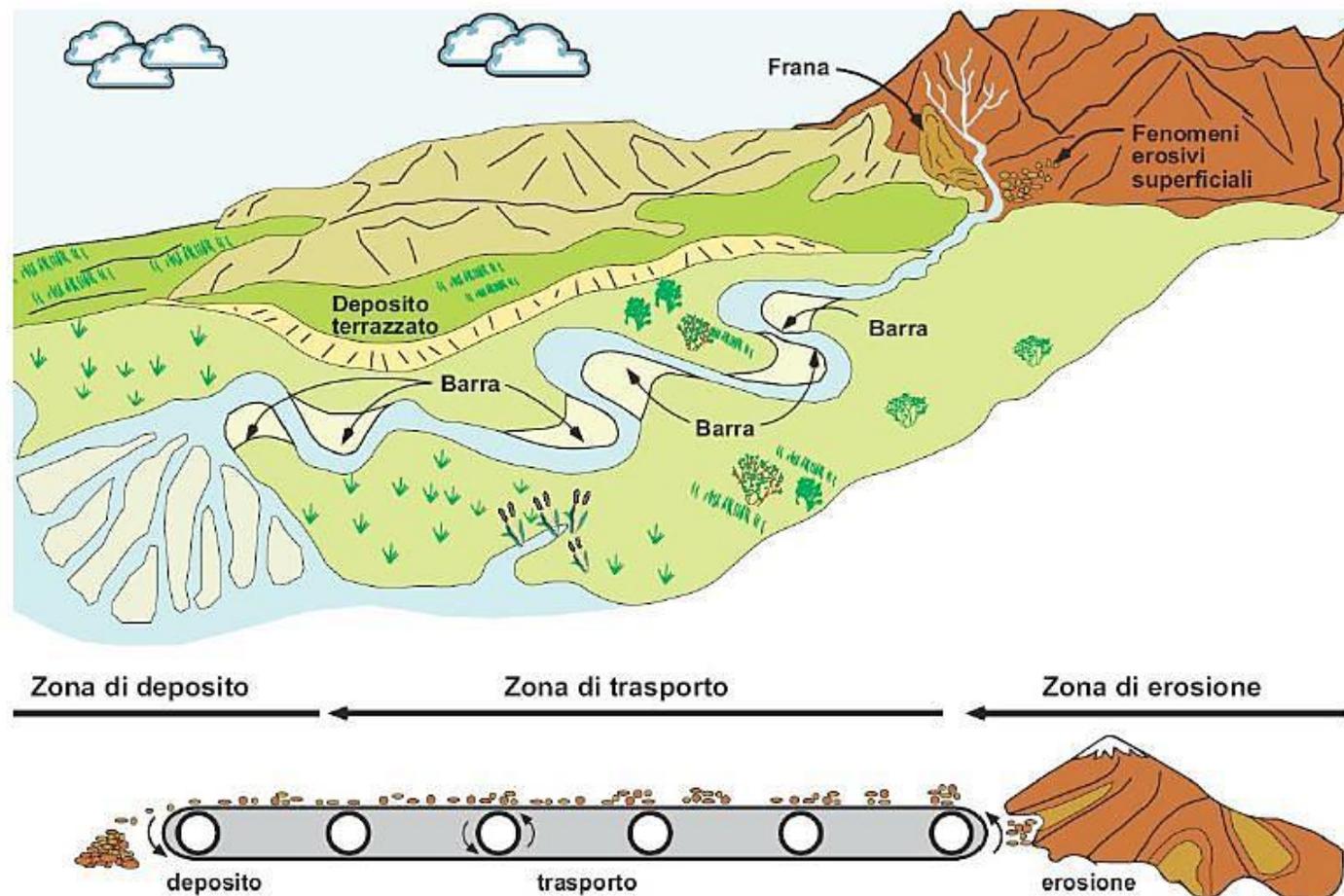


Esempio di alveo a fondo mobile (da F. Pascarella)

# Elementi di dinamica fluviale

Il sistema fluviale può essere paragonato ad un nastro trasportatore di sedimenti, dalla zona di erosione (montana) a quella di deposito (valle, lago, mare). Ciò vale sia per il corso d'acqua nel suo insieme, sia per i singoli affluenti provenienti dai sottobacini, le cui zone di erosione producono sedimenti (da frane, da erosione incanalata o da erosione areale) e le cui zone di deposito sono rappresentate dalle conoidi di deiezione presso lo sbocco nella valle maggiore.

Quindi, i fiumi, sono dei e propri agenti morfologici in grado di modellare il territorio.



Lago Nero (Alpi Apuane)

# Il trasporto fluviale

All'interno di un alveo fluviale, il movimento dei materiali, o trasporto solido, si verifica in modi differenti:

- ❖ **Trasporto in sospensione:** interessa i materiali fini e finissimi diffusi in tutta la massa d'acqua in cui determina la torbidità;
- ❖ **Trasporto per trascinamento sul fondo:** consiste in un rotolamento dei ciottoli, talora in uno slittamento, spesso in un procedere a balzelli (saltazione). Si tenga presente che il peso dei frammenti rocciosi, che tenderebbe a trattenerli sul fondo, va diminuito dalla spinta idrostatica;
- ❖ **Trasporto in soluzione:** deriva dalla dissoluzione chimica nel bacino del letto a spese del materiale roccioso con cui la l'acqua è venuta in contatto;
- ❖ **Trasporto per fluitazione di materiali che galleggiano:** spiega come grossi blocchi incorporati in lastre di ghiaccio possano essere trasportati a grande distanze.

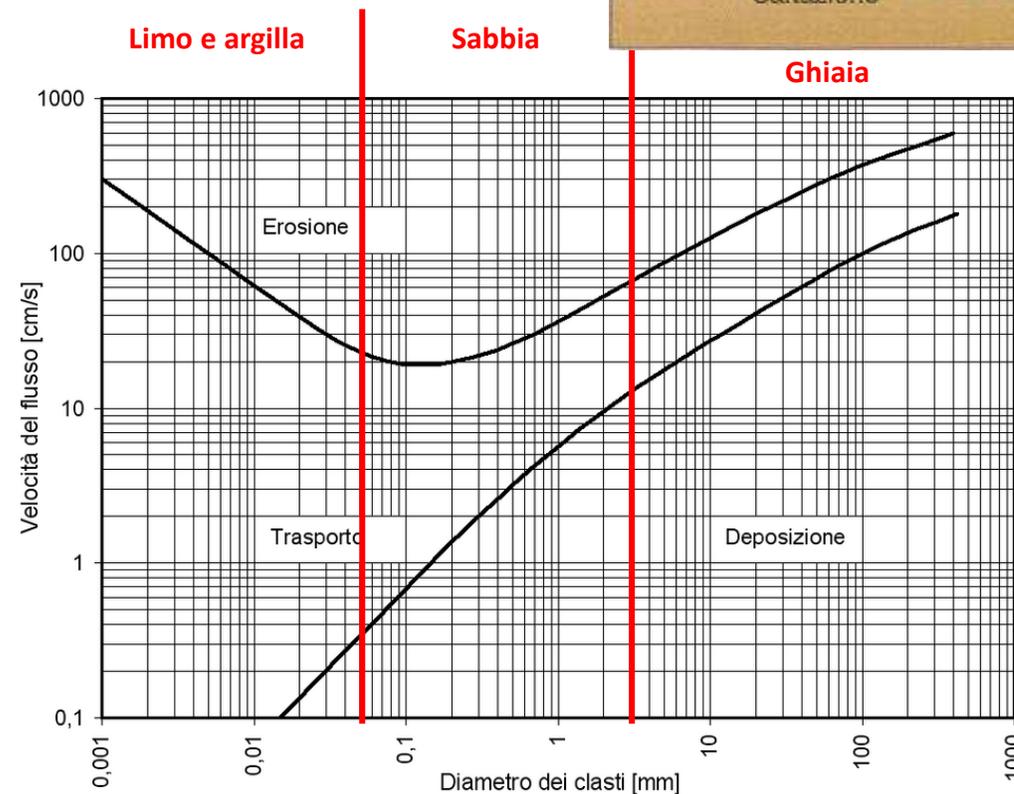


Diagramma di Hjulström utilizzato per determinare empiricamente le aree di erosione, di trasporto e di deposizione dei clasti nei corsi d'acqua in funzione delle loro dimensioni e della velocità della corrente

# Il trasporto fluviale

La **quantità di materiale trasportato** che passa per una sezione del fiume nell'unità di tempo viene chiamata **portata solida**.

I meccanismi principali del trasporto solido sono il trasporto in sospensione e il trascinamento sul fondo, **responsabili anche delle principali strutture sedimentarie** che troviamo nei depositi (anche fossili, vedi lezione I).

La differenza che intercorre fra il trasporto in sospensione e il trasporto sul fondo, si può cogliere osservando che le ghiaie e le sabbie fluviali sono spesso pulite, separate cioè dal materiale fine (argilloso) che l'acqua porta via in sospensione che andrà a depositarsi per decantazione in bacini tranquilli. Questo materiale trasportato in sospensione costituisce la **portata torbida**.

Il materiale più grossolano che rimane sul fondo (sabbie e ghiaie) vengono trasportate per trascinamento sul fondo contribuendo da un lato all'**erosione del fondo dell'alveo**, e dall'altro alla **progressiva riduzione dei frammenti solidi trasportati**.



Gradazione diretta per processi di trasporto in sospensione (Ainsa, Spagna)



Embriciatura dei clasti in sedimenti fluviali legata al trasporto per trascinamento sul fondo (Montserrat, Spagna)

# L'erosione fluviale

L'erosione fluviale è quel fenomeno che determina la movimentazione e il dislocamento dei sedimenti di fondo alveo o di sponda, in un corso d'acqua, per azione della corrente idrica.

Il processo di erosione fluviale influenza la morfologia del corso d'acqua e del suo bacino idrografico.

Il lavoro delle acque sulle rocce dell'alveo consiste in parte in azioni di disfacimento fisico e chimico (dissoluzione, vedi lezione III), ma la maggior parte è di tipo meccanico legato al movimento diretto delle acque e dagli urti e dallo sfregamento del detrito che l'acqua trasporta con se (corrasione).

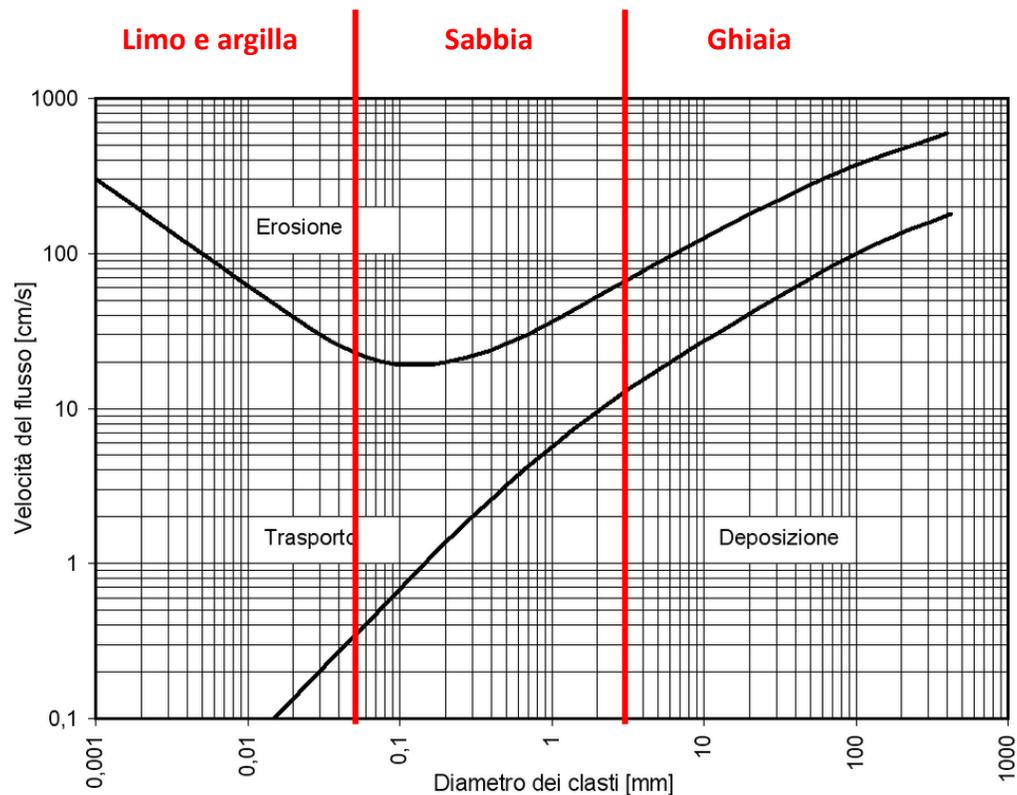


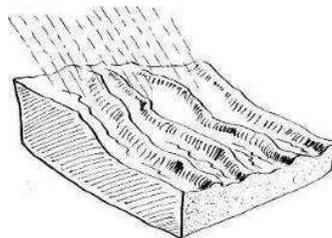
Diagramma di Hjulström utilizzato per determinare empiricamente le aree di erosione, di trasporto e di deposizione dei clasti nei corsi d'acqua in funzione delle loro dimensioni e della velocità della corrente

# L'erosione fluviale: il ruscellamento superficiale

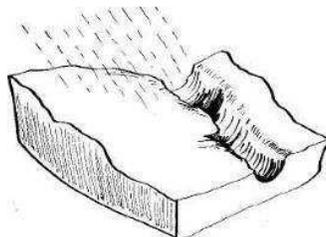
Il ruscellamento delle acque meteoriche può produrre erosione laminare (sheet erosion), per rivoli (rill erosion), per fossi (gully erosion). Durante precipitazioni intense in terreni a forte pendenza o con copertura vegetale rada, l'acqua può avere effetto dilavante. Le acque non hanno un **percorso definito ma seguono le linee di massima pendenza**, dando luogo ad un ruscellamento diffuso, il quale forma un **velo quasi continuo che asporta i materiali detritici** di più piccole dimensioni (erosione laminare). Man mano che prosegue verso valle, il flusso tipicamente laminare (sheet flow) dei **rivoli tende a confluire in fossi di dimensioni maggiori che incidono il pendio** (erosione per rivoli e per fossi). Erosione di questo tipo produce tipicamente i calanchi.



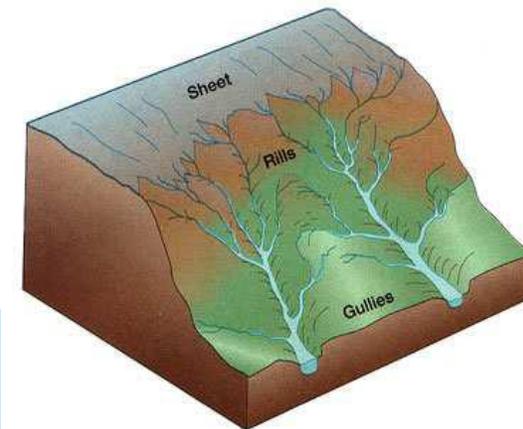
Erosione laminare



Erosione a rivoli



Erosione a fossi



Esempio di calanchi (da <https://www.ingv.it/newsletter-ingv-n-7-settembre-2020-anno-xiv/i-calanchi-il-museo-a-cielo-aperto-forgiato-dal-tempo>)

# L'erosione fluviale: lo scorrimento incanalato

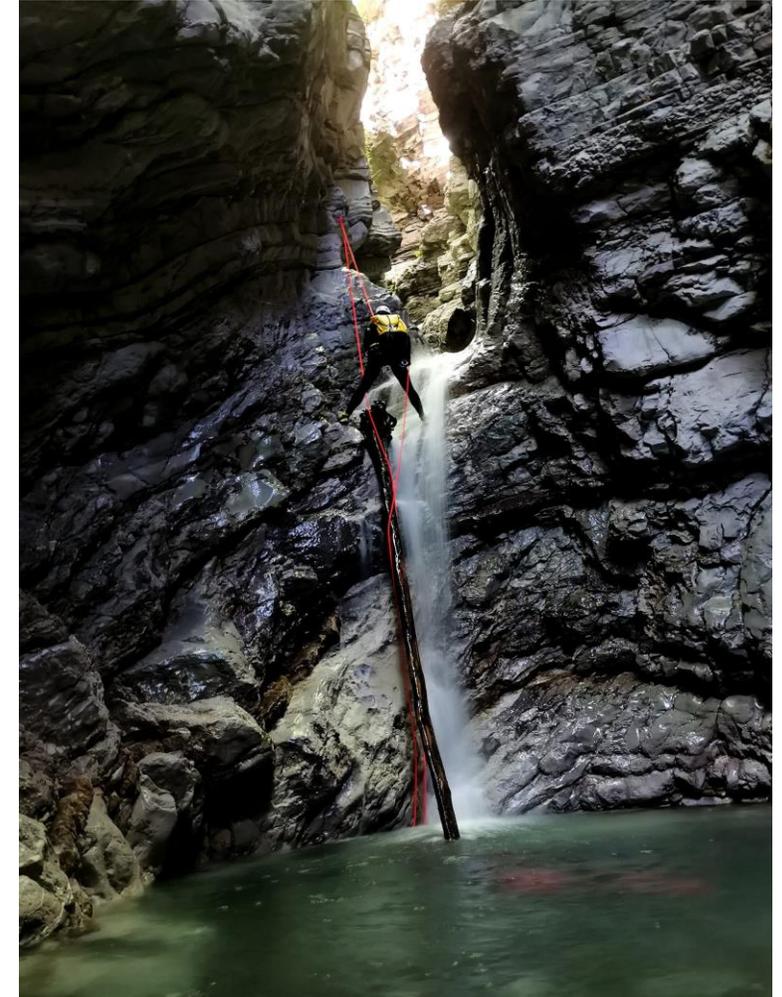
Per avere la formazione di una forra è necessario avere delle acque incanalate a formare un sistema idrografico ben definito.

In questo modo le acque superficiali incrementano la loro capacità erosiva (intesa come l'energia della corrente che è utilizzata per operare il trasporto dei materiali ed erodere nuovo materiale dall'alveo).

L'entità dell'azione erosiva di un corso d'acqua varia, inoltre, a seconda della natura del substrato (litologia e fratturazione, vedi lezioni I e II) su cui scorre ed è caratterizzato, oltre che dall'erosione meccanica, anche da processi di alterazione chimica come dissoluzione e idrolisi.



(foto S. Iannelli)



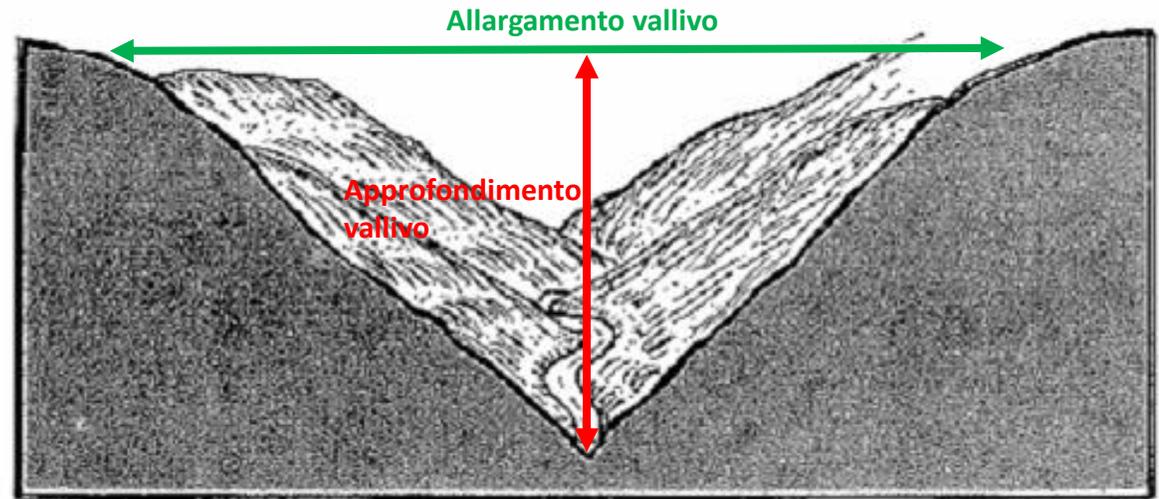
(foto S. Iannelli)

# L'erosione fluviale: lo scorrimento incanalato

La capacità erosiva può essere interpretata da diversi punti di vista:

## 1. Sezione trasversale:

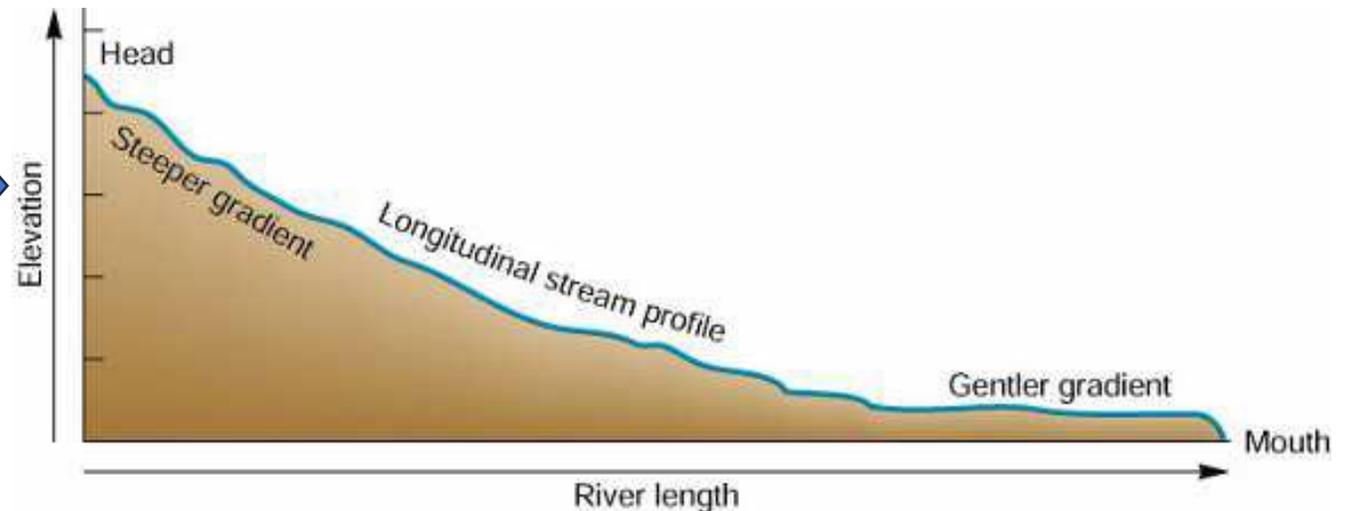
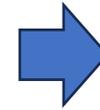
- ❖ erosione lineare: approfondimento vallivo;
- ❖ erosione laterale: ampliamento vallivo.



Sezione trasversale di un corso d'acqua

## 2. Sezione longitudinale:

- ❖ erosione regressiva: eliminazione cascate, allungamento vallivo.



Sezione longitudinale di un corso d'acqua

# Erosione lineare: approfondimento vallivo

L'erosione lineare, ed il conseguente approfondimento vallivo, è determinata da:

- ❖ energia della corrente;
- ❖ abrasione esercitata dagli elementi detritici in essa trasportati;
- ❖ turbolenza.

Si verifica maggiormente nelle parti dove il corso d'acqua è più ripido (tratto montano) e molto più in alto rispetto al livello di base.

Il suo effetto complessivo è la formazione di una valle profonda con fianchi fortemente inclinati e una sezione a forma di V.

Questo è generalmente vero, ma la forma della sezione trasversale dipende anche da fattori geologici come:

- ❖ litologia e il diverso grado di erodibilità;
- ❖ assetto strutturale (pieghe e faglie).



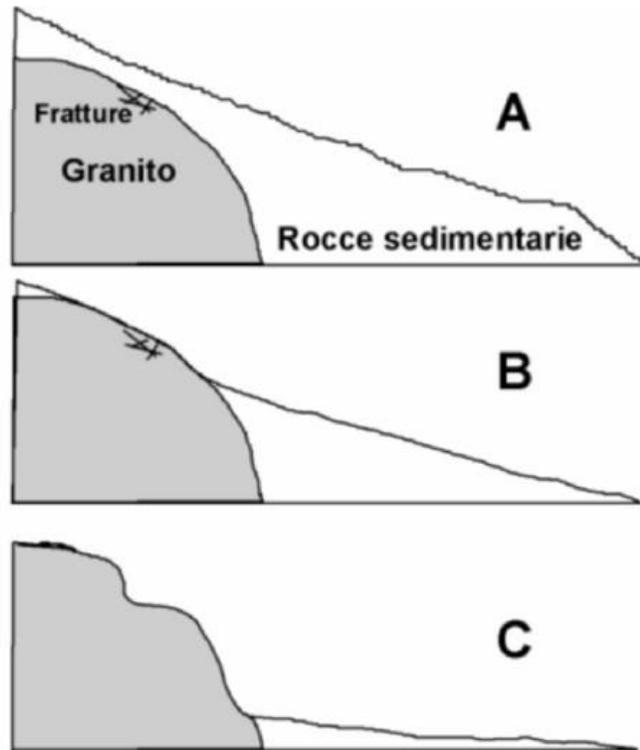
Forma a V della valle della Turrîte di Gallicano (Alpi Apuane)



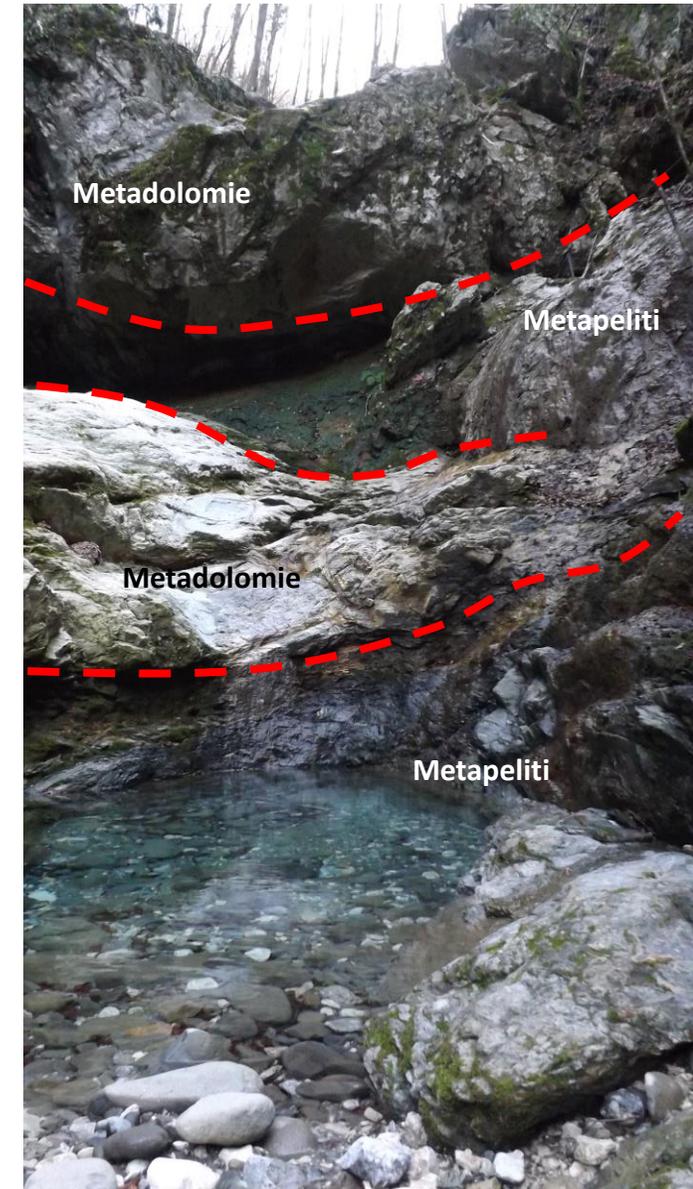
Forma a V della valle di Dades (Alto Atlante, Marocco)

# Caratteri litologici

In base alla tipologia di rocce attraversate da un corso d'acqua, si può avere un **erosione differenziale tra rocce più compatte** (difficilmente erodibili come ad esempio il granito) **e rocce meno compatte** (più erodibili come ad esempio le rocce sedimentarie).



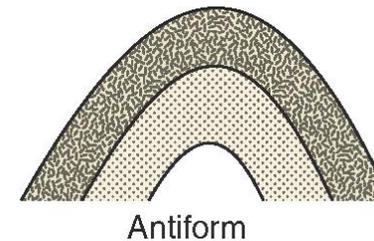
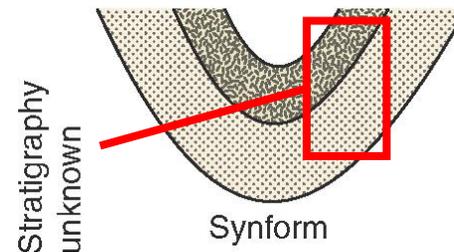
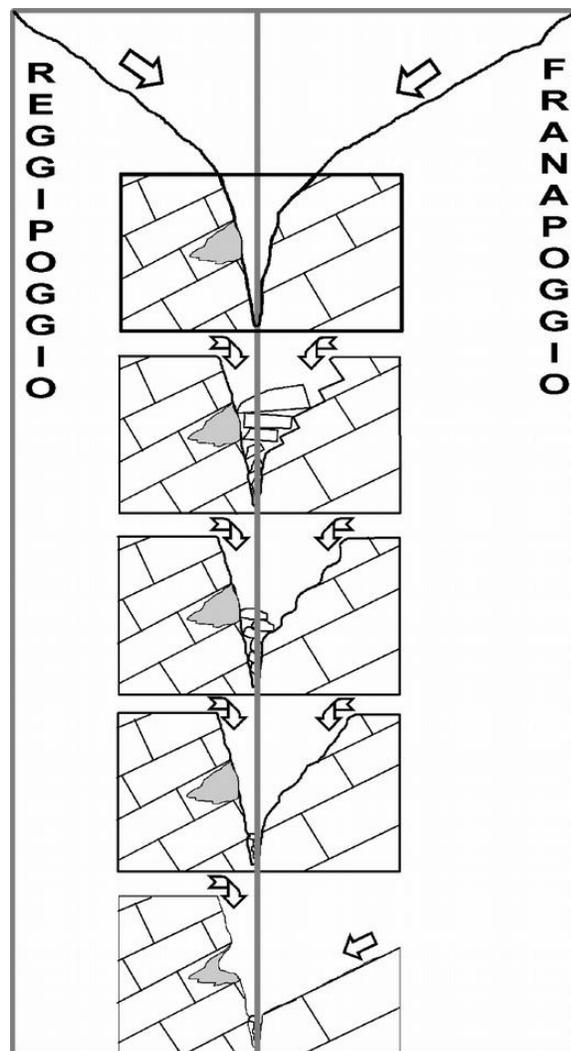
Canale dell'Acquerolo (Alpi Apuane)



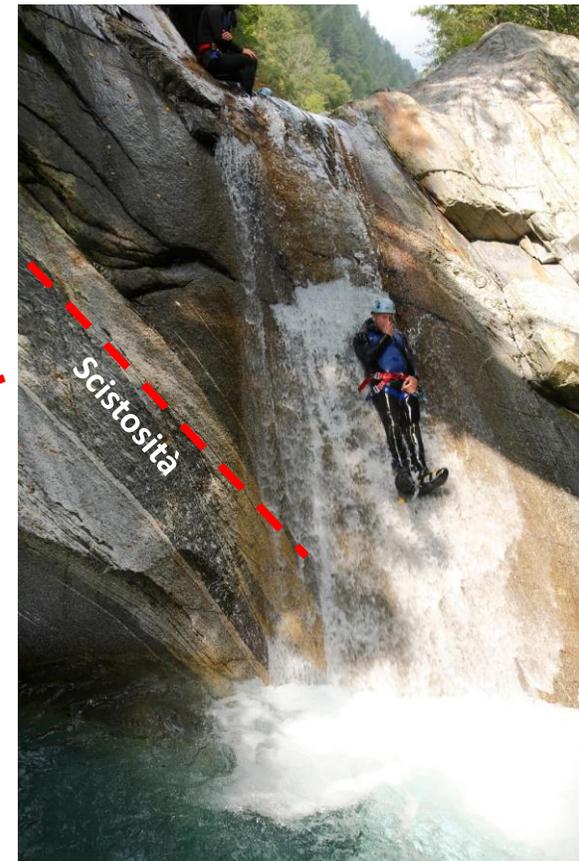
Canale del Battiferro (Alpi Apuane)

# Assetto strutturale

**L'assetto strutturale** di un ammasso roccioso, ovvero la disposizione della stratificazione (rocce sedimentarie) e/o scistosità metamorfica **influenza l'erosione da parte dell'acqua**. Infatti, la stratificazione e/o la scistosità rappresentano delle discontinuità lungo le quali l'acqua agisce un fenomeno erosivo maggiore condizionando la struttura e forma dell'alveo.



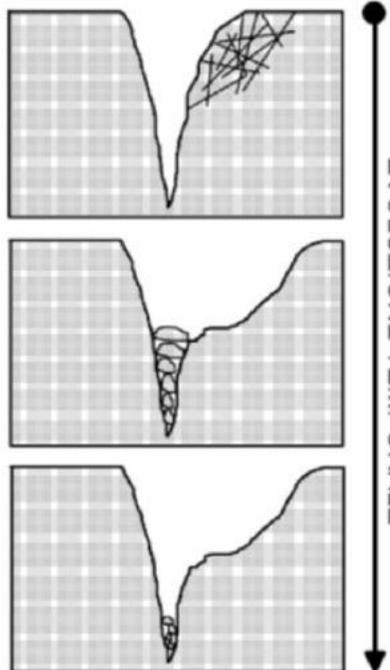
Stratificazione inclinata in calcarsi (da S. Iannelli)



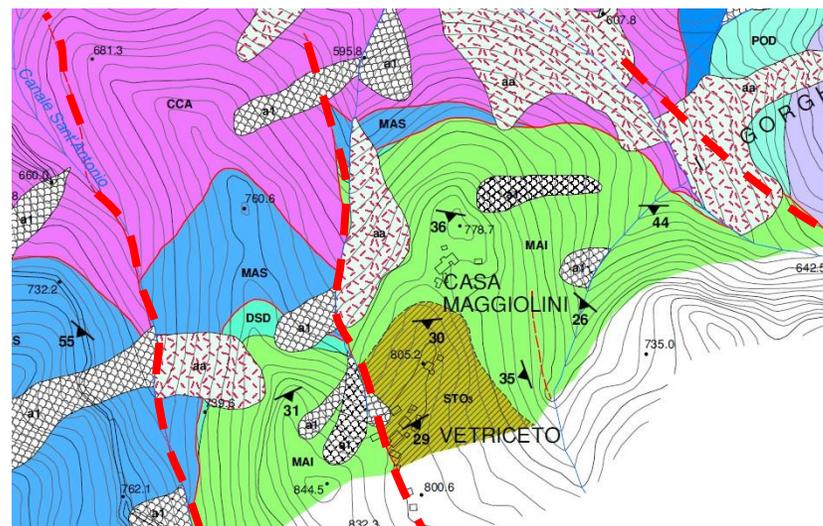
Scistosità inclinata in migmatiti (Val Bodengo; da <https://www.italy-adventure.com>)

# Assetto strutturale

Il differente grado di erodibilità di un ammasso roccioso è condizionato, oltre che dalla presenza di differenti litologie, anche dal loro **stato di fratturazione**. Strutture geologiche fragili come le **faglie** possono condizionare lo sviluppo del reticolo idrografico oltre a rappresentare delle zone maggiormente erodibili consentendo un rapido approfondimento dell'alveo.



EVOLUZIONE TEMPORALE



Stralcio carta geologica di Fornovolasco (Alpi Apuane; da Pieruccioni et al., 2018)



Cataclasite in marmi del M. Altissimo (Alpi Apuane)



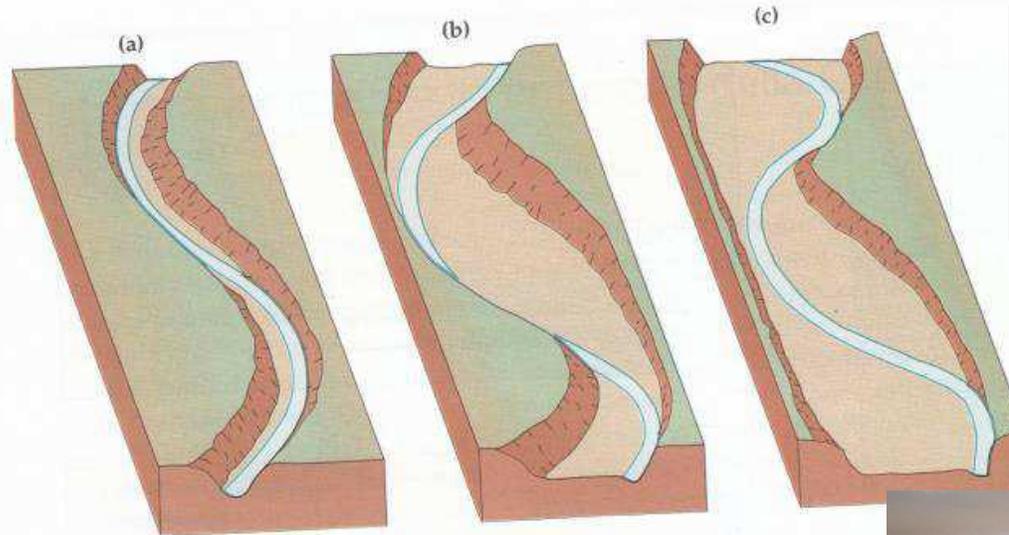
Canale inciso lungo faglia (Alpi Apuane)

# Erosione laterale: ampliamento vallivo

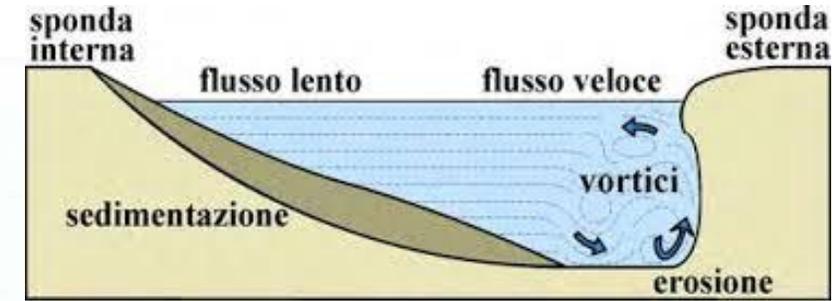
Si verifica dove il corso d'acqua assume un profilo più dolce e l'energia dell'acqua è dissipata nell'andamento a meandri.

Il processo di erosione si verifica nei tratti curvi esterni degli alvei, in corrispondenza dei quali l'acqua si muove più velocemente attaccando la riva. La progressiva migrazione dei meandri quindi produce un fondo valle sempre più ampio e pianeggiante.

In casi particolari (forte sollevamento tettonico o abbassamento del livello del mare) l'andamento a meandri si può avere anche in tratti montani producendo dei meandri incassati.



Schema dell'ampliamento vallivo a meandri



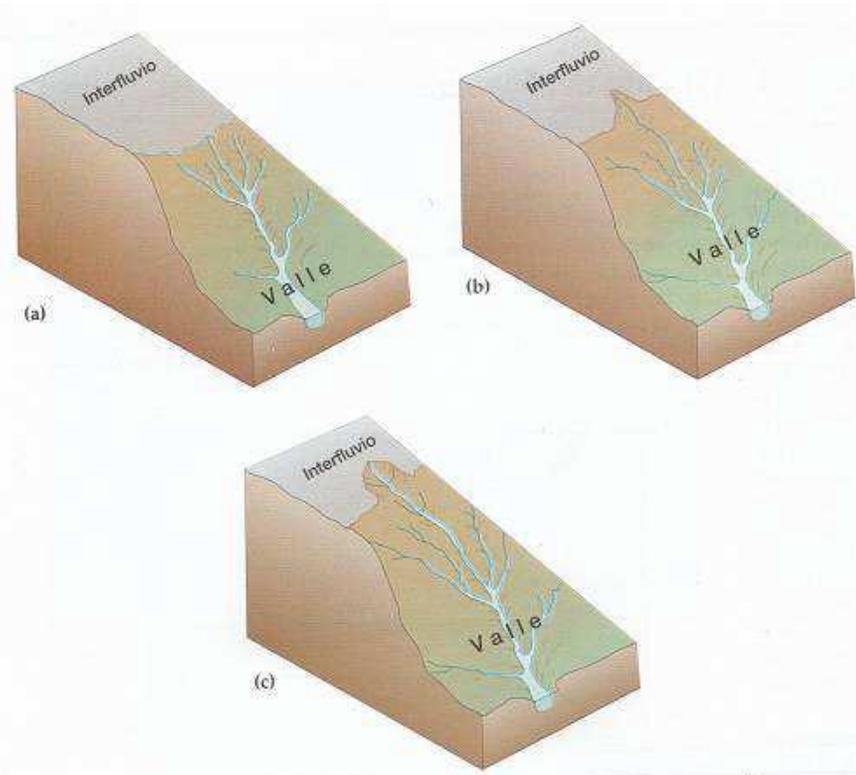
Erosione sul lato esterno del meandro e sedimentazione su quello interno

Meandro incassato del Grand Canyon (da <https://www.globalnationalparks.com/arizona/grand-canyon/>)

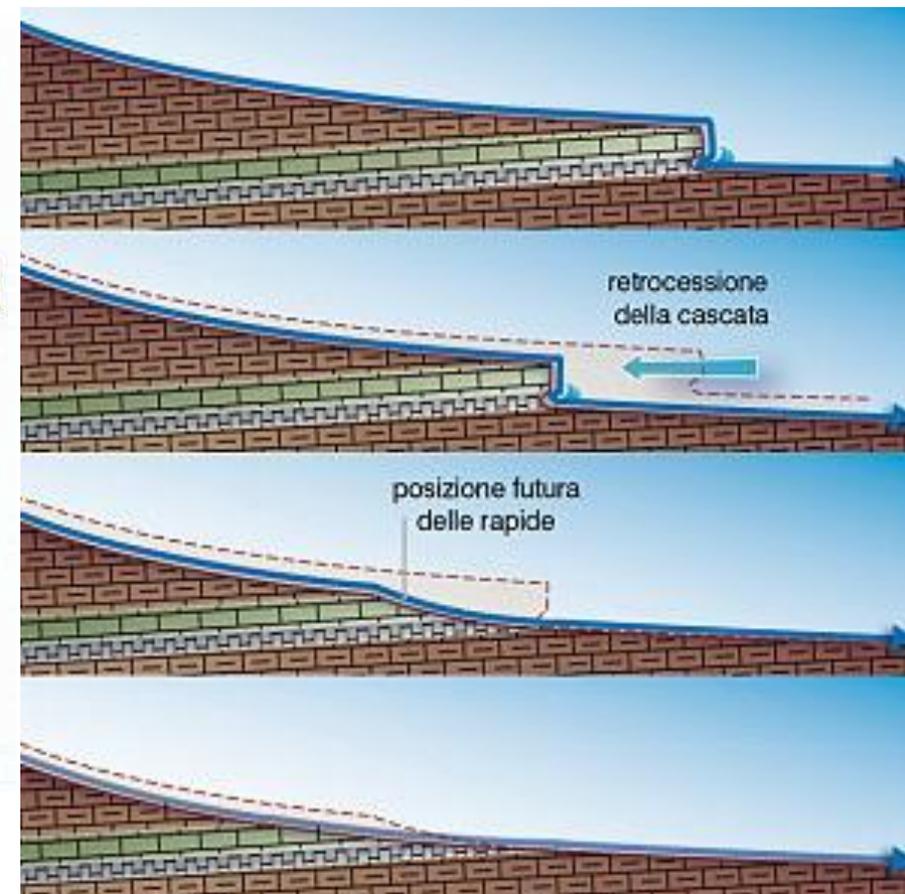


# Sezione longitudinale: erosione regressiva

L'approfondimento del letto in un tratto di un fiume fortemente inclinato provoca una diminuzione del dislivello rispetto al tratto immediatamente a valle, e l'accentuazione della pendenza nel tratto posto subito a monte. In tal caso l'erosione si propaga verso monte, mentre a valle un po' alla volta si costituisce un alveo a minor pendenza, non soggetto ad erosione (solo sedimentazione). Questo meccanismo, per cui **l'erosione si sposta sempre verso monte, viene detto erosione regressiva**. Col tempo questa erosione si trasmette anche agli affluenti **allargando progressivamente il bacino idrografico**.



Schema di propagazione dell'erosione regressiva e ampliamento del bacino idrografico

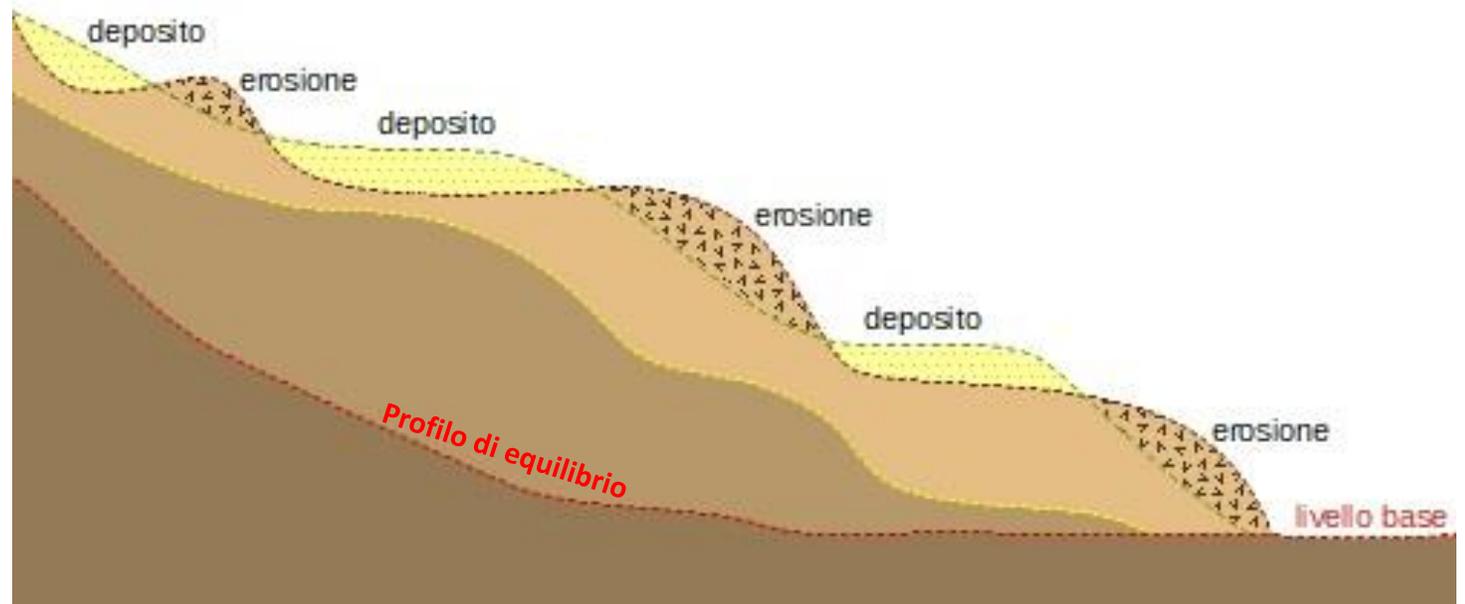


Schema relativo al processo di erosione regressiva

## Sezione longitudinale: il profilo di equilibrio

Il fiume ha origine generalmente dalle zone più elevate del suo bacino idrografico, per poi scorrere con una pendenza via via minore verso le zone meno elevate. Questo andamento longitudinale prende il nome di profilo del fiume. Esiste un profilo ideale, il **profilo d'equilibrio, che rappresenta la situazione nella quale non c'è né erosione né sedimentazione per tutta la lunghezza del fiume.**

Se il profilo reale è diverso da quello d'equilibrio, nei tratti in cui il primo è più alto del secondo avviene erosione, viceversa avviene sedimentazione. La forma del torrente quindi dipende da processi di autoregolazione. **Il profilo d'equilibrio è condizionato dal livello di base, ovvero l'altitudine in cui sfocia il fiume.**

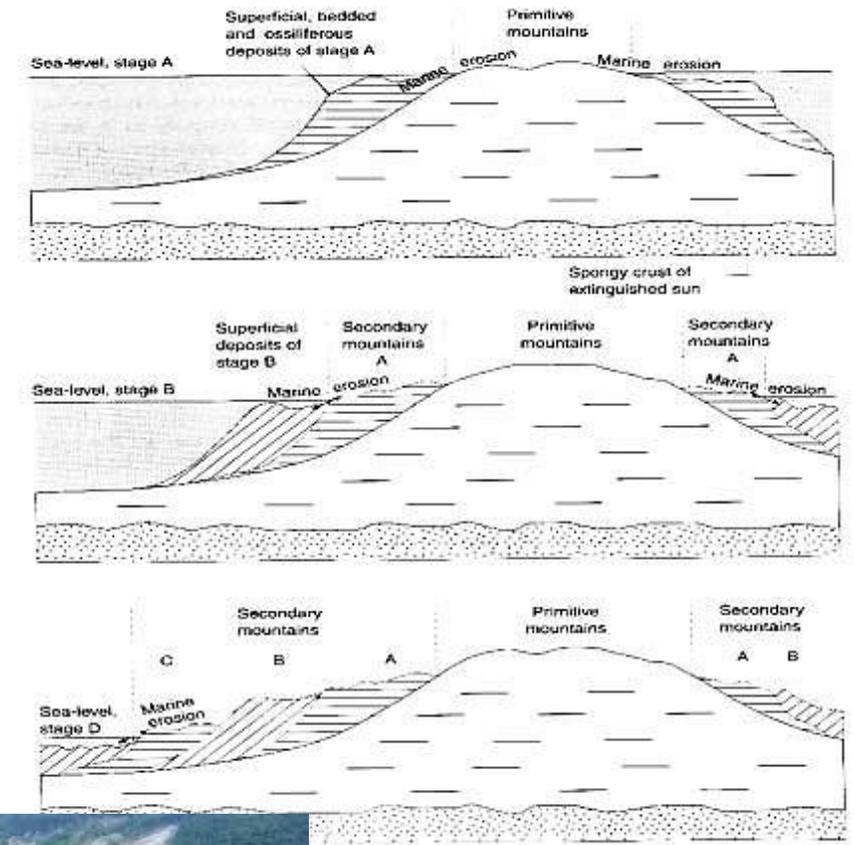


Schema relativo al processo di erosione regressiva che tende a portare il profilo longitudinale del torrente a quello di equilibrio (linea rossa)

# Sezione longitudinale: il profilo di equilibrio

Nel tempo possono avvenire delle variazioni nel profilo di equilibrio del torrente, e possono essere causate da:

- ❖ **Variazioni del livello di base**: innalzamenti e abbassamenti del livello del mare in cui sfocia il corso d'acqua (variazioni eustatiche). Può creare fenomeni di incisione (fasi abbassamento eustatico) o di sedimentazione (fasi di innalzamento eustatico).
- ❖ **Fenomeni di sbarramento (naturale o antropico)**: provocano la sedimentazione e la formazione di un lago nel tratto più a monte.
- ❖ **Movimenti tettonici**: innalzamento o abbassamento tettonico di catene montuose.
- ❖ **Variazioni di portata**: dovute a variazioni climatiche col passaggio da condizioni di semi-aridità verso condizioni a maggiore piovosità.
- ❖ **Variazioni nel trasporto solido**: dovuta ad esempio alla distruzione della copertura vegetale (deforestazione) che apporta grandi quantità di detrito che si va a sedimentare lungo l'asta fluviale.
- ❖ **Variazioni della rete idrografica**: prodotta da una deviazione fluviale che comporta una variazione di portata



Schema nel rapporto sedimentazione-erosione in relazione all'abbassamento e innalzamento eustatico

Diga del Vjont (Veneto)

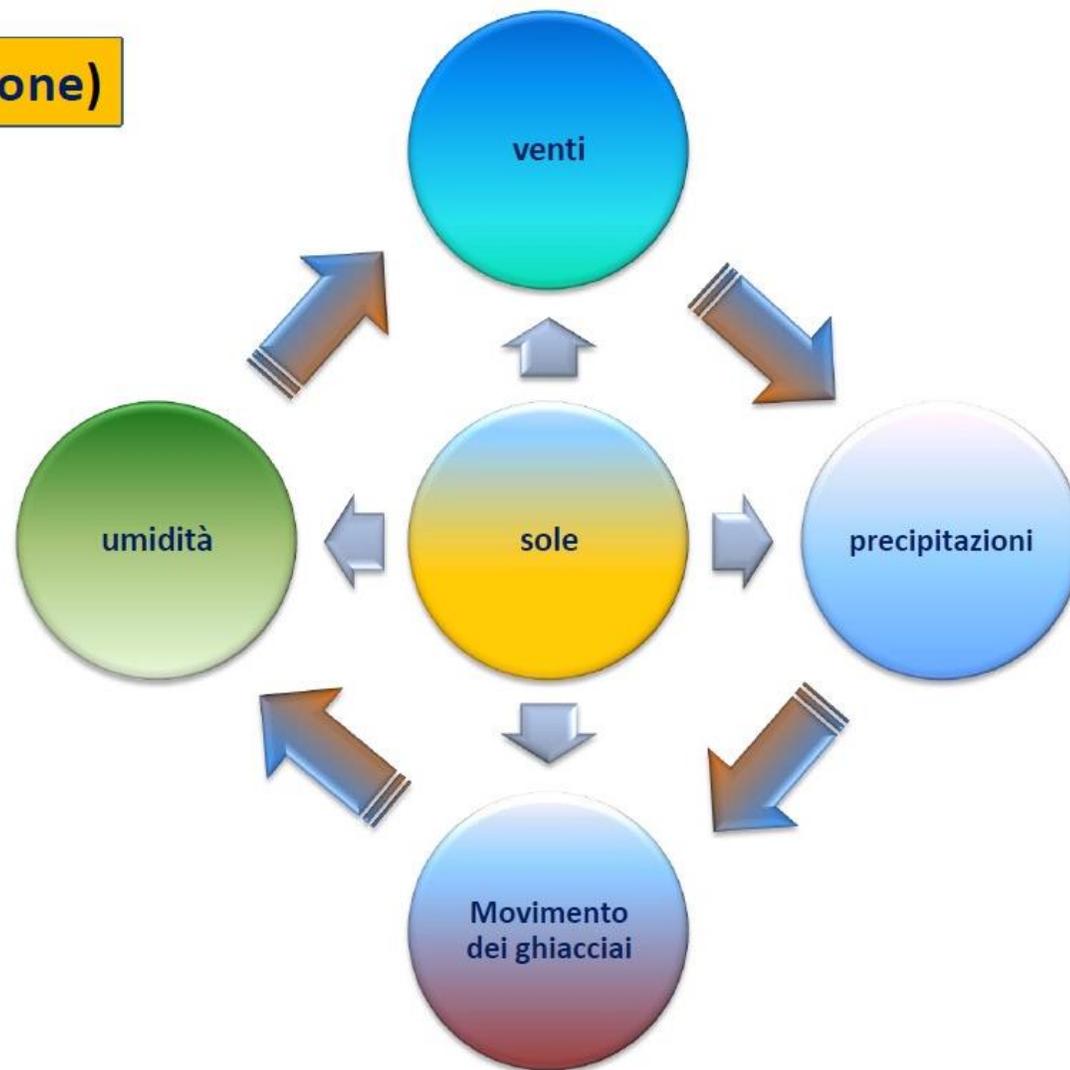
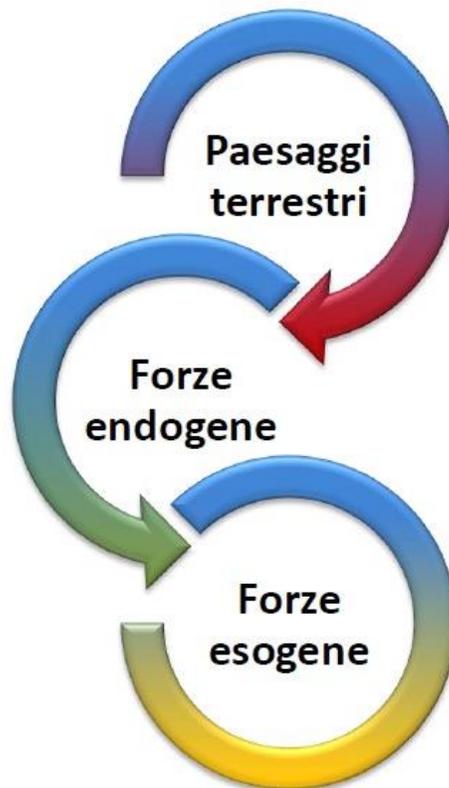
# Morfologia dei torrenti: le forze in gioco

La morfologia dei torrenti dipende da molteplici **fattori**, il cui ruolo può essere sostanzialmente:

- ❖ **passivo** (caratteristiche geologiche come litologia e assetto strutturale);
- ❖ **attivo** (condizioni ambientali).

Molte forme possono derivare anche da una combinazione di più fattori che si possono influenzare tra loro.

## Erosione (degradazione)



## Le forre e le gole

Le **forre** sono **incisioni strette e profonde con pareti a strapiombo** che si formano in corsi d'acqua che scorrono su pendii molto ripidi, per l'approfondimento di solchi vallivi.

Le **gole**, invece, **sono incisioni le cui pareti sono ancora molto ripide ma tendono ad allargarsi nella parte superiore**. Esse sono tanto più strette quanto più la roccia che le forma è dura e compatta.

La loro formazione è **dovuta** per approfondimento vallivo causato da **processi di corrosione** (erosione dovuta a sfregamento e urti del detrito trasportato), e in misura minore da **dissoluzione**.

I fattori geologici, come litologia e assetto strutturale sono fondamentali perchè possono controllare il processo di erosione.



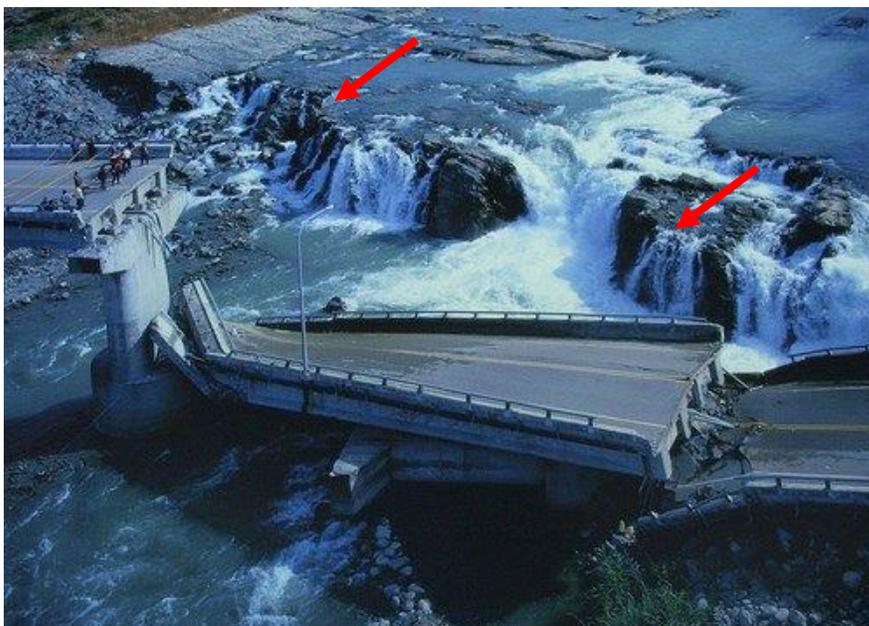
Forra di Prodo (Fosso Campione; da S. Iannelli)



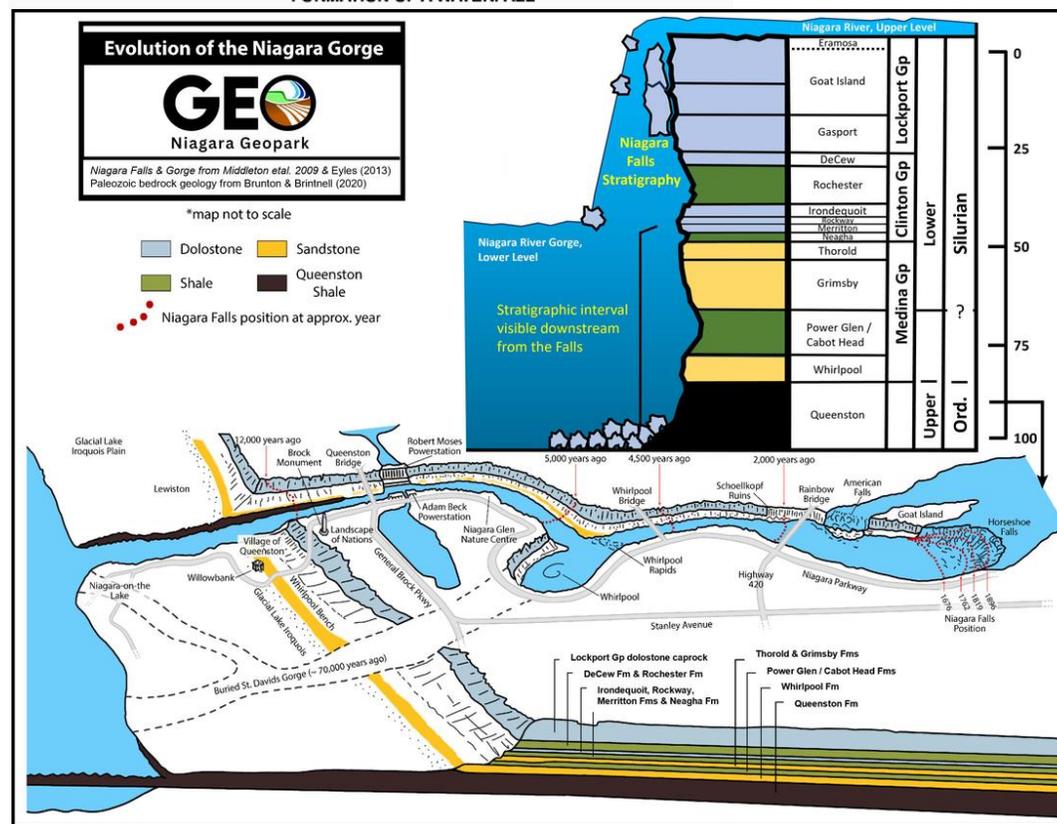
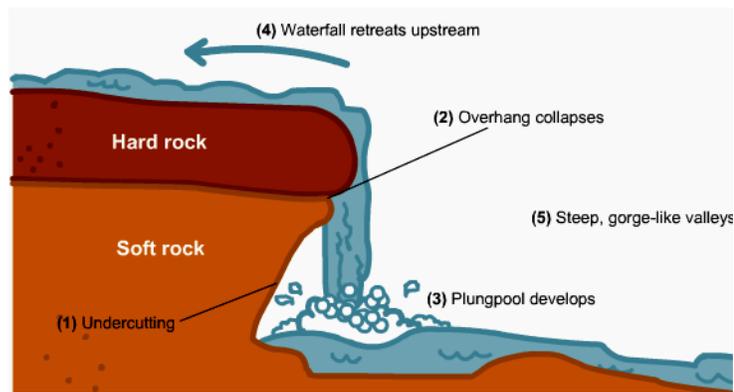
Gola di Dades (Marocco)

# Le cascate

Una cascata è quel punto in cui l'acqua di un fiume o di un torrente, a causa di una discontinuità nel suo corso, precipita verticalmente invece di scorrere orizzontalmente. Può essere prodotta da una variazione litologica tra rocce più erodibili e rocce meno erodibili, oppure dall'assetto strutturale, come ad esempio faglie (passate o ancora attive).



Cascata alta circa 6 m creata da faglia che ha prodotto il terremoto (Mw 7.7) di Chi Chi nel 1999 (Taiwan)



Cascate del Niagara.

Schema di formazione delle cascate del Niagara. La sommità della cascata è costituita da dolomie (dure) mentre la base è costituita da argilliti e alternanze di argilliti e arenarie (più friabili delle dolomie). Le acque, con il loro moto turbolento, producono un'erosione differenziale scalzando alla base le dolomie, le quali crollano comportando un arretramento della cascata.

# Meandri incassati

I meandri incassati sono meandri incisi nella roccia con pareti generalmente verticali. Spesso si tratta di una morfologia ereditata da una originaria pianura (alluvionale) per abbassamento del livello di base, che porta il corso d'acqua a erodere tutto lo spessore di sedimenti alluvionali fino alla roccia.

All'interno di catene montuose generalmente indicano un processo di sollevamento tettonico.



Meandro incassato nelle Gole di Dades (Marocco)

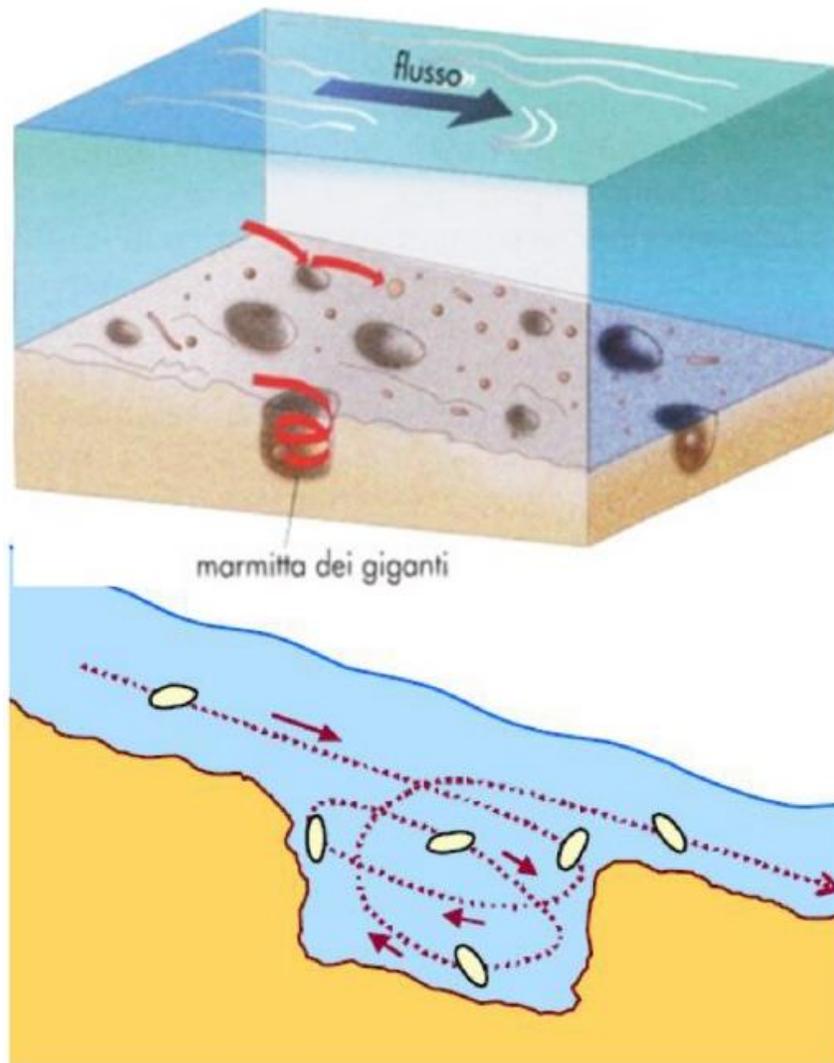
Meandro incassato nelle Gole di Dades (Marocco; da Google maps)

# Le marmitte dei giganti

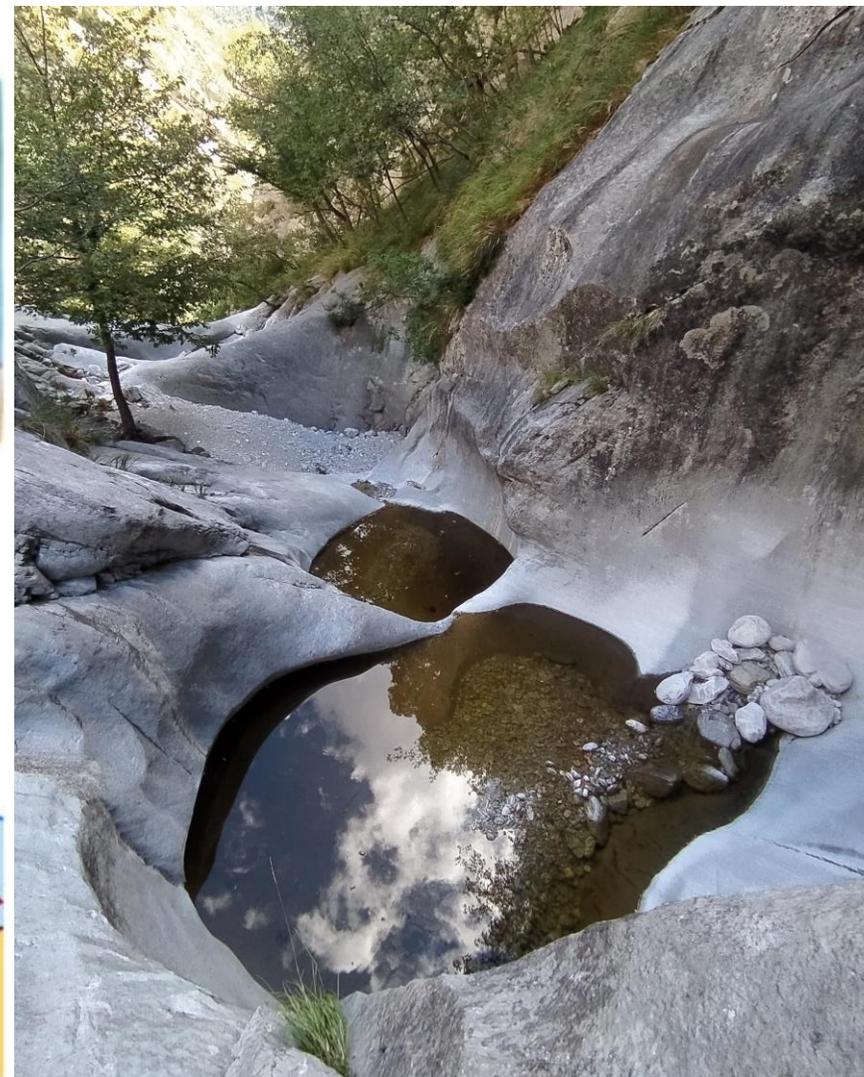
Le marmitte dei giganti sono delle cavità emisferiche o cilindriche prodotte dal moto vorticoso delle acque con l'aiuto dei ciottoli da esse trasportati (evorsione), nei tratti a forte pendenza degli alvei torrentizi. Con il progredire dell'erosione esse tendono a fondersi l'una con l'altra, approfondendosi.



Segni di erosione prodotti dallo sfregamento di ciottoli sulle pareti della marmitta (Alpi Apuane)



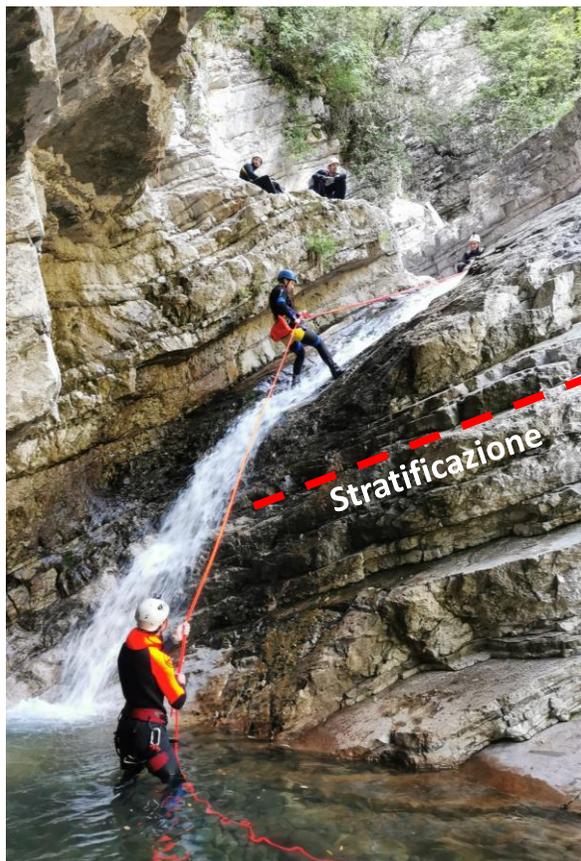
Schema di formazione di una marmitta



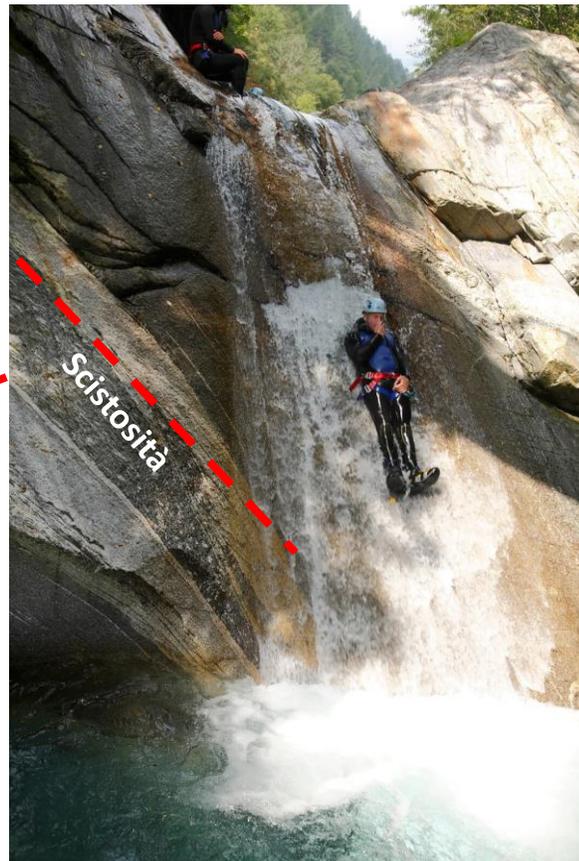
Marmitte dei giganti all'interno del Fosso dell'Anguillaia (Alpi Apuane)

# La forma delle forre

Le forre possono avere forme differenti poiché la loro forma dipende sia da fattori passivi (litologia, assetto strutturale) che condiziona lo scorrimento superficiale delle acque, sia da fattori attivi (scorrimento delle acque, turbolenza, cicli gelo/disgelo ecc). Pertanto potremmo trovare forme composite derivante dalla sovrapposizione di più fattori differenti.



Stratificazione inclinata in calcarsi (da S. Iannelli)



Scistosità inclinata in migmatiti (Val Bodengo; da <https://www.italy-adventure.com>)



Toboga la cui formazione è dovuta sia all'inclinazione della stratificazione sia al moto turbolento delle acque (da Secci 2018)



Inghiottitoio parzialmente eroso (Gole di Gorropu (Sardegna; da Mastinu 2018)

*Grazie per  
l'attenzione!!*

Foto di S. Iannelli

Scuola estiva 2023  
Rilevamento geologico e cartografia CARG



PROGETTO  
**CARG**

