

Processi e forme dei versanti

A cura di S. Furlani

Versanti sulla terra, sulla luna e su Marte



I versanti: un modello globale

- I versanti sono una forma ubiquitaria. Qualsiasi porzione sulla superficie terrestre inclinata rispetto al piano orizzontale è un versante;
- I tassi a cui evolvono le forme di versante sono radicalmente variabili nello spazio e nel tempo
- **Come possiamo organizzare il nostro pensiero riguardo queste forme e ai processi morfogenetici?**
- **Cosa accomuna i versanti?**
- **Come possiamo definire un ordine concettuale sulla dipendenza dal clima ed altri fattori?**

Cos'è un versante?

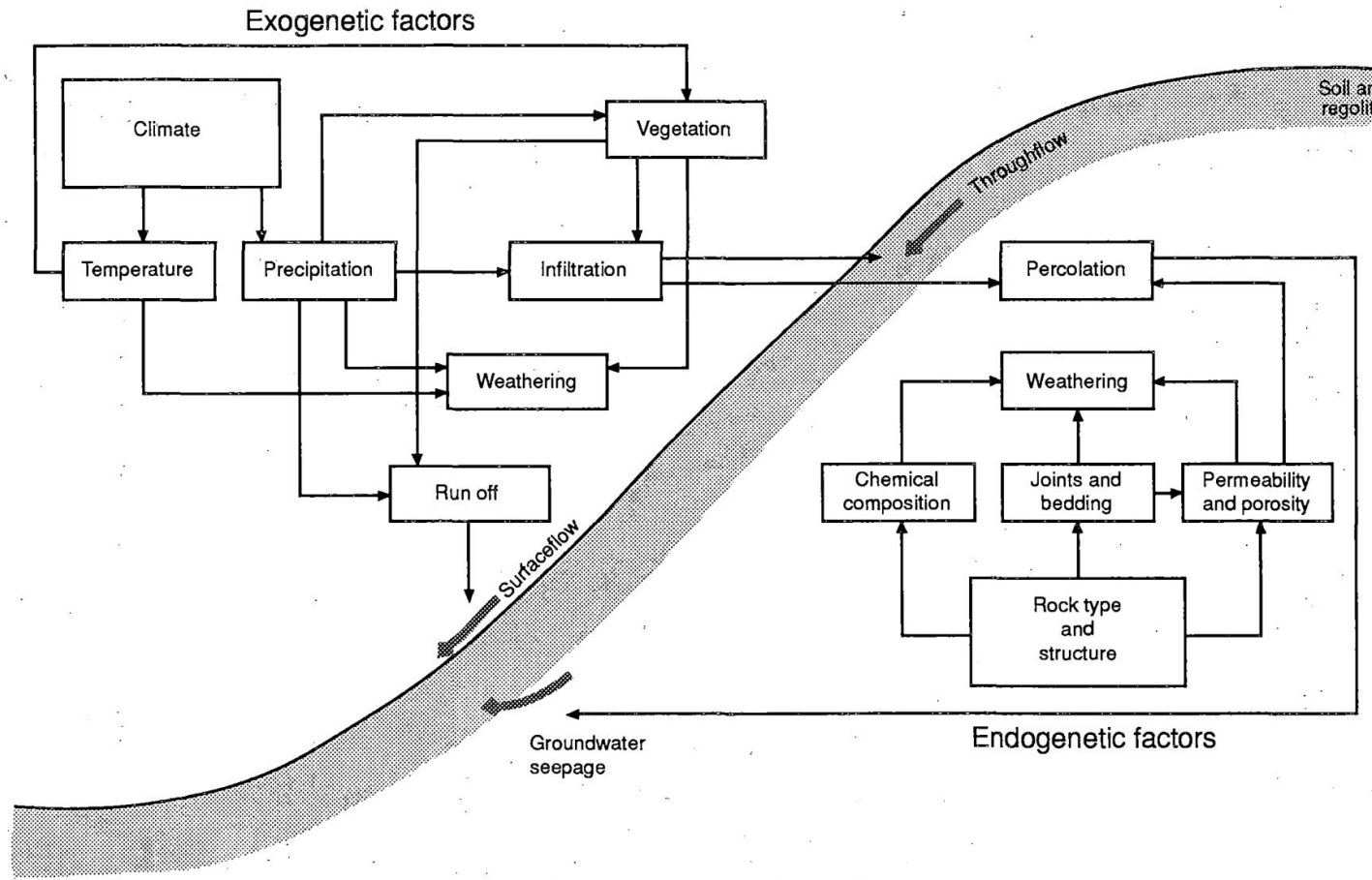
- I versanti sono parte integrante del sistema di drenaggio dei bacini idrografici, convogliando acqua e sedimenti ai corsi d'acqua.
- I versanti raccordano lo spartiacque alla valle.
- I processi di versante variano a seconda delle condizioni litologiche, climatiche, vegetazionali
- **La gravità, l'acqua corrente, pressione dell'acqua interstiziale e le variazioni di temperature sono le forze principali che attivano i processi di versante, assieme all'azione degli animali, delle piante e dell'uomo.**
- Il versante raggiunge più o meno una condizione di equilibrio
- Possono essere costituiti da roccia esposta o essere parzialmente ricoperti da regolite o suolo (soil-mantled hillslopes, rock slopes)

Tipi di versanti

- Versanti di rocce esposte o superfici con copertura di suoli, ecc. Le prime solitamente sono più pendenti, le seconde di meno;
- Processi diverse per i due tipi: degradazione (weathering) per i versanti in roccia; erosione per versanti con copertura (già degradati precedentemente);
- Da un punto di vista generale (nel modello sistemico), il versante non esiste da solo, ma in combinazione con i processi, i corsi d'acqua, ecc.
- Da un punto di vista matematico, i corsi d'acqua rappresentano le condizioni del limite inferiore per i processi di versante



Modello di versante (Clark e Small, 1982)

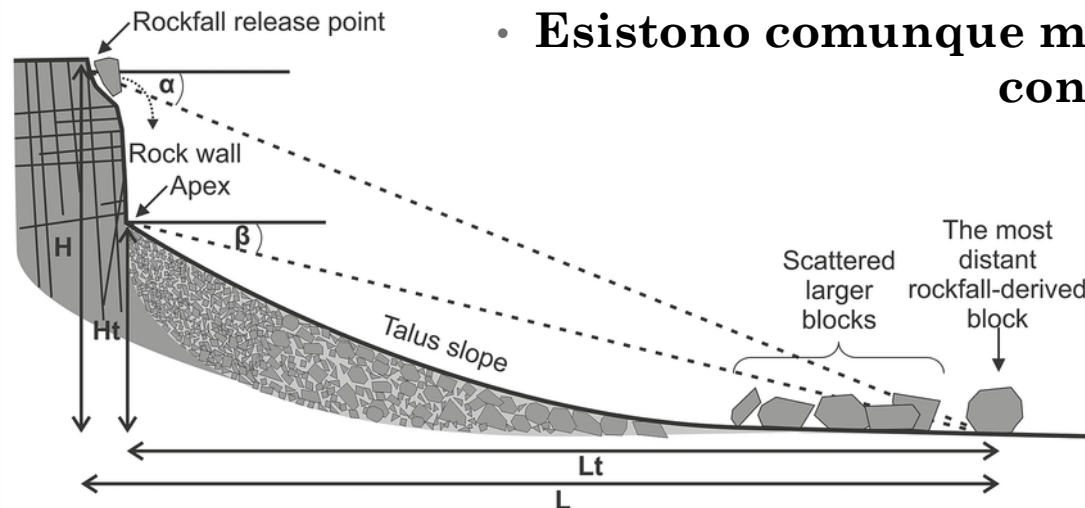


After Clark and Small (1982), p.6.

Hard and soft rocks

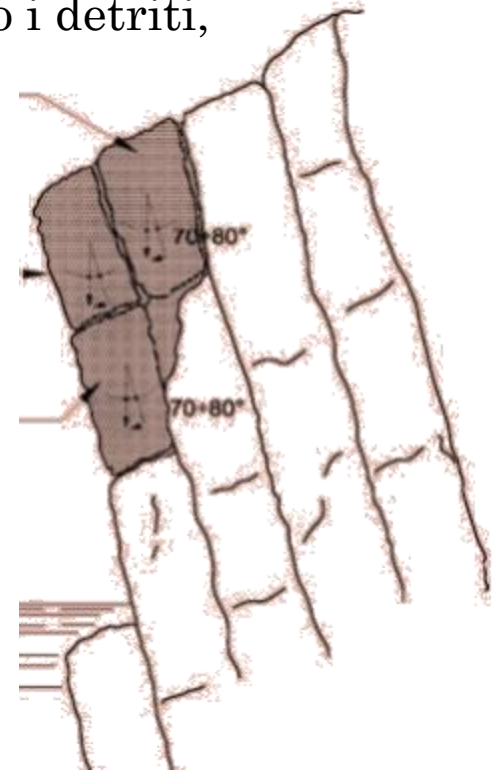
- Le proprietà della roccia e i processi di versante determinano la forma del pendio. Ci sono due casi estremi:
 - Hard rocks con resistenza interna molto elevata;
 - Soft rocks con minore resistenza interna, molto fratturato, che si comportano come i terreni
- Solitamente, le superfici esposte si formano preferibilmente in situazioni del primo tipo, e viceversa

- **Esistono comunque molte eccezioni che confermano la regola**

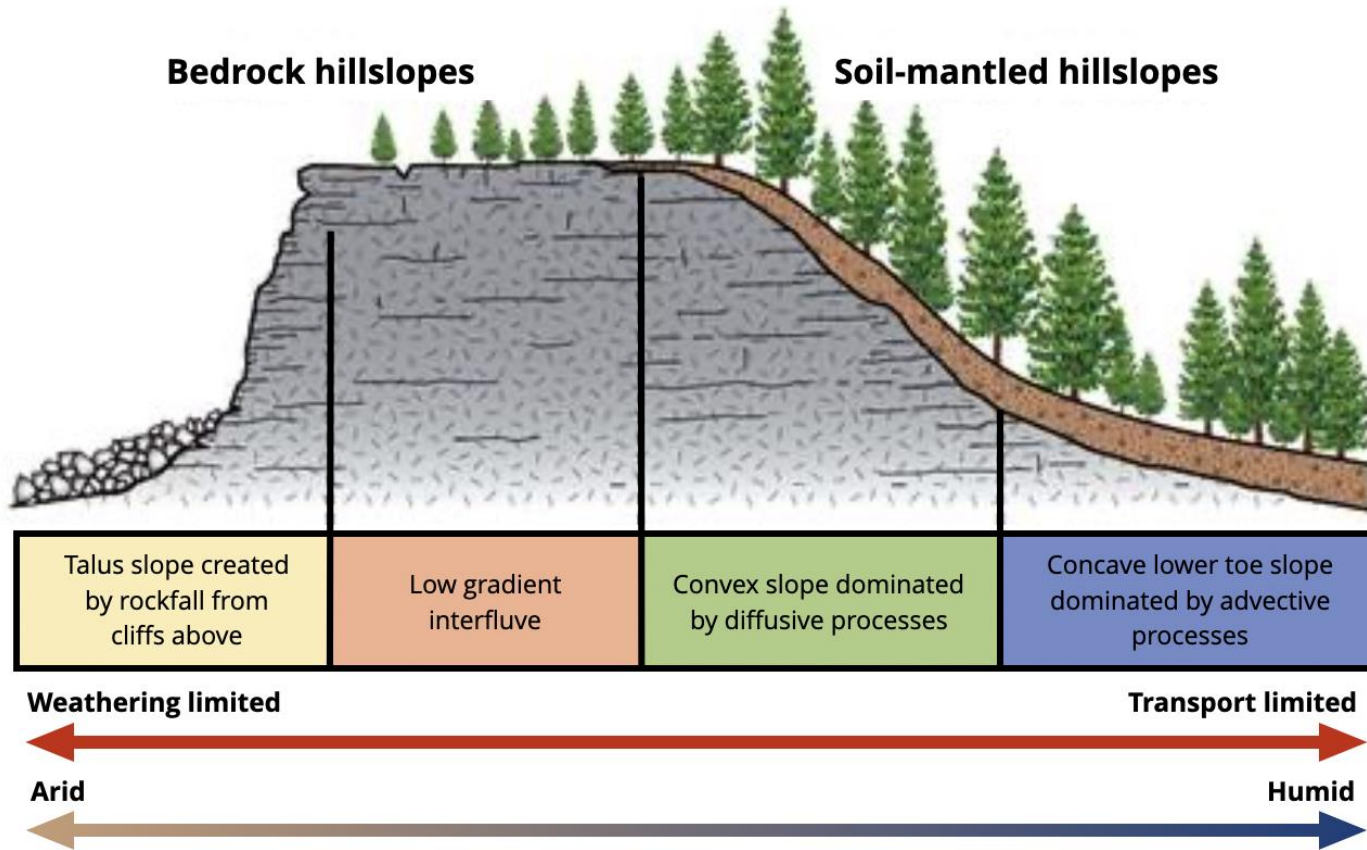


Genesi di un versante in roccia: Tre situazioni

- 1) I versanti in roccia si formano in condizioni di uplift o forte incisione (implica che i versanti si trovano ad una quota troppo elevata perché il detrito si accumuli e seppellisca il versante);
- 2) Con processi attivi alla base che rimuovono i detriti, prevenendo l'accumulo;
- 3) si formano dove il versante è troppo acclive o il clima troppo freddo o secco per produrre degradazione chimica e vegetazione.
- Si formano di solito con pendenze $>45^\circ$, ovvero il limite massimo in cui il detrito permane sul versante



Modello di evoluzione di versante in roccia/roccia-sciolto



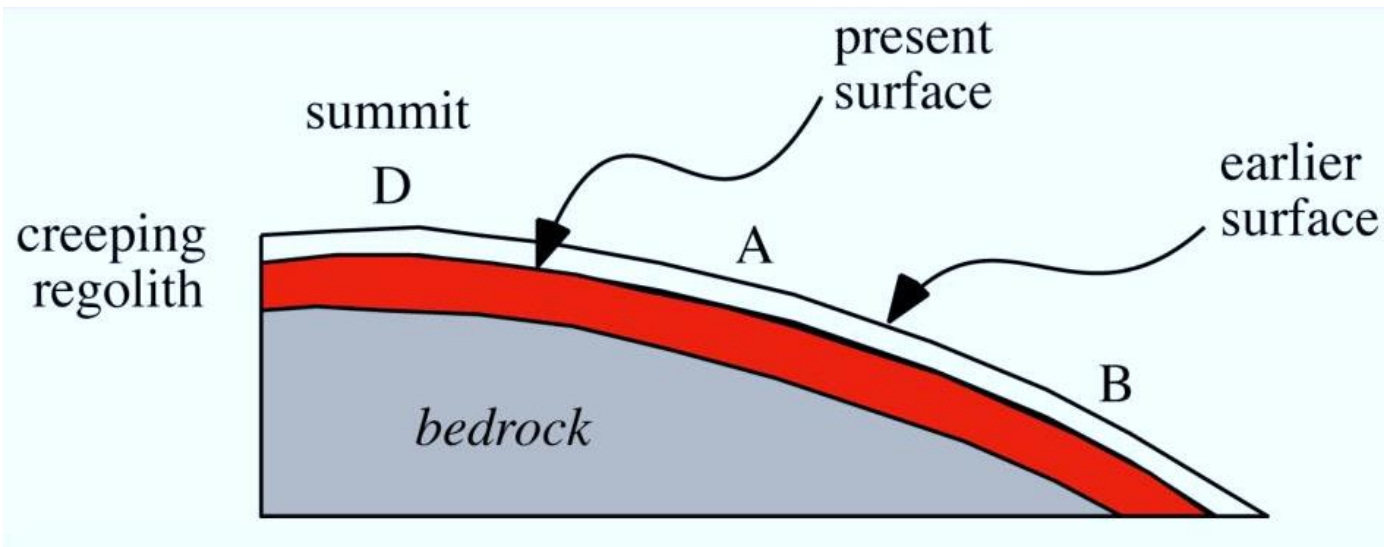
Versanti e gravità

- I versanti forniscono le pendenze che consentono di trasportare il materiale dai pendii stessi verso i fondovalle, direttamente per gravità o per mezzo dell'acqua che scorre in superficie.
- La gravità ha la forza sufficiente per trasferire il materiale verso il basso se la resistenza del materiale per contrastarlo è inferiore alla forza di gravità.
- L'acqua che scorre lungo la superficie del versante esercita un trascinamento sulle particelle del suolo e ha il potenziale di trascinare materiale.
- Quando il gradiente è inferiore ad una soglia critica per mantenere il materiale in trasporto, si ha deposizione.



Convessità dei versanti

- La maggior parte dei versanti sono convessi sulla cima. La pendenza aumenta con la distanza dallo spartiacque
- La forma del versante si considera matura quando non cambia la forma nel tempo, ovvero tutto il versante «migra» verso il basso allo stesso modo



Gilbert (1909) dimostrò che i tassi di creeping dipendono dal gradiente del versante, e aumentano verso il basso, spiegando il perché della cresta (vale per versanti con creeping, senza acqua in movimento)

Forma convessa



Processi gravitativi di versante

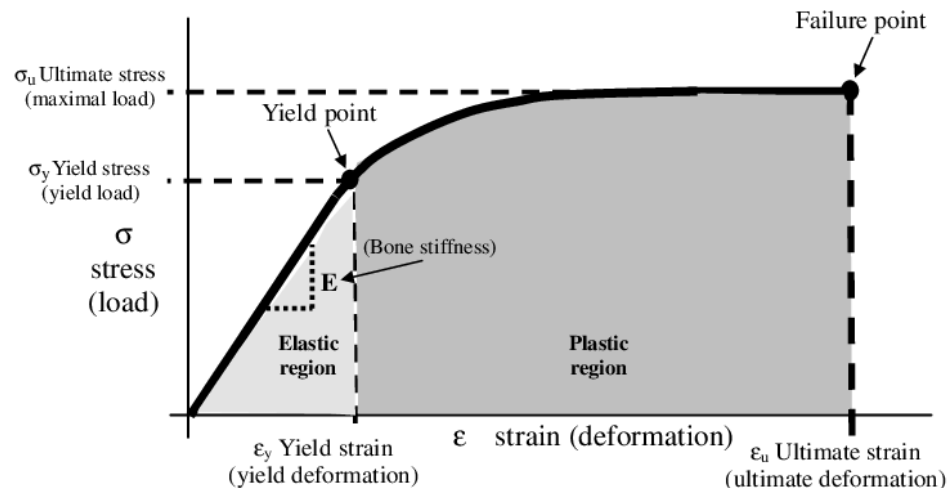
Terminologia

- Quando si parla di movimenti di massa e quando di erosione?
- Processi di versante in cui la gravità da sola è il processo di trasporto dominante si chiama movimento di massa (**mass movement**).
- Processi di versante in cui altri agenti dominano sulla gravità si chiama erosione (**erosion**)
- Processi in cui è interessata anche la tettonica (**DGPV, tectonic gravity**)

- I materiali presenti sulla superficie terrestre sono soggetti a sforzi (*stress*) e tensioni (*strain*);
- SFORZO:
 - Uno sforzo è qualsiasi forza che tende a muovere il materiale lungo il versante verso il basso (es, gravità, ma anche rigonfiamento e restringimento, espansione e contrazione, crescita di cristalli di ghiaccio, azione di animali e vegetali;
 - Lo sforzo dipende dalla massa m del corpo solido e dall'angolo θ ;
 - La relazione è: $\text{Stress} = m \sin \theta$
- La tensione è l'effetto della forza sul corpo solido. Può essere equamente distribuito o concentrato, ad esempio sulle fratture.

- Il materiale con cui è costituito il versante possiede una resistenza intrinseca ai movimenti di versante;
- l'attrito (*friction*) è una forza che agisce contro la gravità e resiste al movimento e dipende dalla scabrezza (*roughness*) del piano di contatto;
- Il movimento può avvenire solamente quando le forze agenti superano “sufficientemente” la forza offerta dall'attrito.

+coesione
 +cementazione
 +radici
 +ecc

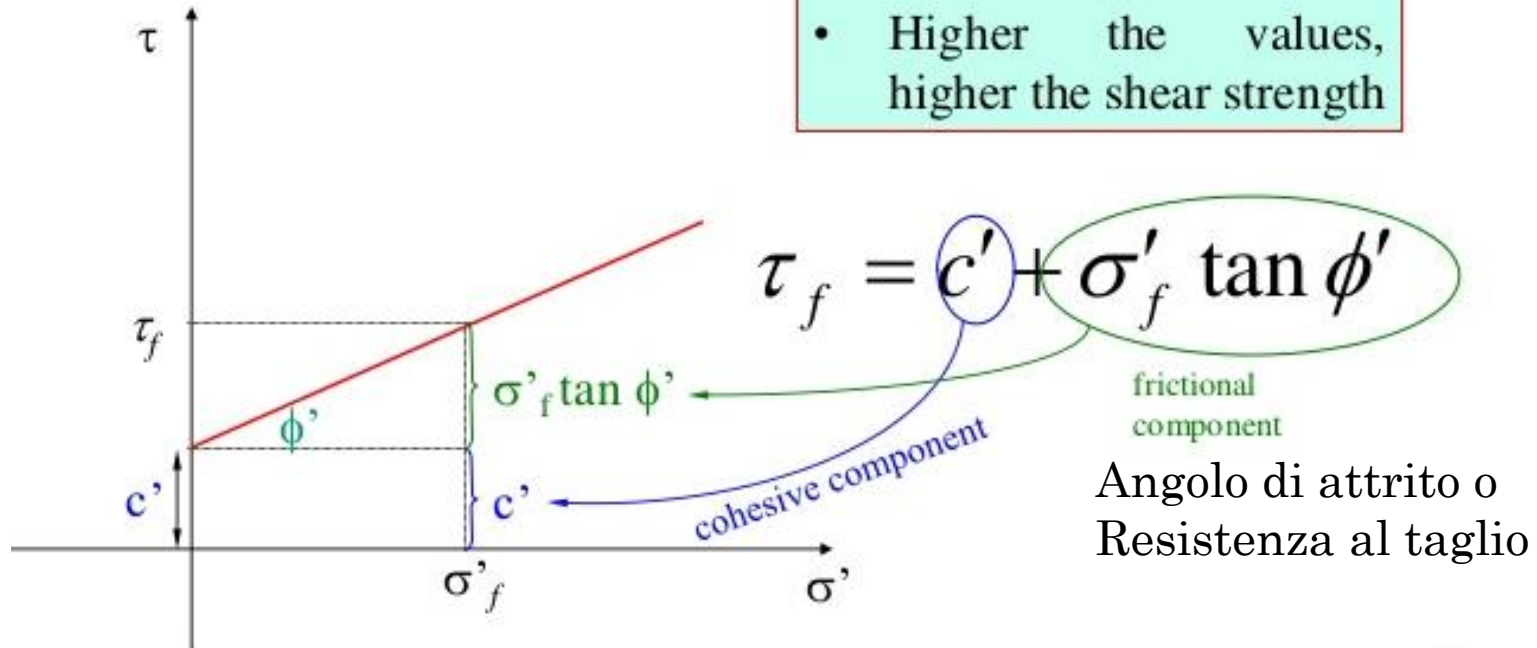


MOHR-COULOMB FAILURE CRITERIA

Shear strength consists of two components:

- **Cohesive** and **Frictional**

- c and ϕ are measures of shear strength.
- Higher the values, higher the shear strength



<https://www.slideshare.net/1mirfan/geotechnical-engineeringii-lec-2-mohrcoulomb-failure-criteria>

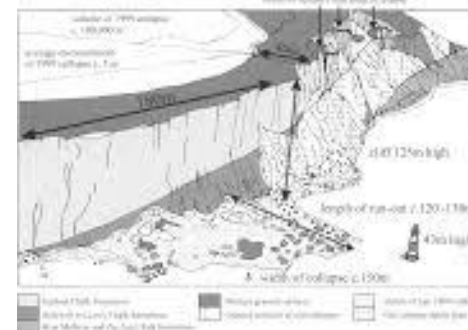
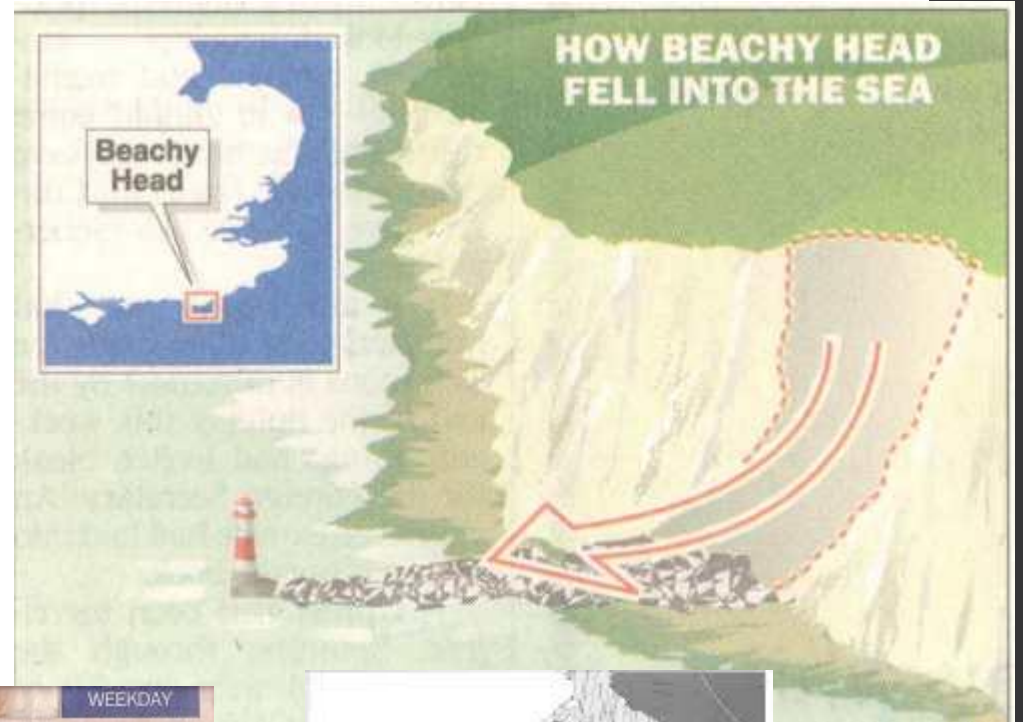
3

- Per materiali non consolidati bisogna considerare anche la pressione interstiziale (acqua nei pori):

$$\tau_f = c' + (\sigma - \bar{\zeta}) \tan \theta$$

Es. dopo grosse piogge

Frana di Beachy Head



Intact rock strenght

- La forza della roccia senza considerare le faglie
- Rock mass strenght può essere valutata misurando la IRS e altri fattori (weathering, spaziatura delle fratture, orientamento delle fratture, dimensione delle fratture, riempimento e continuità delle fratture e presenza di acqua)
- Classificazione (es. Selby, 1980) in:
 - Very strong
 - Strong
 - Moderate
 - Weak
 - Very weak

Parameter	Class I		Class II		Class III		Class IV		Class V
Intact rock	>60		50–60		40–50		35–40		10–35
Score	20		18		14		10		5
Modified class.	>6	58–63	53–58	48–53	43–48	39–43	36–39	33–36	10–33
Modified score	20	19	18	16	14	12	10	8	5
Weathering	None		Mild		Moderate		Strong		Complete

Classificazione dei movimenti di versante

Main mechanism Water content

	Very low	Low	Moderate	High	Very high	Extremely high
Creep		Rock creep Continuous creep				
Flow	Dry flow	Slow earthflow		Solifluction	Rapid earthflow	Mudflow
		Debris avalanche (struzstrom)		Gelifluction	Rainwash	Slush avalanche
		Snow avalanche (slab avalanche)		Debris flow	Sheet wash	Ice flow
		Sluff (small, loose snow avalanche)				Rill wash
						River flow
						Lake currents
Slide (translational)		Debris slide	Debris slide		Rapids (in part)	
		Earth slide	Earth slide		Ice sliding	
		Debris block slide	Debris block slide			
		Earth block slide	Earth block slide			
		Rockslide				
		Rock block slide				
Slide (rotational)		Rock slump	Debris slump			
			Earth slump			
Heave Sollevamento		Soil creep				
		Talus creep				
Fall		Rock fall				Waterfall
		Debris fall (topple)				Ice fall
		Earth fall (topple)				
Subsidence		Cavity collapse				
		Settlement				

Source: From Huggett (1997, 196), partly adapted from Varnes (1978)

Alcuni esempi

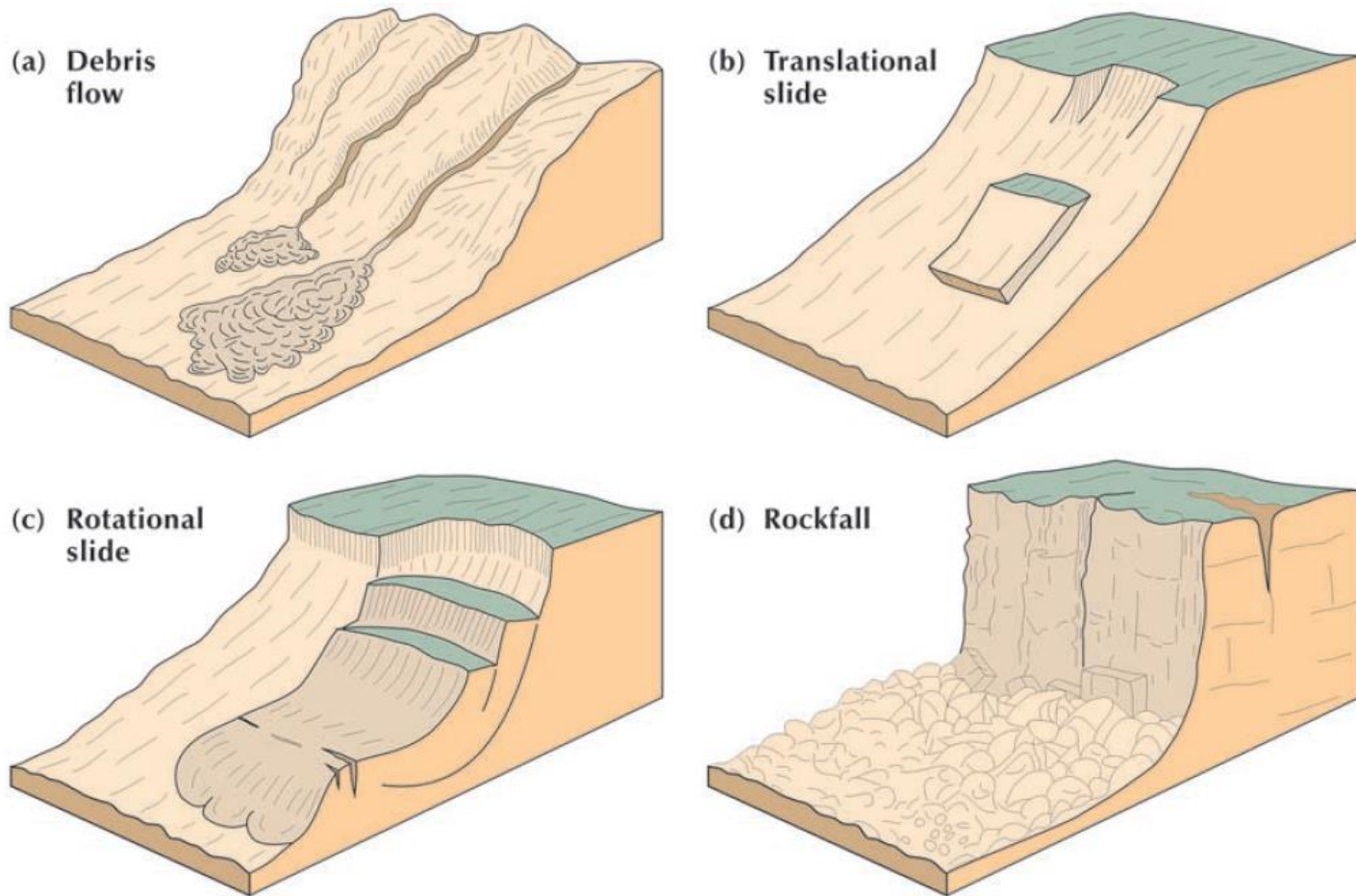


Figure 8.1 Some mass movements. (a) Flow. (b) Translational slide. (c) Rotational slide or slump. (d) Fall.



Lateral spreading

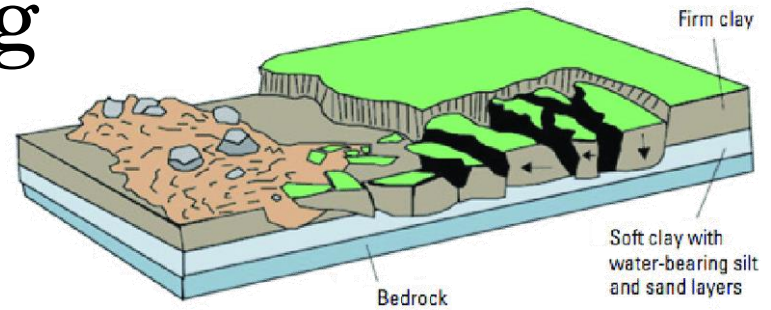


Foto: Devoto S

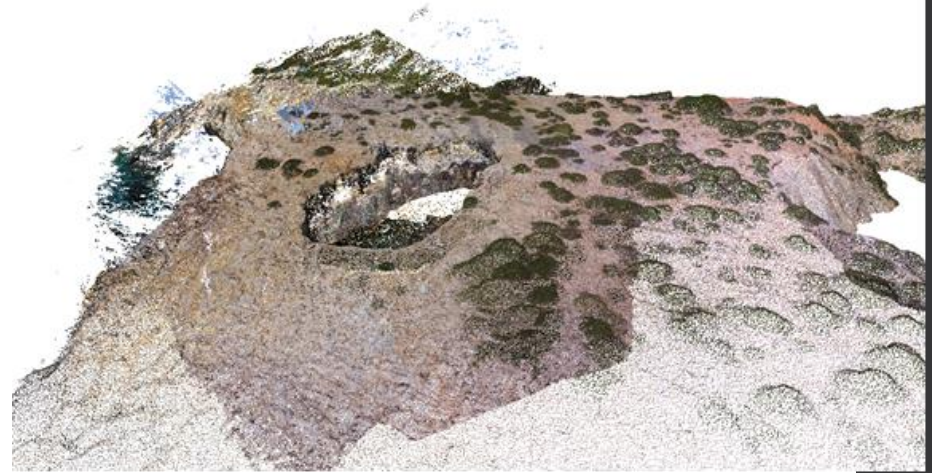


Slump earthflow



Cedimenti

- I cedimenti possono avvenire in due maniere:
 - Collasso di una cavità sottostante, in roccia o suoli (es. in ambienti carsici)
 - assestamento, la superficie del terreno viene progressivamente abbassata per compattazione, spesso a causa del ritiro delle acque sotterranee o delle vibrazioni sismiche.

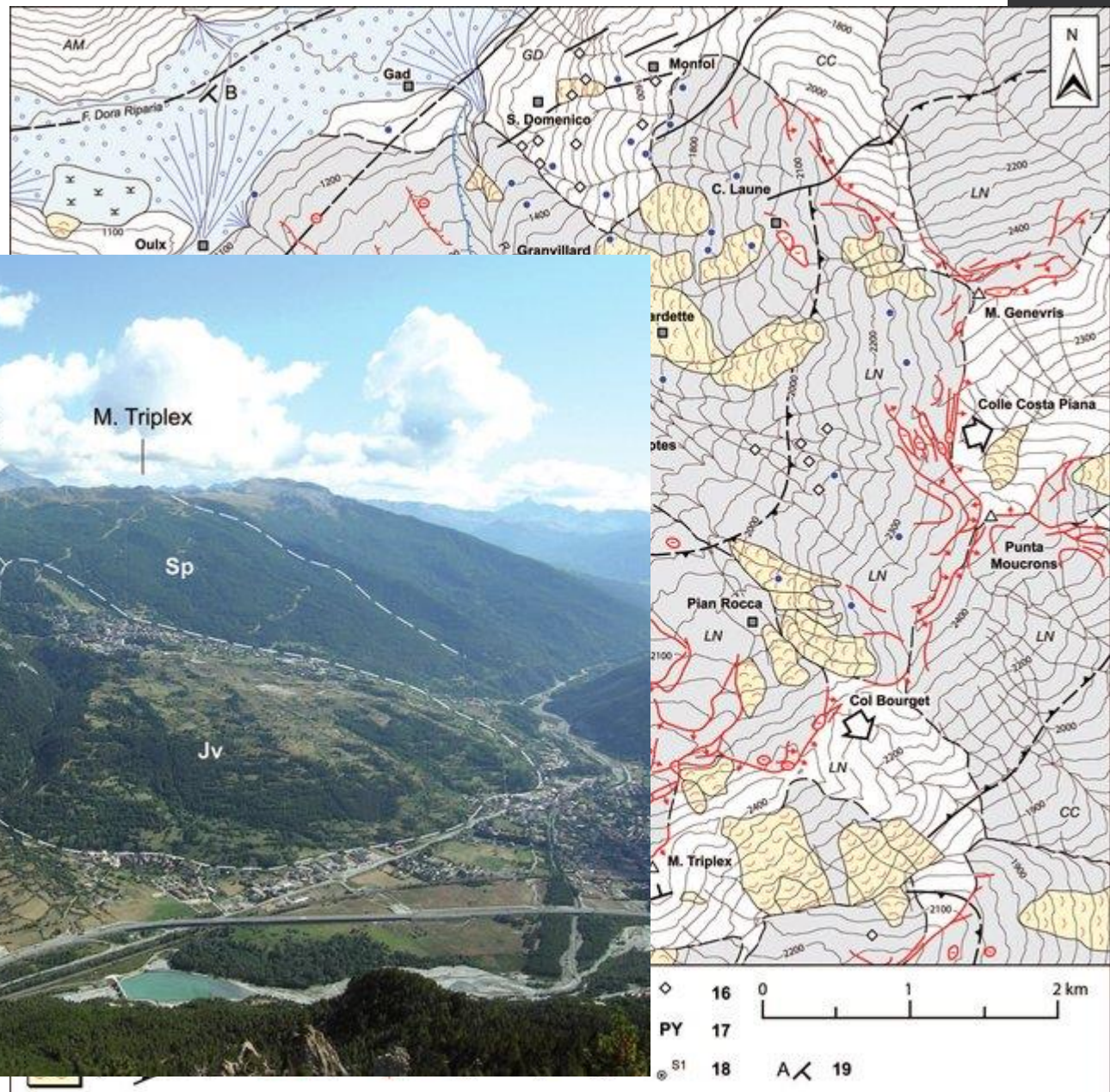


DGPV

Deformazioni Gravitativa Profonda di Versante

- Movimenti di massa possono avvenire anche alla scala geologica.
- I DGPV sono grosse frane in roccia caratterizzate da movimenti molto lenti (mm/anno) che possono interessare ampie porzioni, o tutto, il versante (Agliardi et al. 2001)
- I meccanismi che stanno alla base dei movimenti non sono gli stessi delle frane comuni, ma a metà con i movimenti tettonici
- La maggior parte dei grandi nappes nelle Alpi ed in altre aree orogenetiche sono probabilmente il risultato di scivolamenti gravitativi massivi.





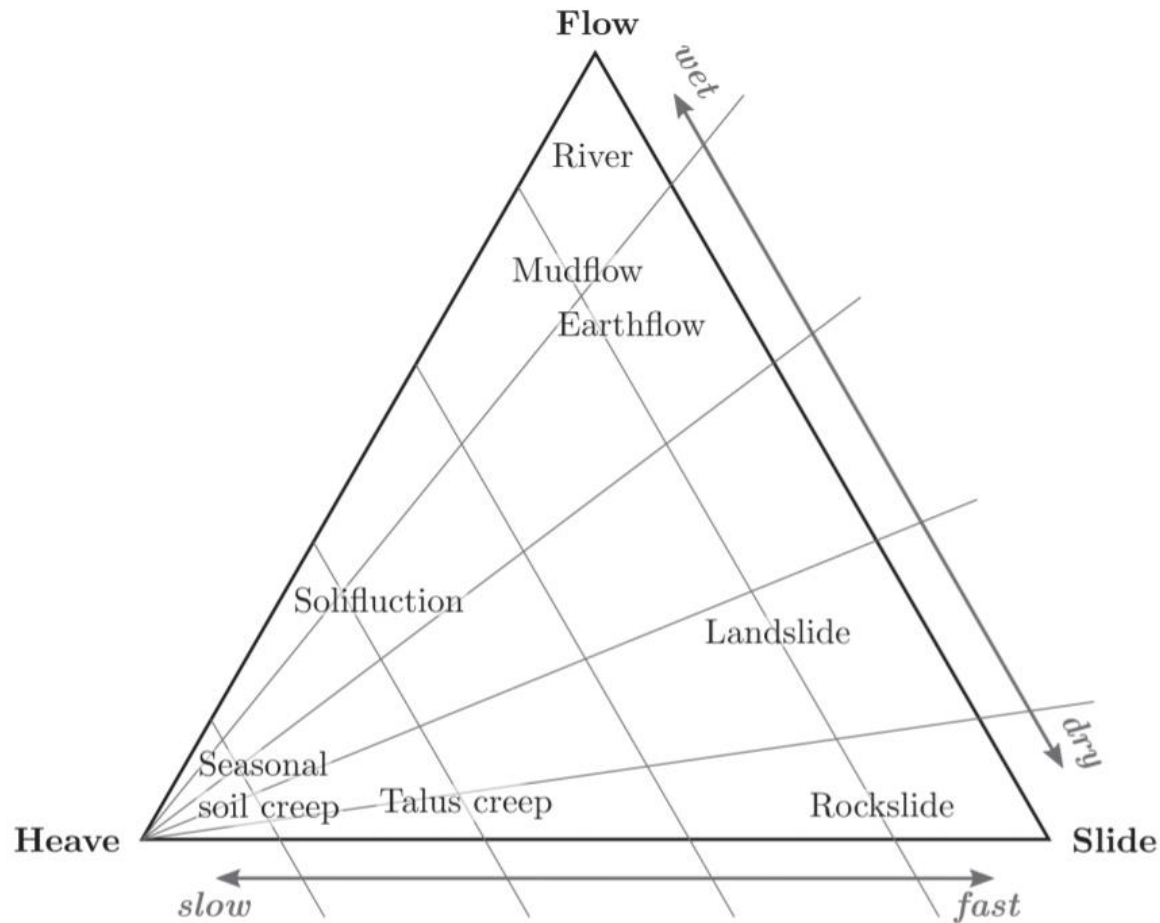
Fioraso et al. 2020. *La deformazione gravitativa profonda di Sauze d'Oulx (Alpi Occidentali): analisi dei meccanismi defromativi in relazione all'evoluzione trado quaternaria dell'alta Valle di Susa, Il Quaternario,*

Velocità delle frane

(Cruden e Varnes, 1996)

CLASSE DI VELOCITA'	DESCRIZIONE	VELOCITA' (mm/sec)	VELOCITA' TIPICA	REAZIONE UMANA
7	Estremamente rapida -----	5×10^3	5 m / sec	Nessuna
6	Molto rapida -----	5×10^1	3 m / min	Nessuna
5	Rapida -----	5×10^{-1}	1.8 m / h	Evacuazione
4	Moderata -----	5×10^{-3}	13 m / mese	Evacuazione
3	Lenta -----	5×10^{-5}	1.6 m / anno	Mantenimento
2	Molto Lenta -----	5×10^{-7}	16 mm/anno	Mantenimento
1	Estremamente Lenta			Nessuna

Classificazione di Carson & Kirkby (1972)



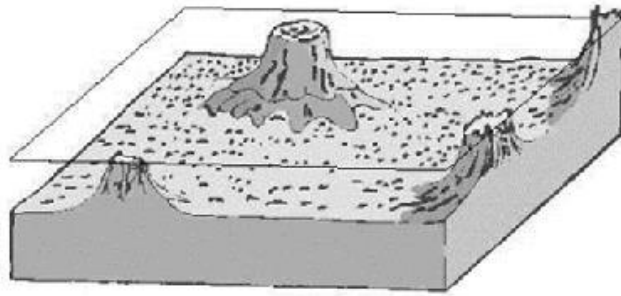
Processi di trasporto

Forme e processi da acque dilavanti

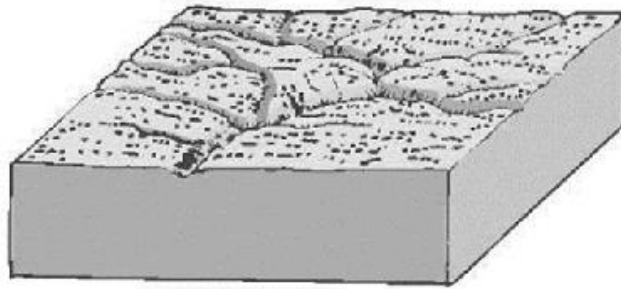
Processi di dilavamento

- Erosione da pioggia battente (*Splash erosion*)
- Erosione areale (*Sheet erosion*)
- Inondazione a coltre (*Sheet erosion*)
- Erosione a rivoli (*Rill erosion*)
- Erosione a solchi (*Gully erosion*)

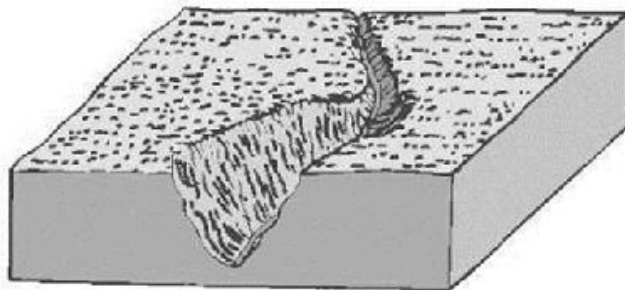




(a) Sheet erosion



(b) Rill erosion



(c) Gully erosion



Rainsplash

- **Rainsplash and sheet wash** (comuni in ambienti aridi);
- Studi sperimentali (Mosley 1973) con l'utilizzo di sabbia e precipitazioni simulate hanno mostrato che:
 - con una pendenza di 5° , il 60% del sedimento mosso dall'impatto di una goccia di pioggia si muove verso il basso e il 40% verso l'alto;
 - con una pendenza di 25° , il 95% dei sedimenti si è spostato verso il basso



Rain power

- La **rain power** è un'entità matematica che unisce le caratteristiche della pioggia, del pendio e della vegetazione e che consente la valutazione in base alla profondità del flusso (Gabet e Dunne 2003).
- È un buon predittore del tasso di distacco delle particelle a grana fine.

$$\frac{mass}{area} = \rho i t \cos \theta,$$

- dove ρ è la densità dell'acqua (1000 kg m^{-3}), i è l'intensità della pioggia (m s^{-1}), t è la durata dell'evento meteorico (s) e θ è l'angolo del pendio.
- Il flusso delle precipitazioni viene corretto dall'angolo del versante per rappresentare la distribuzione delle precipitazioni sulla superficie planare del versante.

Rainflow

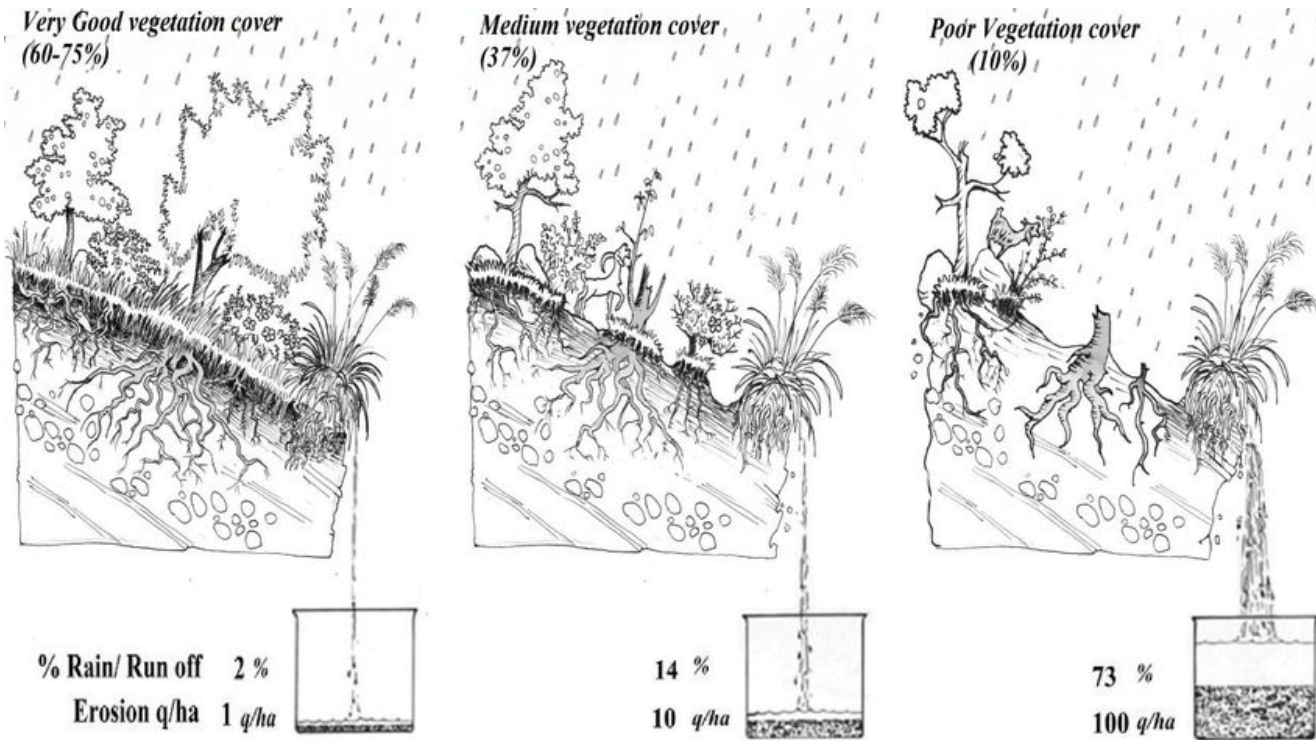
- Il **Rainflow (rillflow)** è il trasporto dovuto alla trazione del flusso di terra combinato con il distaccamento di clasti per impatto dell'acqua, in grado di portare le particelle più lontane. Lo **Sheet wash** porta sedimento in un sottile strato di acqua che scorre sopra la superficie del versante.

- Lo strato di acqua non è uniforme;
- Si suddivide in molti rivoli a seconda della topografia della superficie.



Vegetazione

- La copertura vegetale ha un enorme impatto sull'erosione causata dalla pioggia, dagli schizzi, ecc.
- I terreni con poca o nessuna copertura vegetale sono molto più vulnerabili all'erosione.
- Piante, rifiuti superficiali e residui organici servono a proteggere il suolo dall'impatto e dagli schizzi di gocce di pioggia, a rallentare la portata del deflusso superficiale e a consentire all'acqua di superficie in eccesso di infiltrarsi nel terreno.



Da: Marongiu & Cencetti (2013). Natural Resource Management - Hand book. "Soil Bio-engineering techniques for Slope protection and Stabilization", CESVI Editor: "Improving preparedness and response abilities to natural disasters in Central" Financed by The Humanitarian Aid and Civil Protection Department of the European Commission (ECHO).

Bioturbazione

- Fino a tempi recenti, i geomorfologi tendevano a ignorare gli effetti di animali e piante sui processi erosivi dei versanti, nonostante da tempo si fosse evidente in molti casi l'azione degli animali sul suolo assieme alle radici delle piante (Davis 1898).
- La bioturbazione agisce come:
 - Sradicamento, che può frantumare il substrato roccioso e trasportare il materiale a valle;
 - agitazione del suolo da parte degli organismi, tanto che il creep biogenico è più importante di quello inorganico.
- Caine (1986) ha concluso che le aree bioturbate sui possono avere tassi di movimento dei sedimenti fino a uno o due ordini di grandezza maggiori.

Erosione da animali e piante



Clima e processi di versante

- Misure estensive hanno mostrato che il clima gioca un ruolo fondamentale nei processi di versante (es. Young 1974; Saunders and Young 1983; Young and Saunders 1986).
- L'erosione (mm/anno) del suolo nei climi marittimi temperati è di circa 0,5–2,0 mm/anno nei primi 20/25 cm del regolite;
- nei climi continentali temperati, i tassi sono superiori, circa 2–15 mm/anno, forse a causa del congelamento più intenso del suolo in inverno.
- Nei siti tropicali indicare un tasso di circa 4-5 mm/anno.
- Pochi dati per generalizzare

Forme legate al dilavamento

Piramidi di terra (*Earth pillar*)



Val Renon, Trentino

Cammini delle fate (Cappadocia, Turchia)



Badlands



Gullies, Malta



Zabriski Point (Death Valley, Arizona)

Calanchi, Basilicata (Italia)



Biancane



Transport-limited and supply limited processes

- È comune distinguere tra processi di versante limitati dalla capacità di trasporto dei sedimenti e processi di versante limitati alla fornitura di materiale trasportabile (Kirkby 1971)
 - Nel **transport-limited processes**, la velocità di trasporto del suolo e della roccia limita il rilascio di sedimenti ai corsi d'acqua. L'apporto di sedimenti supera la capacità di rimuoverlo e i processi di trasporto e la loro variazione spaziale determinano la forma del pendio;
 - Nel **supply-limited (or weathering-limited) hillslopes**, il tasso di produzione di sedimenti dovuto agli agenti atmosferici e al distacco erosivo (attraverso il flusso terrestre e il movimento di massa) limita il rilascio di sedimenti ai corsi d'acqua. I processi atmosferici ed erosivi determinano la forma del pendio.

Importante nel lungo termine

Es. Evoluzione di un versante

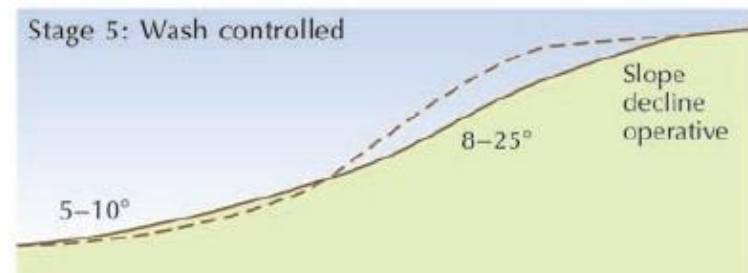
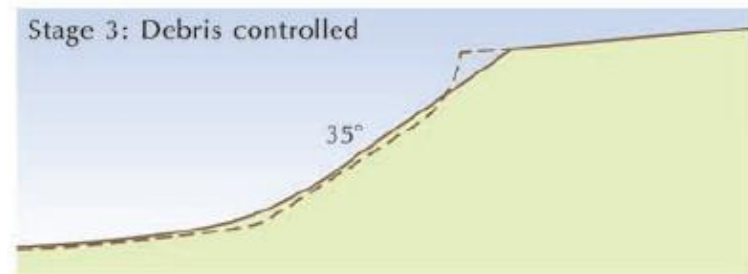
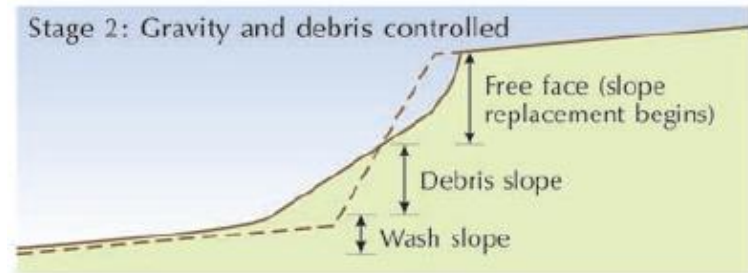
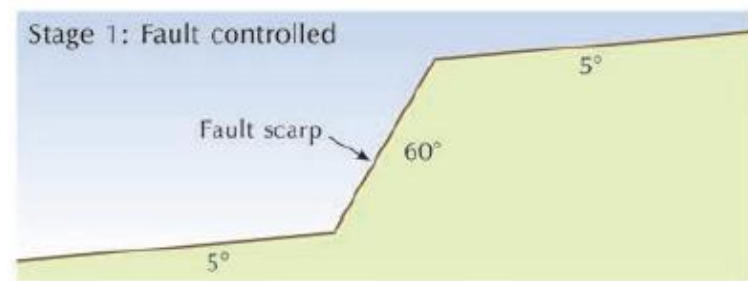
Prima fase: una faglia crea il versante

Seconda fase: processi controllati dalla gravità

Terza fase: detrito

Quarta fase: detrito e rainwash

Quinta fase: Rainwash

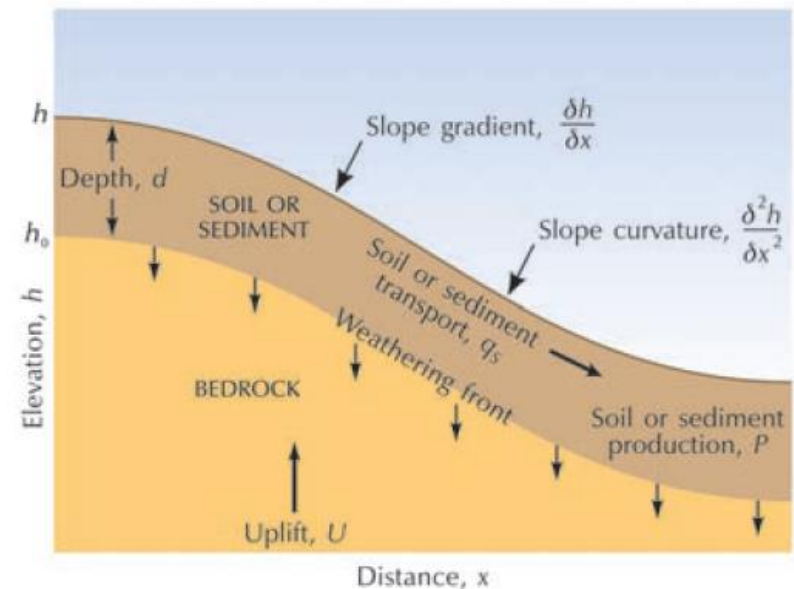


Evoluzione dei versanti

- I processi di versante modellano i pendii in tempi che variano da centinaia a milioni di anni. È quindi impossibile studiare direttamente l'evoluzione dei versanti.
- Per ricostruire la storia delle modificazioni del versante a lungo termine (nei versanti con condizioni al contorno ottimali), sostituisco il tempo con lo spazio;
- La base di tale modelli, che includono i sistemi fluviali e i versanti, è data dall'equazione :

$$\frac{dh}{dt} = U - P - \nabla \cdot q_s$$

- Con:
 - Tasso di variazione dell'altezza (dh/dt)
 - Tasso di uplift (U)
 - Tasso di produzione del suolo (P)
 - Trasporto di sedimento (q_s).



Forme del versante e processi

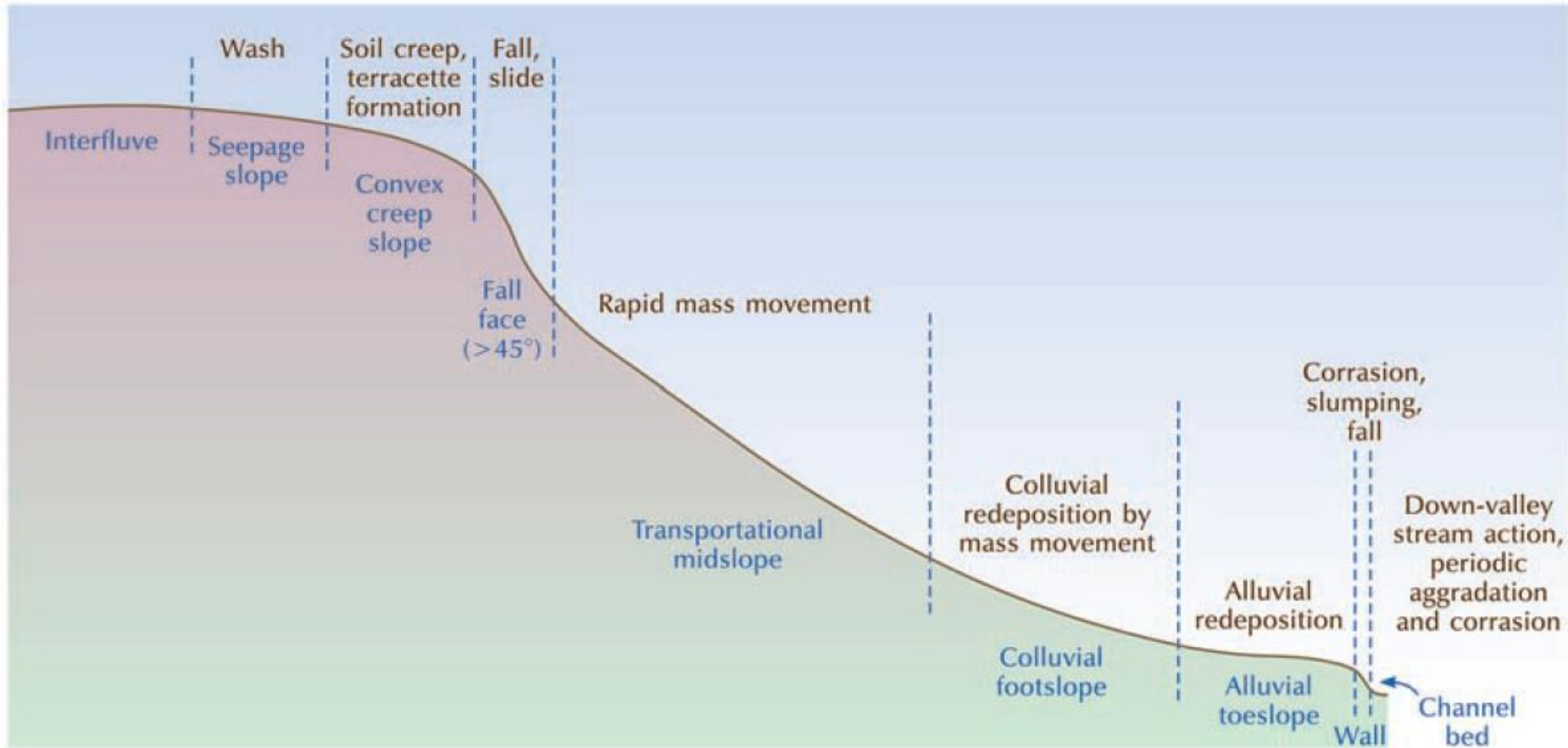


Figure 8.11 Hillslope processes typically associated with units in the nine-unit land-surface model.

Da: Huggett (2011)

Table 8.2 Primary and secondary attributes that can be computed from DEMs

Attribute	Definition	Applications
Primary attributes		
Altitude	Height above mean sea level or local reference point	Climate variables (e.g. pressure, temperature), vegetation and soil patterns, material volumes, cut-and-fill and visibility calculations, potential energy determination
Slope	Rate of change of elevation – gradient	Steepness of topography, overland and subsurface flow, resistance to uphill transport, geomorphology, soil water content
Aspect	Compass direction of steepest downhill slope – azimuth of slope	Solar insolation and irradiance, evapotranspiration
Profile curvature	Rate of change of slope	Flow acceleration, erosion and deposition patterns and rate, soil and land evaluation indices, terrain unit classification
Plan curvature	Rate of change of aspect	Converging and diverging flow, soil water characteristics, terrain unit classification
Secondary attributes		
Wetness Index	$\ln(A_s / \tan b)$ where A_s is specific catchment and b is slope	Index of moisture retention
Irradiance	Amount of solar energy received per unit area	Soil and vegetation studies, evapotranspiration

Source: Adapted from Huggett and Cheesman (2002, 20)

Classificazione delle forme

- La “*toposfera*” contiene uno stupendo insieme di forme.
- Sfortunatamente le forme sono difficili da classificare;
 - erosional landforms (scolpite dall’azione del vento, mare, acqua, ghiaccio, ecc)
 - depositional landforms (costruite dall’accumulo di sedimenti).
- Inoltre:
 - Forme nell’ambiente terrestre,
 - Forme nell’ambiente costiero,
 - Forme nell’ambiente sottomarino

Modellazione dell'erosione dei suoli

- Soil erosion has become a global issue because of its environmental consequences, including pollution and sedimentation;
- Prevention of soil erosion means reducing the rate of soil loss to approximately the rate that would exist under natural conditions;
- **Soil conservation strategies** demand a thorough understanding of the processes of erosion and the ability to provide predictions of soil loss, which is where geomorphologists have a key role to play.
- Factors affecting the rate of soil erosion include rainfall, runoff, wind, soil, slope, land cover, and the presence or absence of conservation strategies.
- The USLE has been widely used, especially in the USA, for predicting sheet and rill erosion in national assessments of soil erosion

Il modello USLE, o RUSLE

- *The USLE (Wischmeier and Smith 1978) predicts soil loss from information about (1) the potential erosivity of rainfall and (2) the erodibility of the soil surface. The equation is usually written as:*

$$E = R \times K \times L_s \times C \times P$$

- V: tasso di perdita di suolo medio stimato
- R: fattore erosività della pioggia
- K: fattore erodibilità del suolo
- L_s : fattore topografico
- C: copertura del suolo (es. copertura della vegetazione)
- P: fattore di influenza del controllo artificiale (pratica antierosiva)