

CAPITOLO 4

GEOMORFOLOGIA

**I processi che modellano il paesaggio di
Nembro.**

A cura di Alba Gentili e Andrea Pezzotta

4.1. INTRODUZIONE

La Geomorfologia è la disciplina che si occupa dello studio e dell'interpretazione delle forme della Terra come risultato dei processi geologici che ne influenzano l'aspetto.

Ci sono due differenti tipi di processi geomorfologici:

- **esogeni**: processi esterni al pianeta Terra che modificano la superficie della litosfera, essi trovano la propria origine nel sistema solare. I fattori principali sono la gravità, l'energia solare.
- **endogeni**: processi nei quali è la Terra stessa a produrre cambiamenti nella litosfera quali deformazioni crostali, attività vulcanica, ecc.

Le forme del paesaggio studiate dalla geomorfologia sono condizionate da diversi fattori:

- **substrato geologico**: forme condizionate dal fattore geologia, ossia litologia e struttura, sul modellamento delle forme
- **clima**: forme condizionate da modellamento glaciale/equatoriale/eolico
- **fattore biotico**: forme condizionate da forme di vita, compreso l'uomo
- **tempo**: forme condizionate da cambiamenti della forma dei continenti/climatici del quaternario/lavoro dell'umanità.

4.2. ALTERAZIONE

Per alterazione (*weathering*) s'intende la disgregazione e modificazione delle rocce in prossimità della superficie topografica. Essa genera prodotti in equilibrio con nuove condizioni fisico-chimiche. Molte rocce si formano in profondità, una volta portate in superficie esse reagiscono al fine di raggiungere un nuovo equilibrio in condizioni di bassa pressione e temperatura e al contatto con l'aria e l'acqua. L'alterazione avviene in ogni parte del mondo indipendentemente dalle condizioni climatiche.

La roccia originale si modifica per processi di alterazione in prodotti di alterazione che vengono denominati Alteriti. Le nuove caratteristiche assunte dalla roccia influenzano l'evoluzione dei versanti e delle morfologie del territorio.

I processi di alterazione comprendono:

- **Alterazione fisica:** rottura della roccia in frammenti di dimensioni minori al seguito di processi meccanici.
- **Alterazione chimica:** modifica del chimismo dei minerali contenuti nella roccia
- **Alterazione biologica:** consiste nella disgregazione fisica e chimica del materiale roccioso a seguito dell'attività di organismi.

4.2.1 Alterazione fisica

L'alterazione fisica consiste nella rottura del materiale roccia senza provocarne variazioni nella composizione chimica o mineralogica

- **Crioclastismo:** alterazione da gelo. Processo di disgregazione fisica dovuto alla pressione esercitata dall'aumento di volume dell'acqua contenuta nella roccia come conseguenza di cicli di gelo e disgelo. L'acqua infatti subisce un'espansione volumetrica di circa il 9% durante il congelamento.

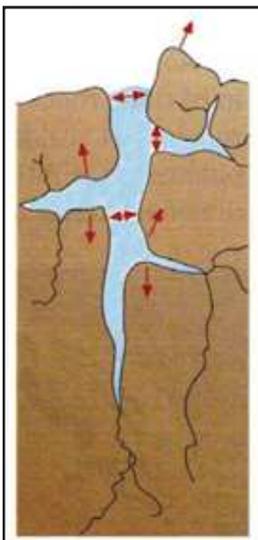


Figura 4.1 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.2 Fotografia di A. Bini.

- **Termoclastismo:** frantumazione causata dalle ripetute contrazioni e dilatazioni che una roccia subisce a causa di ampie escursioni termiche. È l'unico processo in grado di produrre una frattura ex novo nei corpi rocciosi.



Figura 4.3 Valtellina, Poirà: rotture di blocchi di gneiss interpretate come alterazione da incendi. Fotografia di A. Bini.

- **Aloclastismo:** frattura dovuta alla crescita di cristalli di sale nelle fessure preesistenti della roccia. Questi Sali derivano da deposizione di aerosol, corpi d'acqua essiccati, polveri o gas vulcanici, depositi di Sali fossili, acque freatiche, penetrazione sotto superficie di acqua marina, alterazione chimica. I Sali più comuni sono: CaCO_3 (Calcite), NaCl (Alite) e CaSO_4 (gesso e anidrite).



Figura 4.4 Antartide, Boulder Clay: cristalli di sale su granito. Fotografia di Prick.

- **Imbibizione:** idroclastismo ovvero l'assorbimento di molecole d'acqua all'interno di rocce porose senza che avvengano alterazioni chimiche. Cicli di imbibizione e conseguente essiccamento causano la disgregazione della roccia.
- **Fratturazione indotta:** avviene quando una massa di grandi dimensioni rimane a causa dell'erosione, poggiata sopra una più piccola. La roccia sottostante sarà quindi sottoposta ad uno sforzo compressivo e può rompersi per sbriciolamento indotto.

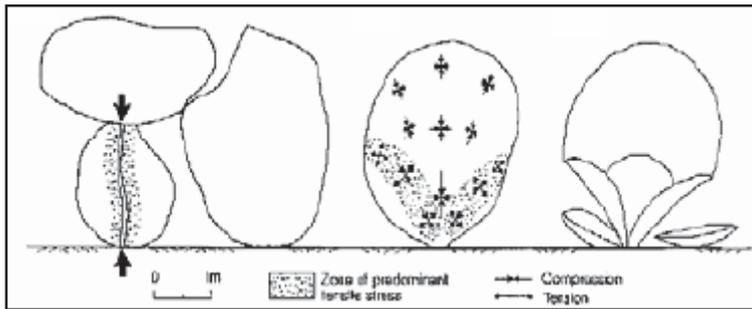


Figura 4.5 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

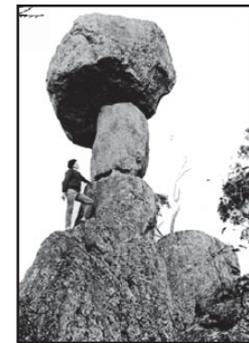


Figura 4.6 Fotografia tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Rilascio tensionale:** sfrutta fratture preesistenti nella roccia che si romperà a causa della forza gravitazionale.

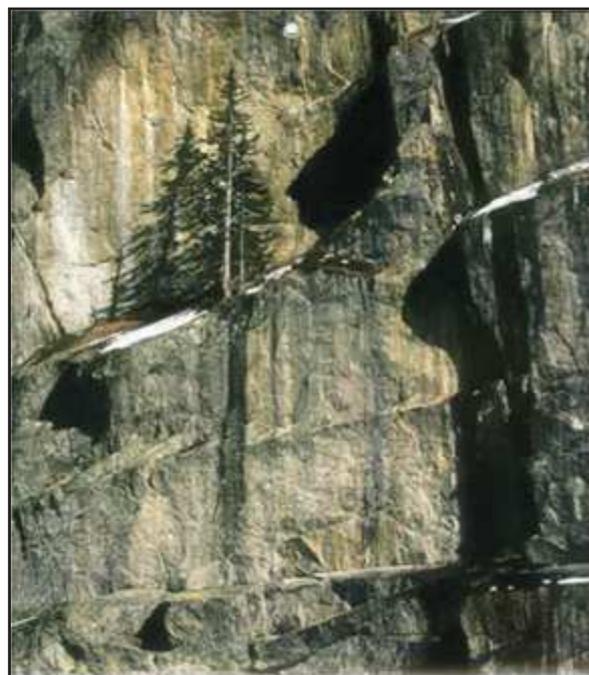


Figura 4.7 Fotografia di A. Bini.

Tradizionalmente vengono attribuiti all'azione dell'alterazione fisica i seguenti fenomeni:

- Produzione di detriti e conseguente creazione di detrito di falda



Figura 4.8 Fotografia di A. Bini.

- Rotture e separazione in blocchi



Figura 4.9 Fotografia di A. Bini.

- Disgregazione granulare: rottura della roccia in cristalli singoli.



Figura 4.10 Mottarone. Fotografia di A. Bini.

- Desquamazione o esfoliazione: formazione di scaglie.



Figura 4.11 Antartide: desquamazione su granito. Fotografia di A. Bini.

Le forme principali che ne conseguono sono:

- **Archi e ponti:** causati da erosione del vento associata a desquamazione. Una volta formati i *Fin* per tettonica distensiva, l'alterazione li approfondisce e separa.



Figura 4.12 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

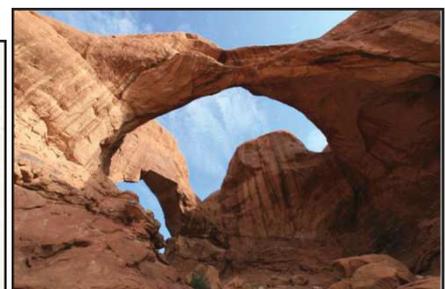


Figura 4.13 Fotografia tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Pinnacoli dovuti a protezione:** si sviluppano in rocce stratificate a giacitura orizzontale con alternanza di rocce competenti (resistenti ad erosione) e rocce incompetenti (facilmente erodibili). I pinnacoli si formano quando un lembo di roccia competente (*Caprock*) protegge la roccia sottostante.



Figura 4.13 Fotografia di A. Bini.

- **Pinnacoli dovute ad alterazione:** si formano quando sono presenti suoli a chimismo acido in concomitanza con la presenza di starti rocciosi di tipo calcareo dolomitico o arenario. L'erosione prodotta dall'acidità del suolo scava lo strato sottostante, una volta che il suolo viene rimosso, emergono i pinnacoli.

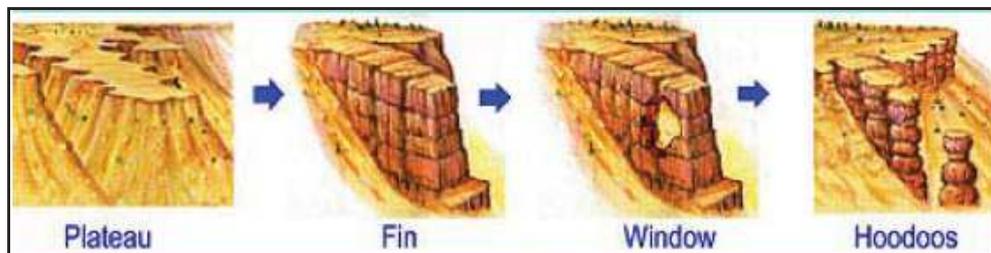


Figura 4.14 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

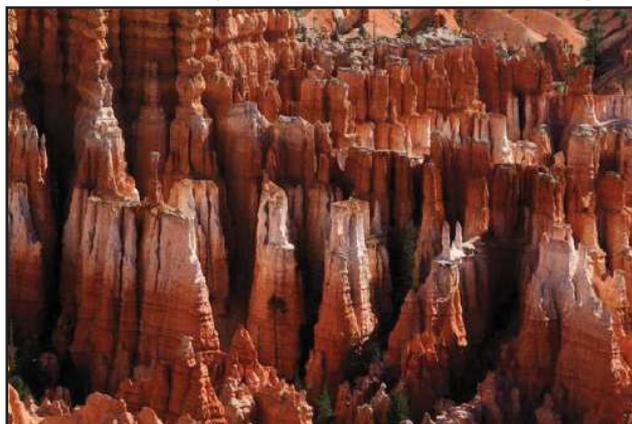


Figura 4.15 Fotografia tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Pinnacoli dovuti a rilascio o DGPV:** si formano per rilascio tensionale e distensione dell'ammasso roccioso. I pinnacoli evolvono successivamente per crollo.



Figura 4.16 Dolomiti: le Cinque Torri prima del crollo della Torre Trepbor (2004) e dei crolli che hanno interessato la Torre Inglese (2008). Fotografia di A. Bini.

4.2.2 Alterazione chimica

Consiste nella trasformazione della composizione chimica o mineralogica delle rocce. Essendosi generate in profondità, una volta portate in superficie esse reagiscono per riportarsi in condizioni di equilibrio in quanto riscontreranno una diminuzione nella temperatura, della pressione e un aumento della quantità di acqua e ossigeno liberi.

Le più comuni reazioni responsabili dell'alterazione chimica sono:

- **Soluzione:** alcune rocce quali salgemma, calcare, dolomite, gesso etc sono facilmente solubili in acqua o in acqua leggermente acida. Tale processo verrà approfondito nel capitolo relativo al Carsimo.
- **Idratazione:** aggiunta di acqua ad un minerale che può renderne la struttura più porosa rendendola più soggetta ad alterazioni successive. Essendo una reazione esotermica (rilascia energia all'esterno) risulta essere reversibile: disidratazione.
- **Idrolisi:** reazione chimica tra silicati e acqua. Essa avviene sempre quando un qualunque minerale entra in contatto con l'acqua. Più il PH dell'acqua risulta acido più sarà veloce la reazione.
- **Lisciviazione:** dissoluzione, ad opera di un solvente, di materiali solubili contenuti all'interno di una roccia che presenta anche materiali insolubili.

- **Ossidazione e riduzione:** reazione dei materiali con l'ossigeno atmosferico.

I fenomeni attribuiti alla predominanza dell'alterazione chimica sono:

- **Vernice:** consiste in una sottile patina dura che ricopre la roccia.



Figura 4.17 Fotografie di A.Bini.

- **Vetro del deserto:** Rivestimenti lucidi ed incolori ricchi di silice, di aspetto quasi ceramico.
- **Case-hardening:** consiste in un orizzonte superficiale calcareo di colore più chiaro e più resistente della roccia sottostante dalla quale è separato mediante un limite netto.



Figura 4.18 Casnigo: case-hardening in Conglomerato superiore. Fotografia A. Bini.

4.2.3 Alterazione biologica

L'alterazione biologica consiste nella disgregazione fisica e chimica della roccia a seguito dell'attività di organismi appartenenti a tutti i regni.

Le piante sono agenti di alterazione sia fisica che chimica, mentre gli animali miscelano i materiali del suolo. La respirazione della fauna del suolo aumenta il contenuto di CO_2 che provoca alterazione chimica dovuta all'aumento dell'acidità.

La superficie delle rocce alterate è popolata da milioni di batteri per grammo di roccia. Essi sono presenti ovunque. Dal punto di vista dell'alterazione vengono distinti tra organismi Endolitici (crescono sotto la superficie rocciosa) ed Epilitici (presenti sulla superficie della roccia). I processi coinvolti sono essenzialmente di natura chimica: dissoluzione in acqua di CO₂, formazione di composti lichenici solubili in acqua e liberazione di acidi efficaci nell'aggreddire i feldspati.



Figura 4.19 Antartide, TarnFlat: desquamazione su blocco arrotondato di granito per alterazione biologica. Fotografia di A. Bini.



Figura 4.20 Fanes piccola, Banc dei Torc: alterazione biologica. Fotografia di A.Bini.

4.3. DINAMICA DI VERSANTE

Un versante è una qualsiasi superficie che delimita un rilievo.

La dinamica di versante comprende tutti i fenomeni che avvengono su di un versante. È conseguenza del fatto che ogni sistema fisico al quale è stata fornita energia, tende a portarsi ad un livello di energia inferiore: una montagna infatti, viene generata per tettonica e acquisisce un'energia potenziale trovandosi ad un livello energetico elevato; per effetto della gravità ogni volume tende a portarsi da una posizione ad energia più elevata ad una energia più bassa.

La dimensione degli ammassi rocciosi in superficie, l'alterazione e l'acqua sono i principali agenti in grado di innescare o amplificare i movimenti.

Un criterio classificativo utile si basa su:

- Dimensioni del movimento
- Tipo di movimento
- Tipo di materiale coinvolto

E tiene conto per ogni tipo di fenomeno di:

- Contesto morfologico in cui si sviluppa il movimento
- Velocità a cui si sviluppa
- Cause del fenomeno di distacco e movimento
- Morfologia della zona di distacco all'interno del versante
- Morfologia della zona di accumulo ai piedi del versante
- Interazione con l'ambiente antropico
- Possibili azioni di contenimento messi in atto dall'uomo.

4.3.1 Fenomeni o processi superficiali

Per processi superficiali si intende il movimento dei singoli elementi detritici (frammento roccioso di varia natura) di una roccia o di un terreno dovuto alla sola forza di gravità. I principali fenomeni sono:

- **Creep:** lento movimento di una coltre di detrito/ suolo su un versante non troppo ripido. Per azione della gravità e della presenza di acqua il detrito/ suolo si muove particella a particella verso il basso come una specie di coperta che ricopre il substrato lapideo.

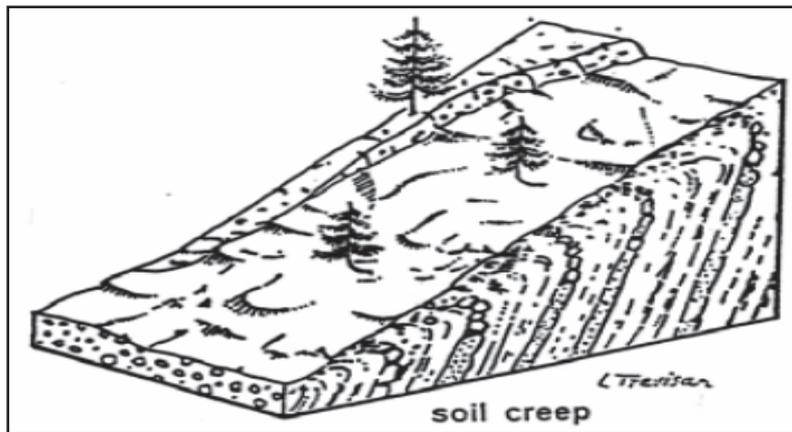


Figura 4.21 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Soliflusso:** avviene su superfici bagnate da precipitazioni e grazie alla gravità. Il detrito superficiale ghiaccia e aumenta di volume, tuttavia questa espansione non può avvenire in tutte le direzioni e quindi si esercita solo verso l'alto portando con sé la particella; quando si disgela l'umidità perde di volume e allora la particella ricade ma più in basso del suo punto di partenza: il suolo/detrito tende quindi a scivolare verso il basso.

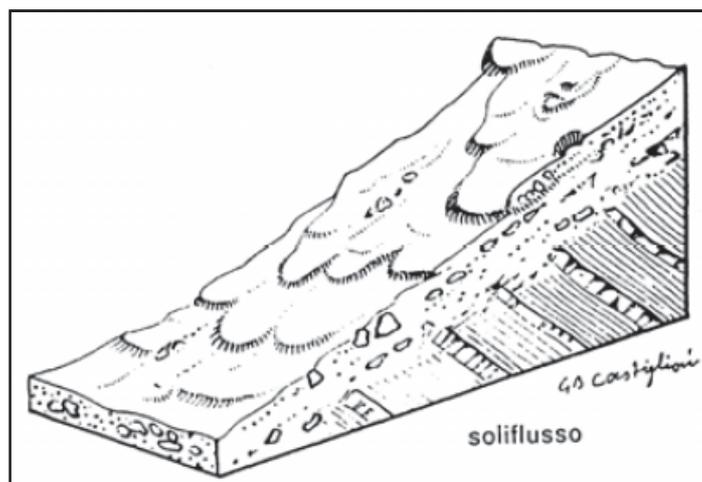


Figura 4.22 tratta da "Geomorfologia" di G. Castiglioni

- **Creep da gelo:** avviene in suoli costituiti da elementi fini con elevato contenuto in acqua. Il congelamento provoca il sollevamento del suolo che causa la formazione di aghi di ghiaccio estrusi dalla superficie del suolo detti *Pipkrake*.

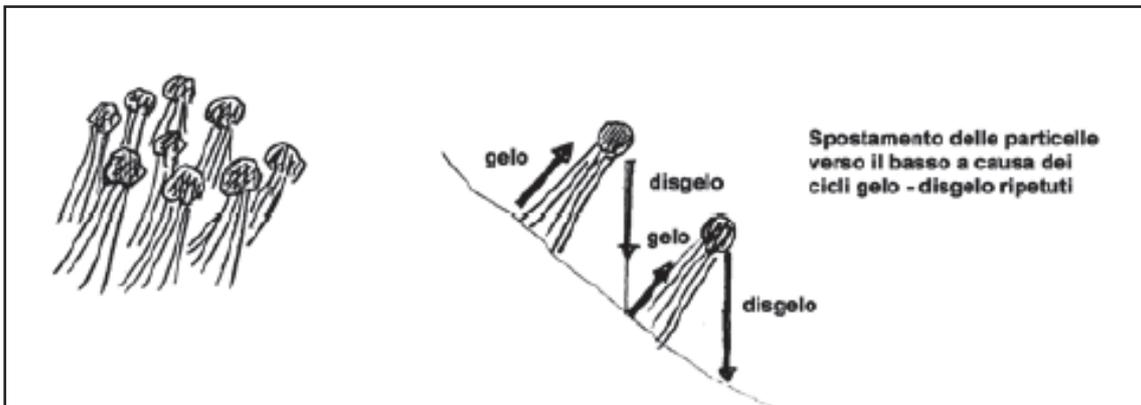


Figura 4.23 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Creep in roccia:** creep superficiale in un affioramento di roccia che genera una curvatura verso il basso degli strati stessi.



Figura 4.24 fotografia tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Taluscreep:** lento movimento lungo un versante costituito da detriti grossolani. Può essere causato da escursioni termiche giornaliere, scivolamento su superfici umide, impatto di rocce, perdita di materiale per alterazione meteorica e formazione di sottili veli di ghiaccio alla base dei clasti.

Le evidenze di tali fenomeni sono:

- **Terrazette:** formate come concausa dell'effetto del creep/soliflusso ma il detrito/suolo anziché scendere senza attriti forma delle "grinzosità" che possono essere dovute a differenti fattori quali: substrato, diversa pendenza, diverse tipologie di detriti, presenza di pascolo.
- **Stone line:** allineamento di ciottoli.
- **Sciabolatura:** curvatura a sciabola verso valle degli alberi.
- **Basculamento:** oscillazione e movimento di struttura.
- Accumulo a monte di strutture di contenimento.

4.3.2 Fenomeni a scala intermedia: Frane

Le frane sono fenomeni di caduta e movimenti di masse rocciose o di materiali sciolti come effetto prevalente della gravità. Avvengono istantaneamente e non si limitano a muovere solo la massa di roccia, ma la gravità imprime una forte velocità che genera il vento determinando il sollevamento del pulviscolo.

Una frana è suddivisa in più parti riconoscibili fra loro: la nicchia di distacco, il corpo di frana e l'unghia.

Le cause delle frane possono essere geomorfologiche, paleo climatiche o antropiche. Le frane attuali sono per la maggior parte dovute a una cattiva gestione del territorio, il disboscamento infatti è la principale causa dell'instabilità di molti versanti in quanto è risaputo che una copertura arborea e boschiva protegge e stabilizza i versanti.

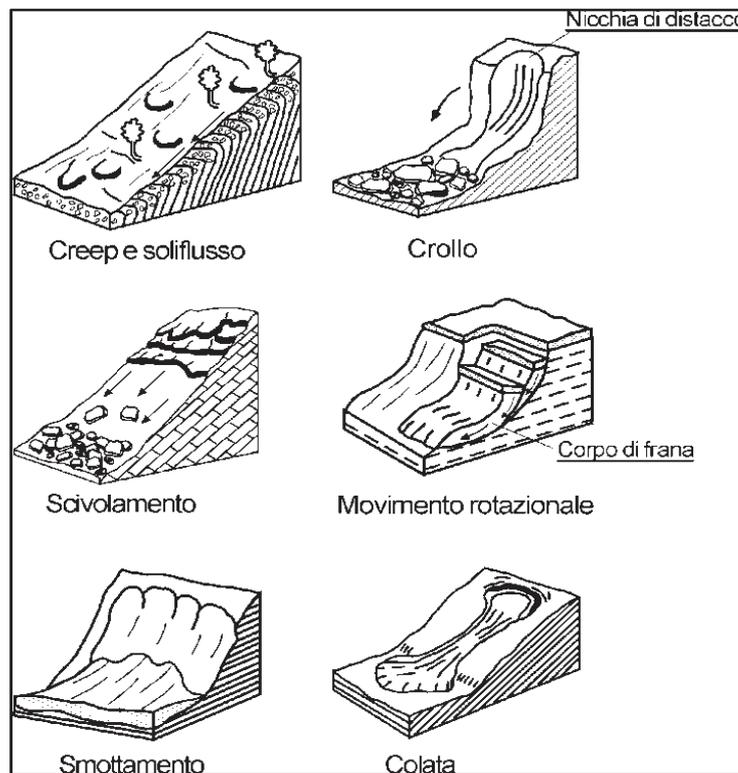
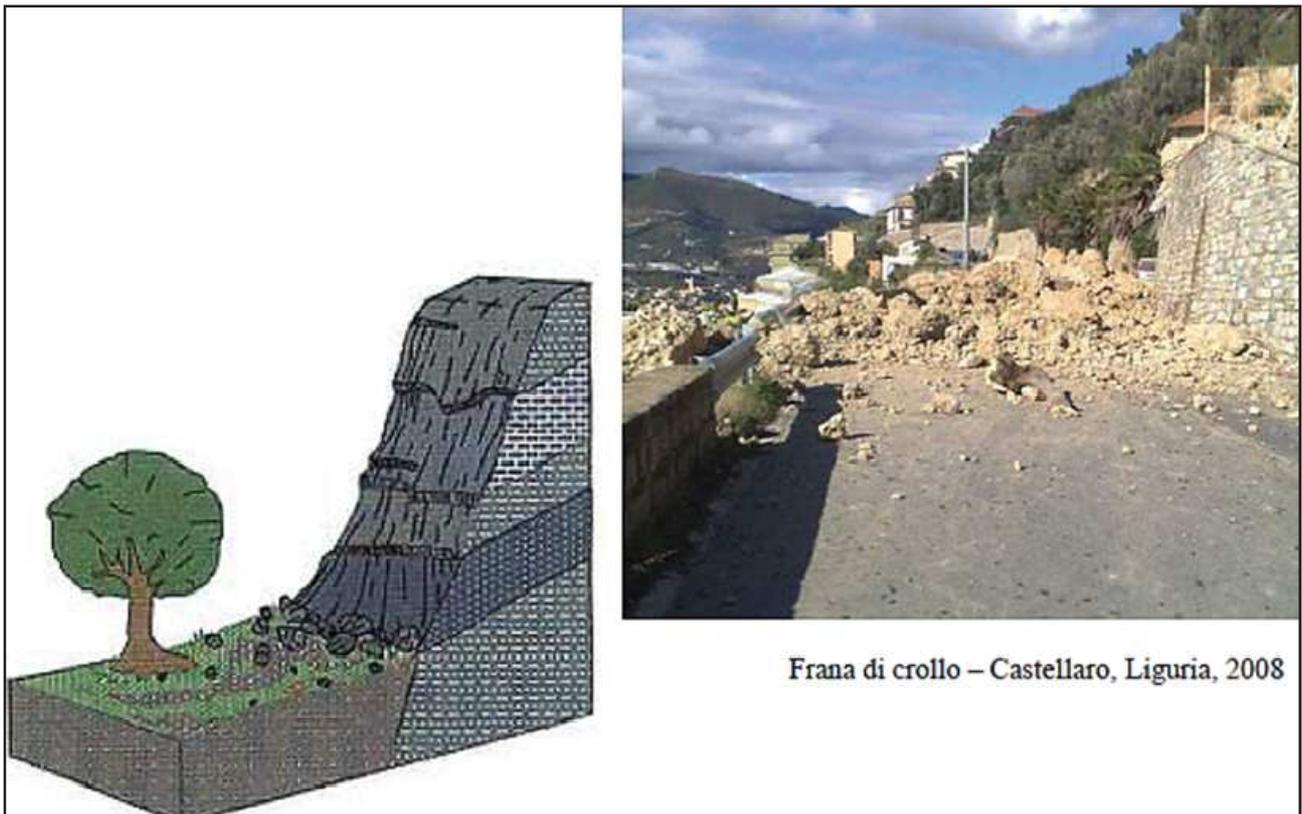


Figura 4.25 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

Le principali tipologie di frane sono:

- **Crollo:** movimento rapido di roccia e suolo staccatasi da un versante molto ripido o verticale, che si svolge prevalentemente in aria, poi impatta al suolo, si frammenta e rotola. È provocato dalla presenza, in pareti sub verticali, di fratture e viene innescata dalla circolazione idrica e da cicli di gelo e disgelo.



Frana di crollo – Castellaro, Liguria, 2008

Figura 4.26 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Ribaltamento:** movimento di rotazione della roccia verso il basso e l'esterno del versante attorno al proprio baricentro. Si sviluppano su versanti ripidi e il trasporto avviene attraverso l'aria. Dopo l'innescò, il corpo di frana è uguale a quello di una frana di crollo. Avviene a causa di vari fattori, quali la forza di gravità, l'erosione e la tettonica e si sviluppa su famiglie di discontinuità.

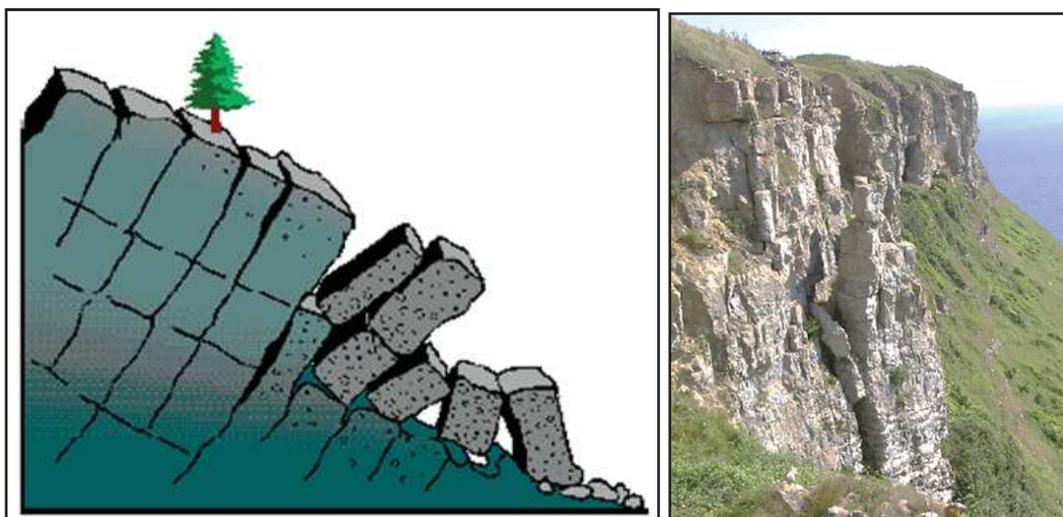


Figura 4.27 e Figura 4.28 entrambe tratte dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Traslazione/Scorrimento:** il movimento avviene lungo più superfici di taglio: se è uno scorrimento traslativo lo scivolamento avviene lungo un piano preesistente al movimento franoso, quale una superficie di stratificazione, una frattura o una faglia; se è uno scorrimento rotazionale il movimento avviene lungo una o più superfici di taglio di neoformazione concave e consiste nella rotazione di una massa rocciosa attorno a un punto posizionato al di sopra del baricentro. Si può verificare su tutti i versanti con velocità variabili. È innescato dal superamento della resistenza al taglio del materiale.

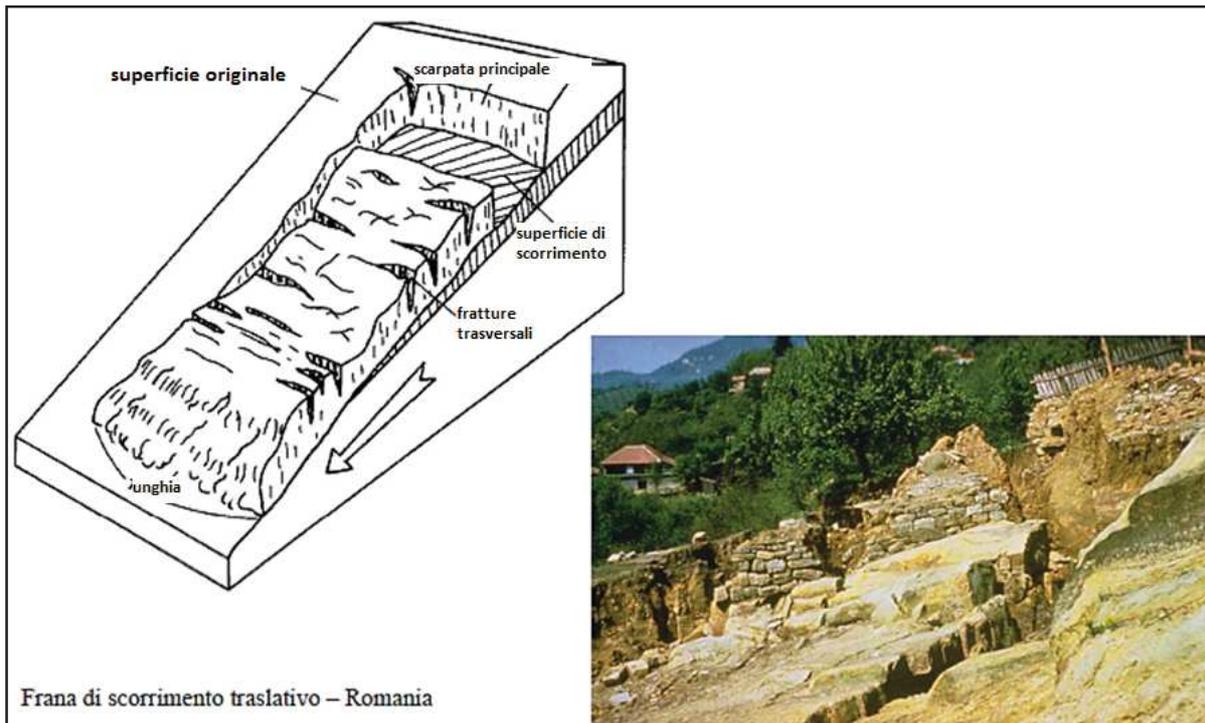


Figura 4.29 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Espandimenti laterali:** movimento orizzontale dovuto alla presenza di un'unità litologica rigida superficiale che poggia su un'unità litologica più plastica. Può avvenire con scivolamento su una superficie ben definita o con deformazione di uno spessore di roccia.

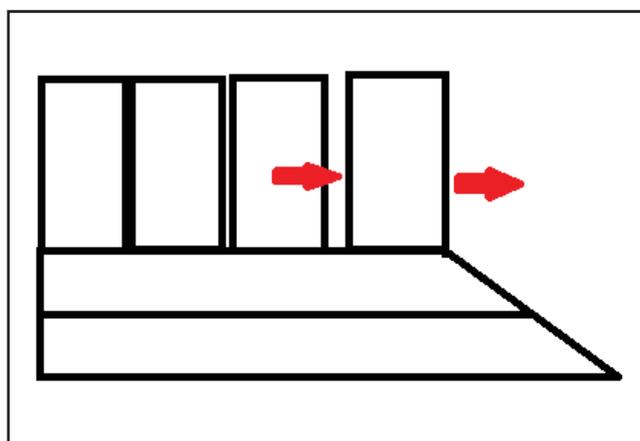


Figura 4.30 ad opera di Alba Gentili.

- **Colate o Flussi:** frana traslazionale tipica dei substrati argillosi. Nella maggior parte dei casi si sviluppano in terreni incoerenti con velocità variabile da punto a punto. Si individuano superfici di taglio temporanei che non vengono tuttavia preservate. La distribuzione delle velocità è paragonabile a quella di un fluido viscoso in moto e dipende dalla pendenza del versante e dal contenuto d'acqua. Esistono due tipologie di colate:
 - **Colamento lento:** è un movimento generalmente lento, che coinvolge suoli ricchi in argilla e poveri in acqua, su versanti solitamente non molto ripidi
 - **Colamento rapido:** è un movimento solitamente ad alta velocità che interessa terreni sciolti con alto contenuto di acqua.

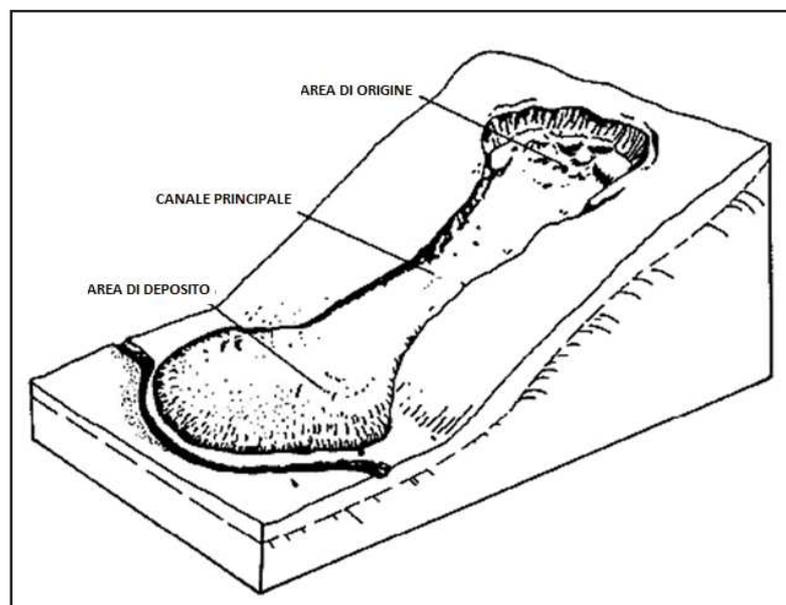


Figura 4.31 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Debris flow:** flussi gravitativi in cui il fango è la componente principale della dispersione. Si comporta come un fluido coerente monofase. Per innescarlo sono necessari: una forte pendenza, detrito non consolidato, apporto d'acqua, piccole frane, liquefazione del detrito per aumento della pressione nei pori, impatto meccanico, rottura di dighe naturali e terremoti.

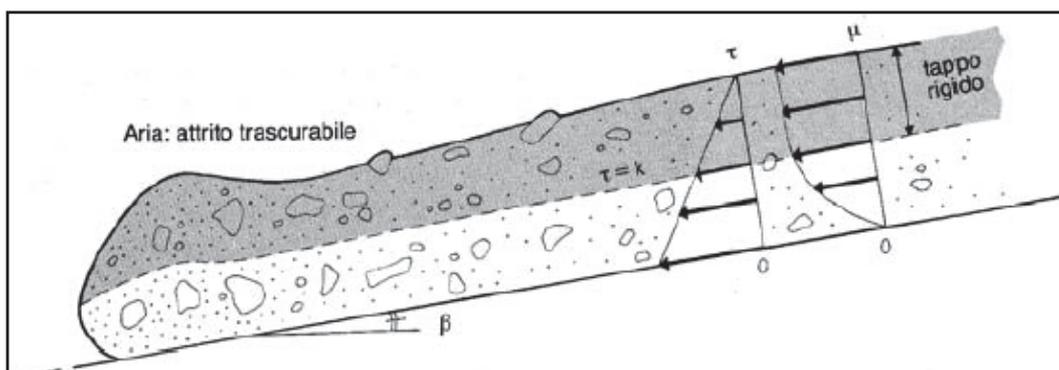


Figura 4.32 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

4.3.3 Fenomeni a grande scala: DGPV

Per DGPV si intende Deformazione Gravitativa Profonda di Versante. È un movimento che interessa i versanti in profondità e nella parte alta. La massa rocciosa fluisce lentamente senza una superficie di scorrimento basale, tale movimento provoca una superficie di rottura che può evolvere velocemente. Coinvolge il sistema: crinale-versante-fondovalle. Le dimensioni sono molto estese, con una velocità limitata a pochi millimetri l'anno. Le forme superficiali sono creste doppie, trincee, doline in cresta, accumuli detritici non legati a pareti, contropendenza sui versanti, vaillette parallele ai versanti, rigonfiamenti nella parte bassa dei versanti e superfici di collasso inverse a frana poggio.



Figura 4.33 depressioni per scivolamenti e DGPV con fenomeni di piping in calcari. Immagine tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

4.3.4 Depositi di versante

- **Depositi di frana:** presentano un'alta variabilità di facies che dipende strettamente dalla tipologia della frana stessa.
- **Detrito di falda:** base di pareti verticali costituita da un mantello di detriti di spessore variabile. Sono costituiti da frammenti grossolani e non gradati. I clasti sono a spigoli vivi e della stessa natura petrografica della parete. La sua genesi dipende da:
 - Litologia della roccia
 - Fatturazione della roccia
 - Porosità
 - Contenuto in acqua
 - Abbassamento della temperatura forte e rapido.
- **Grèzeslites:** depositi di versante costituiti da clasti a spigoli vivi mescolati ad elementi fini. Hanno una pendenza compresa tra i 10° e i 30° e sono localizzati su versanti con poca presenza di valli secche. La preparazione del materiale avviene mediante crioclastismo, mentre la frazione fine viene creata da fenomeni eolici.
- **Depositi colluviali (Colluvio):** i depositi di versante noti come colluvio sono presenti ai piedi di versanti, su versanti a debole pendenza, pianure e plateau. I depositi sono ben distinguibili dai detriti di versante benché presentino una litologia variabile dipendente dal substrato che li alimenta. Il colluvio si presenta massivo, ossia privo di strutture sedimentarie evidenti, con presenza di abbondante matrice fine. I clasti riflettono le litologie presenti sul versante, sia come substrato, sia come depositi più antichi; il materiale fine invece deriva dall'alterazione del substrato e dei depositi più antichi. I sedimenti e le alteriti presenti sui versanti evolvono grazie all'acqua di imbibizione o di ruscellamento e alla gravità. I depositi colluviali possono essere presenti un po' ovunque sui versanti, senza alcuna regola precisa: sono sufficienti deboli ondulazioni o contropendenze per bloccarli, infatti si accumulano nelle concavità.

4.4. RETE FLUVIALE

L'acqua si incanala producendo grandi fenomeni: infatti la rete idrica è la principale via di smaltimento dei detriti poiché essi si creano ad alta quota dove le montagne sono più soggette all'alterazione e grazie alla gravità essi vengono trasportati a valle.

I rivoli si organizzano in canali via via sempre più grandi andando verso valle; i corsi d'acqua all'interno di una rete idrica si classificano in base agli ordini, ovvero gli affluenti sono di ordine più basso rispetto ai corsi d'acqua principali e i rigagnoli sono di ordine più basso rispetto a un fiume di grossa portata.

Il bacino di drenaggio è l'area topografica delimitata da una linea di spartiacque che raccoglie e contribuisce a trasportare l'acqua lungo la rete fluviale verso il corso d'acqua principale. I vari canali che si creano nel bacino sono separati dagli interfluvi.

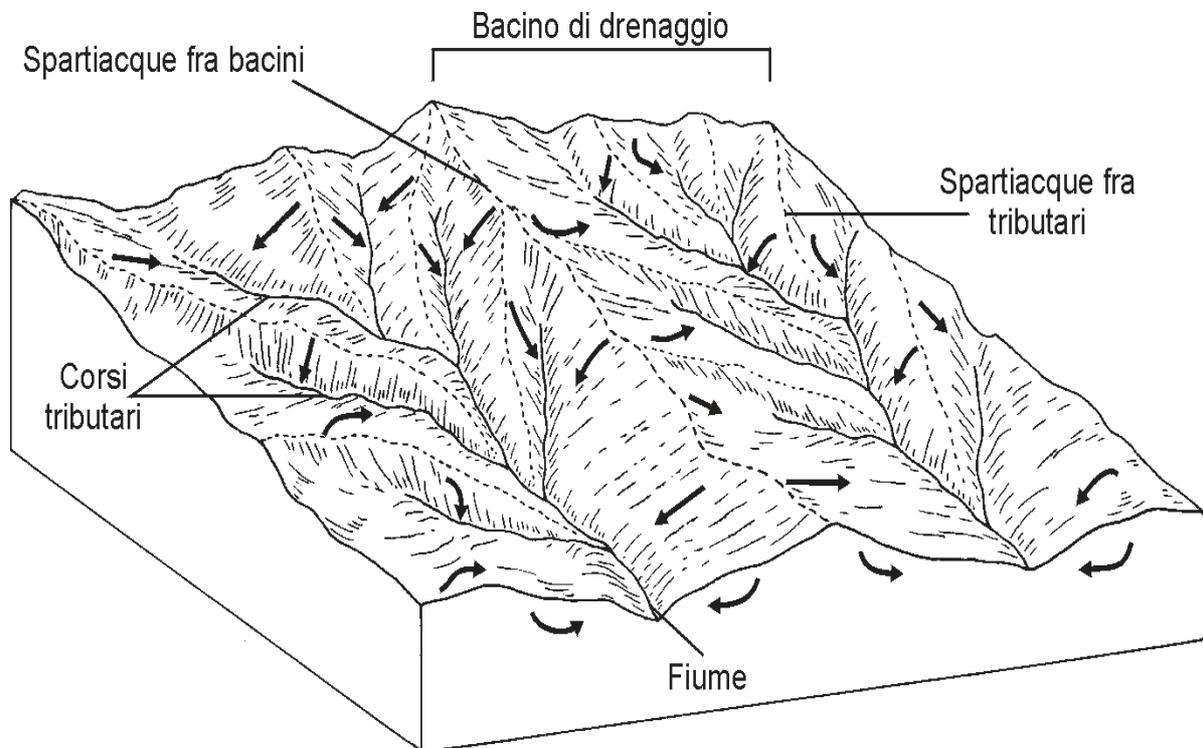


Figura 4.34 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

4.4.1 Caratteristiche del reticolo idrografico

Il reticolo possiede una forma molto significativa ed è in incisione e taglia i substrati per erosione. Esistono varie tipologie di pattern idrografico (configurazione del reticolo idrografico):

- **Dendritico:** su terreni omogenei e impermeabili, a limitata acclività, organizzazione casuale, non avviene controllo tettonico.

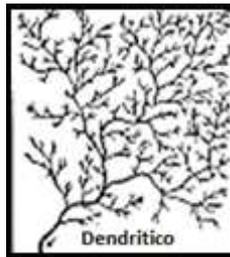


Figura 4.35 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Meandriforme:** caratteristico delle pianure alluvionali.

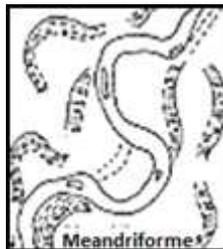


Figura 4.36 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Braided (anastomizzato):** si genera in aree a notevole sedimentazione con canali intrecciati.

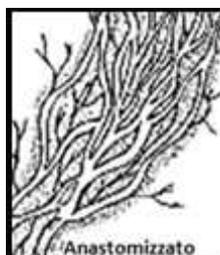


Figura 4.37 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Divergente:** caratterizza i delta e le conoidi.

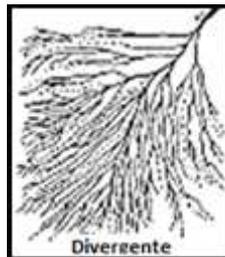


Figura 4.38 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Convergente:** caratteristico di terreni poco permeabili a sensibile acclività.

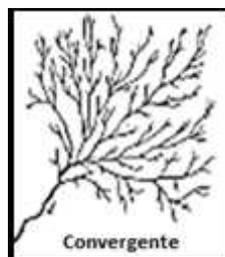


Figura 4.39 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Parallelo:** su terreni impermeabili a sensibile acclività, avviene controllo da parte di fratture sub parallele.

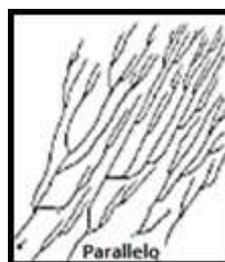


Figura 4.40 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Angolato:** il controllo strutturale avviene grazie a due famiglie di faglie/fratture/discontinuità litologiche con un substrato lapideo molto resistente.

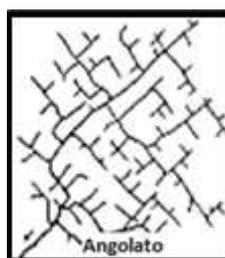


Figura 4.42 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Radiale centrifugo:** si genera grazie a un rilievo tettonico.

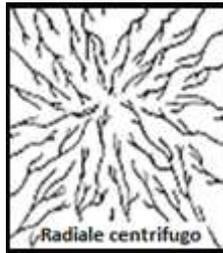


Figura 4.43 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

- **Radiale centripeto:** si genera grazie a una depressione tettonica o a bacini.

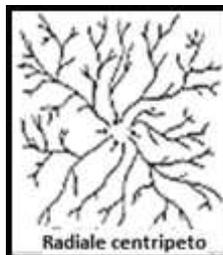


Figura 4.44 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

La quantità d'acqua che scorre in un fiume si misura con la portata, ovvero il volume d'acqua che passa attraverso una sezione perpendicolare al fiume in un intervallo di tempo. Essa non è quasi mai costante, quindi si possono distinguere tre (quattro) situazioni:

- **Magra:** quando nel fiume scorre poca acqua, solitamente nei periodi più secchi. Il fiume occupa il letto di magra in questo caso.
- **Morbida:** quando nel fiume scorre abbastanza acqua, solitamente nei periodi umidi. Il fiume occupa il letto ordinario in questo caso.
- **Piena:** quando nel fiume scorre una quantità di acqua straordinaria tale da straripare inondare aree che normalmente non sono percorse dal fiume. Il fiume occupa il letto di inondazione.
- **A carattere torrentizio:** viene considerata a parte poiché ha contrasti molto forti tra periodi di magra in cui è in secca e periodi umidi in cui è in piena.

I corsi d'acqua tendono al livello di base, che è una superficie non reale che si estende sotto i continenti dal livello del mare in corrispondenza della costa, leggermente inclinato in modo che i fiumi scorrano. Il livello di base finale/assoluto è il livello del mare, mentre localmente può variare a causa di irregolarità legate al profilo longitudinale. Grazie al livello di base il corso d'acqua tende a creare il profilo regolarizzato, ovvero un profilo di equilibrio, concavo, tendente al livello di base e che da monte a valle aumenta la portata e diminuisce la granulometria del detrito, nel quale in ogni punto c'è equilibrio tra erosione e

sedimentazione. Il livello di base non è mai fisso, si può alzare a causa della tettonica o dell'innalzamento dei mari e si può abbassare a causa dell'orogenesi o in seguito a glaciazioni.



Figura 4.45 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

4.4.2 Rapporto tra pendenza e corso d'acqua e morfologie generate

Il corso d'acqua definisce un alveo diverso in base alla portata e alla zona in cui si trova:

- **Alta pendenza:** la portata è minore, l'alveo è più inciso, avviene erosione verticale con l'aiuto dell'azione idraulica, l'abrasione e l'attrito sono le forze dominanti. La dimensione del carico è grossolana e angolosa. La forma della valle è a "V".
- **media pendenza:** l'alveo è più profondo e più ampio, l'erosione verticale diminuisce di importanza mentre aumentano di importanza l'erosione laterale e la deposizione. La sospensione è il principale tipo di trasporto. Il carico diviene più fine e meno angoloso.
- **bassa pendenza:** l'alveo è alla sua massima larghezza e profondità, può essere affetto da maree. La deposizione è più importante dell'erosione. Il materiale fine viene depositato, c'è una grande quantità di carico ma è di dimensioni molto fini e ben arrotondato.

Il corso d'acqua è rettilineo quando il gradiente di pendenza è elevato; quando questo si abbassa deve trovare un buon rapporto tra carico e energia per arrivare a valle e si formano dei meandri.

Quando il corso d'acqua è caratterizzato da media pendenza il rapporto tra erosione e sedimentazione dà luogo al terrazzo fluviale. Il terrazzo fluviale è una forma composita: è infatti un corpo sedimentario/roccioso con superficie piana delimitata da una scarpata, prodotto in un contesto di dinamica fluviale. Infatti la valle viene scavata dal fiume nel

substrato roccioso, è avvenuto un deposito e poi nuovamente un'erosione e via di seguito; in questo tempo il fiume d'acqua si è comportato diversamente e il livello del corso d'acqua si è abbassato nel tempo. Ovviamente i terrazzi fluviali sono stati erosi nel tempo dai vari processi geomorfologici e solitamente rimangono visibili solo la scarpata e l'orlo di scarpata. Un tempo erano molto studiati per verificare le variazioni climatiche lontano dai ghiacciai, tuttavia i cambiamenti dei terrazzi fluviali hanno varie cause.

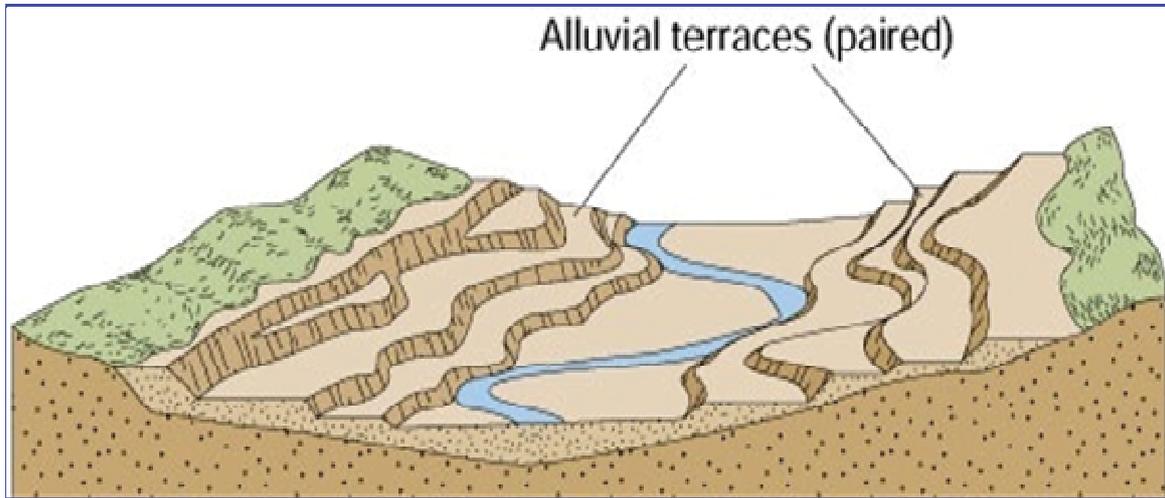


Figura 4.46 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

Il corso d'acqua quando esce dalla valle crea un conoide pedemontano. Esso si forma poiché nella valle è confinato ma appena esce da essa il fiume non è più confinato e si trova di fronte a un'ampia pianura nella quale può andare in ogni direzione: infatti il corso d'acqua si sposta a ventaglio da rilievo a rilievo poiché cerca ogni volta una strada che richieda minor energia; inoltre non c'è più la pendenza determinata dalla valle e ciò si riflette nella selezione granulare che caratterizza le varie parti del conoide:

- **conoide apicale:** depositi grossolani, la stratificazione è difficile.
- **conoide mediano:** depositi di ghiaie e sabbie, dovuti alla corrente selettiva e avviene la stratificazione.
- **conoide distale:** depositi più fini, dovuti alla corrente selettiva e avviene la stratificazione.

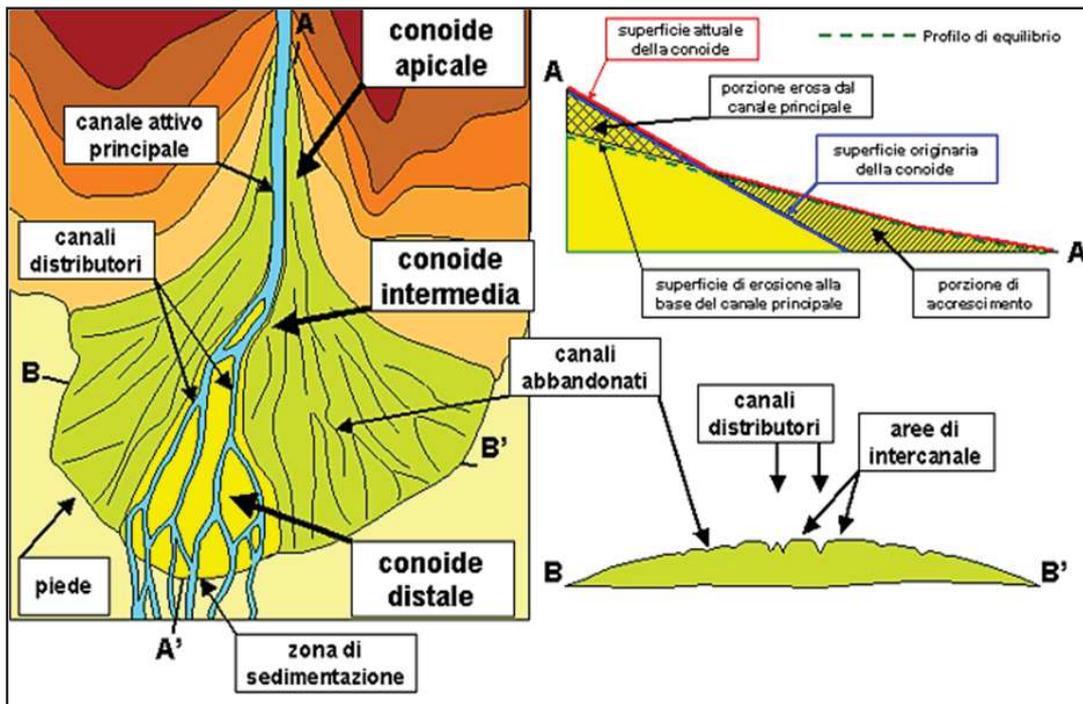


Figura 4.47 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di M. Cremaschi.

In pianura il corso d'acqua diventa meandriforme poiché esso si trova in una zona pianeggiante, possiede un alto ordine e una portata elevata. All'interno del meandro sono presenti le barre di meandro (accumulo di sabbia con andamento concorde). I meandri si possono spostare, non sono fissi: infatti tutta la fascia di meandri tende a spostarsi lungo la linea del gradiente topografico. Il meandro è inoltre un modo per gestire la portata in una situazione in cui c'è pochissima energia: la corrente erode un tratto di sponda, prende in carico il sedimento e lo deposita dove è situata la barra di meandro sullo stesso lato, alternando tratti in cui erode a tratti in cui sedimenta.

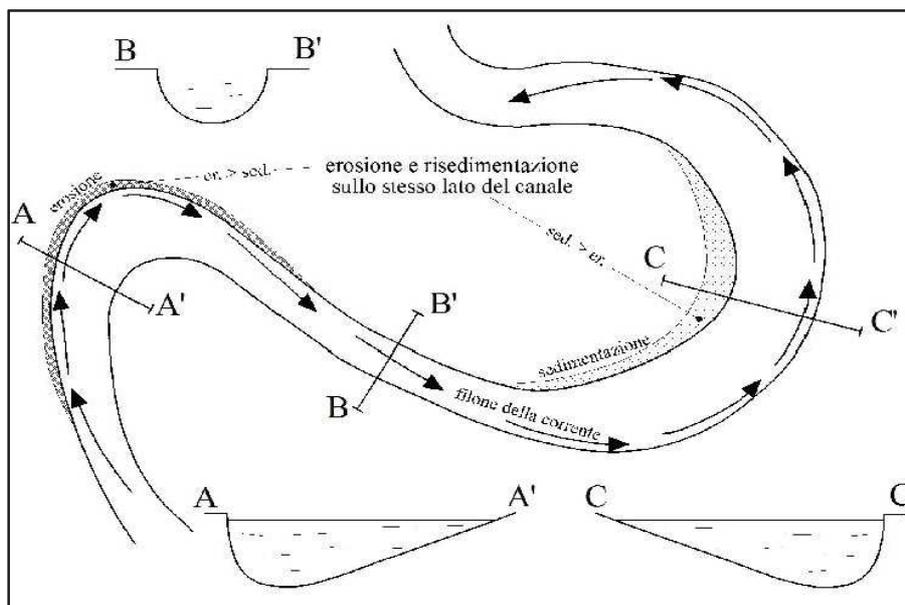


Figura 4.48 tratta da "Geomorfologia" di G. Castiglioni.

Le barre fluviali sono accumuli allungati di ghiaie deposte da un corso d'acqua e diventano un ostacolo da aggirare con percorsi alternativi. I sedimenti della barra fluviale sono caratteristici: infatti si sedimentano in strati inclinati a basso angolo lungo l'argine e tali strutture possono essere ritrovate nel record geologico.

La sovrimposizione è la permanenza del tracciato di un corso d'acqua durante l'incisione, quando incontra condizioni litostrutturali diverse da quelle che avevano determinato il corso d'acqua stesso. L'antecedenza è un fenomeno nel quale un corso d'acqua più antico mantiene il suo tracciato attraverso una struttura tettonica che si è sollevata nel frattempo.

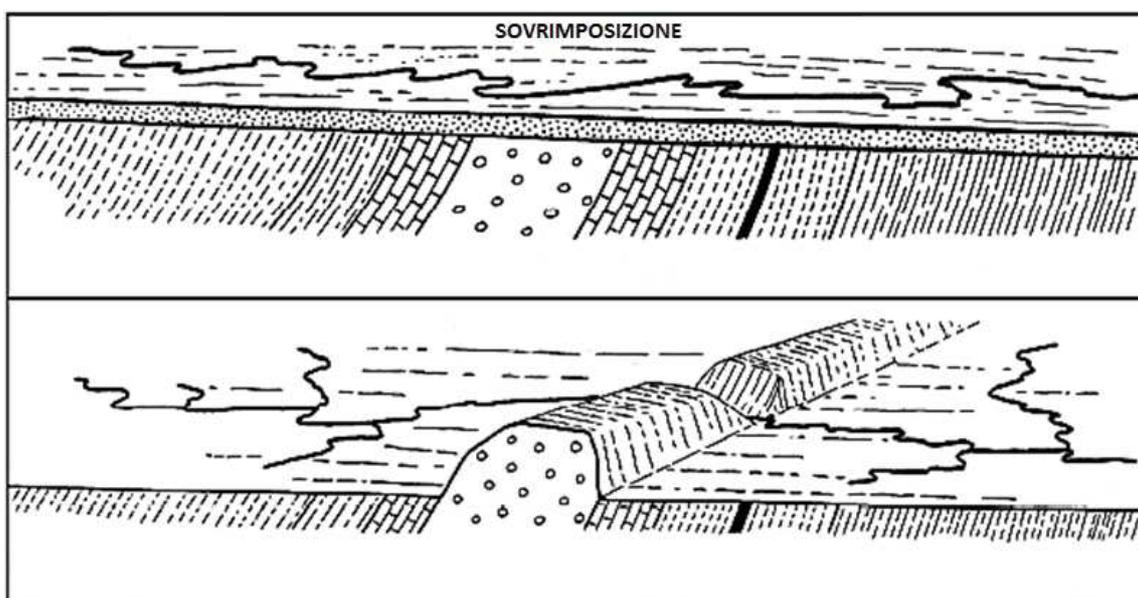
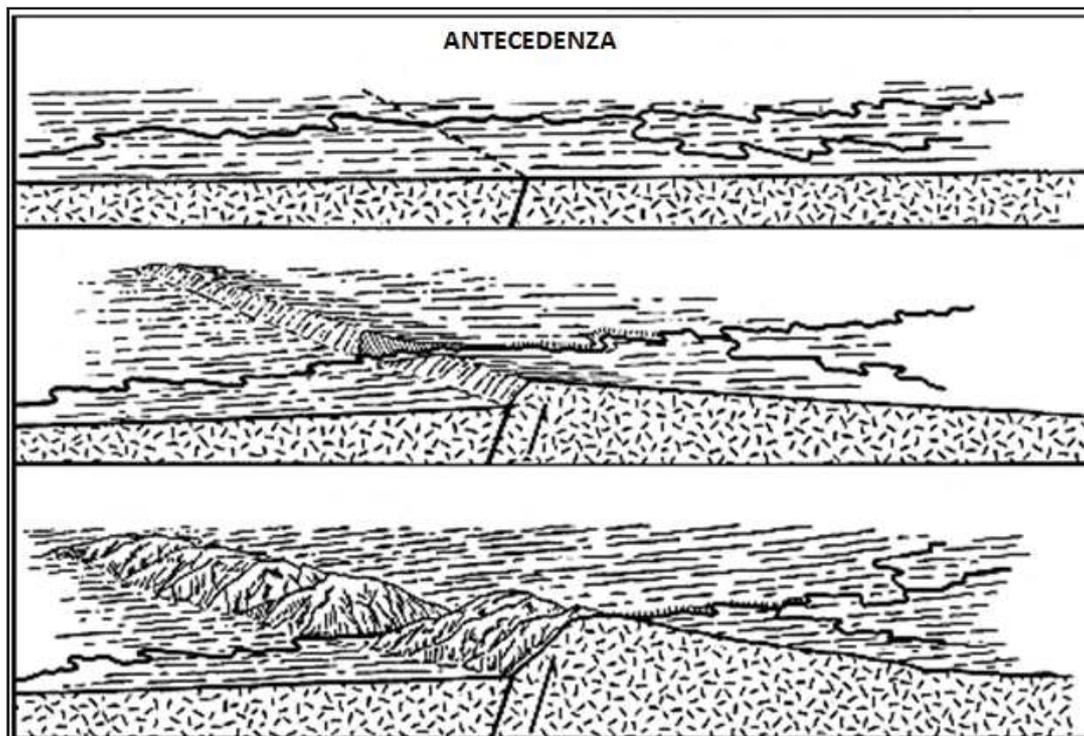


Figura 4.49 e 4.50 tratte entrambe da "Geomorfologia" di G: Castiglioni.

4.5. CARSISMO

Con il termine carsismo si comprendono tutti i fenomeni che derivano dall'azione solvente dell'acqua sulle rocce. Questa può essere svolta da acque epigeniche (acque meteoriche: pioggia, grandine e neve) o da acque ipogeniche (acque profonde). Esistono varie forme di carsismo:

- **Esocarso:** carsismo superficiale
- **Endocarso:** carsismo profondo

4.5.1 I processi di corrosione

È un processo chimico dovuto alla facilità con cui una roccia può sciogliersi in acqua, inoltre dipende dalla solubilità della roccia in acqua.

L'azione dell'acqua sulle rocce si esplica mediante due processi:

- **Erosione:** processo meccanico, dovuta ad abrasione, urto e sfregamento della roccia da parte delle particelle solide trasportate dall'acqua.
- **Corrosione:** processo chimico, dovuto all'azione solvente dell'acqua.

La solubilità in acqua delle principali rocce è:

- **Calcere:** insolubile in acqua distillata, tuttavia molto solubile se nell'acqua è presente CO_2 secondo la reazione $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$.
- **Dolomia:** costituita essenzialmente da dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ è molto solubile se nell'acqua sono presenti sostanze estranee come i solfati.
- **Evaporiti:** comprendono rocce costituite da gesso, anidrite e salgemma. Sono direttamente molto solubili in acqua.
- **Conglomerati e arenarie:** la solubilità dipende dal tipo di cemento e dalla petrografia dei ciottoli: è alta se sono calcarei, nulla se sono silicei.

4.5.1.1 Soluzioni acquose e equilibrio chimico.

- **Dissociazione:** l'acqua è un conduttore a causa della sua polarità. Il normale stato di agitazione termica è sufficiente a strappare al solido alcuni ioni che si allontanano per diffusione.
- **Dissoluzione acida:** avviene quando c'è disponibilità di protoni $\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$. La soluzione è sbilanciata a destra. Reazioni così procedono verso destra proporzionalmente alla concentrazione dei reagenti fino al raggiungimento dell'equilibrio.
- **Indice di saturazione:** una soluzione di un determinato minerale può trovarsi in una delle seguenti condizioni:
 - **Sottosatura:** detta anche aggressiva; si svolge prevalentemente la reazione diretta, il che significa che il minerale passerà in soluzione;

- **Satura:** si è in condizioni di equilibrio dinamico; la soluzione è satura per quel minerale;
- **Sovrasatura:** predomina la reazione inversa e avviene precipitazione.

4.5.1.2 Fattori esterni che influenzano il sistema

- **Variazioni di temperatura e pressione:** se l'acqua si raffredda prima di passare nel sottosuolo aumenta la sua aggressività, tuttavia la velocità di reazione diminuisce al diminuire della temperatura. L'aumento di pressione non ha effetti sulle specie in soluzione ma influenza il passaggio della CO₂ in fase liquida e quindi la dissoluzione della calcite.
- **CO₂ nel suolo:** le piante verdi respirano nel suolo circa il 40 % della CO₂ che estraggono dall'atmosfera. La produttività aumenta con la temperatura. La quantità di CO₂ dipende da: tipo di suolo, tessitura, orizzonte, profondità, drenaggio, esposizione, tipo di copertura vegetale, comunità biotiche e cicli stagionali.
- **CO₂ nella zona vadosa:** essendo un gas pesante la CO₂ si può accumulare fino a livelli considerevoli verso il basso e l'acqua scorrendo può assorbire questo accumulo e diventare più aggressiva.
- **Corrosione per miscela di acque:** due acque che siano in condizioni di saturazione rispetto alla calcite possono miscelarsi e generare così una nuova soluzione chimica aggressiva.
- **Coppie ioniche:** in una soluzione che contiene molti ioni liberi si possono formare coppie di ioni fra anioni e cationi. Maggiore è la forza ionica, maggiore è la possibilità di accoppiamento.
- **Ioni comuni:** se nella dissoluzione di un minerale si forma uno ione che può essere introdotto anche da altra sorgente allora, la sua eventuale introduzione, determinerebbe una diminuzione della solubilità del minerale nel caso di una sua eventuale introduzione.
- **Ioni estranei:** l'aggiunta di ioni esterni (Na⁺, K⁺, Cl⁻) estranei al sistema costituito da calcite, anidride carbonica e acqua, determina un aumento della solubilità della calcite.
- **Acidi inorganici:** vengono prodotti da batteri di vario tipo. La produzione di CO₂ in queste reazioni determina un'ulteriore dissoluzione della calcite.
- **Acidi organici:** i batteri ossidano la sostanza organica producendo CO₂. Questo processo può avvenire anche nelle acque naturali che contengano sostanza organica in sospensione.

4.5.2 Endocarso: Le grotte

Una grotta è un vuoto sotterraneo percorribile dall'uomo. Possono essere carsiche o di altra natura.

Si possono distinguere:

- **Cavità di tipo classico:** una volta che una roccia carsificabile viene esposta agli agenti atmosferici, si instaura un gradiente idraulico (dislivello tra zona di assorbimento e zona di uscita delle acque) e si instaura un sistema carsico. Questo sistema comprende la formazione di protocondotte (nelle quali l'acqua percola e si muove nelle fratture), realizzazione di una rete di drenaggio, individuazione di un circuito preferenziale (quello con minor dispendio di energia) e allargamento delle condotte.

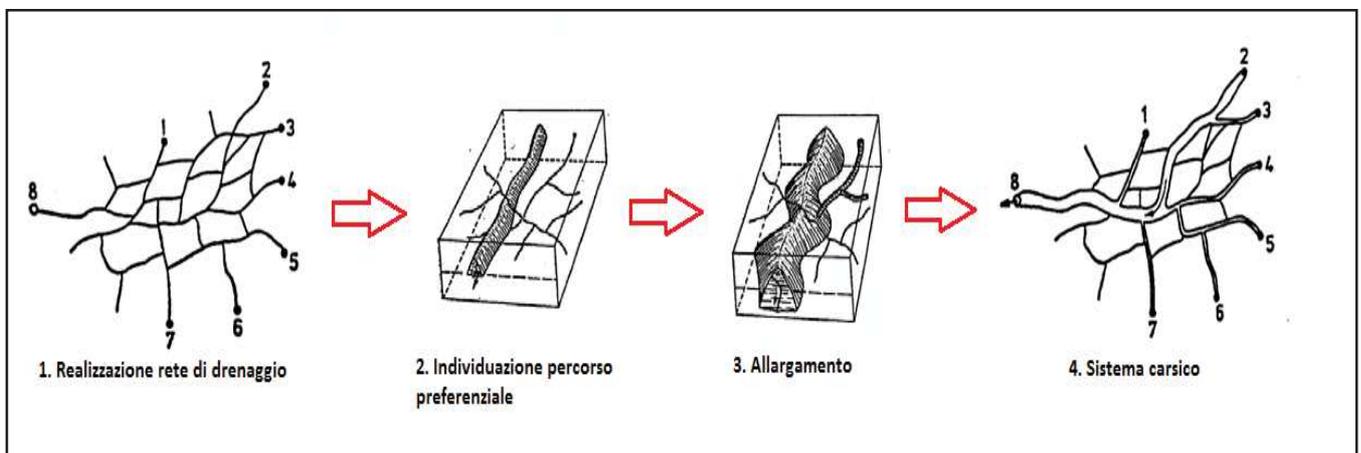


Figura 4.51 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Cavità da acque termali calde:** sono dovute alla circolazione di acque mineralizzate nella roccia lungo porosità o discontinuità. Le grotte ipogeniche sono formate dalla risalita di acque profonde. La principale caratteristica di questa tipologia è quella di essere costituite da serie di vuoti sferici o coalescenti o disposti in linea a formare una galleria con continui allargamenti e restringimenti. Questi vuoti sono ricoperti da un sottile strato di mineralizzazione dovuto alla precipitazione di sali.

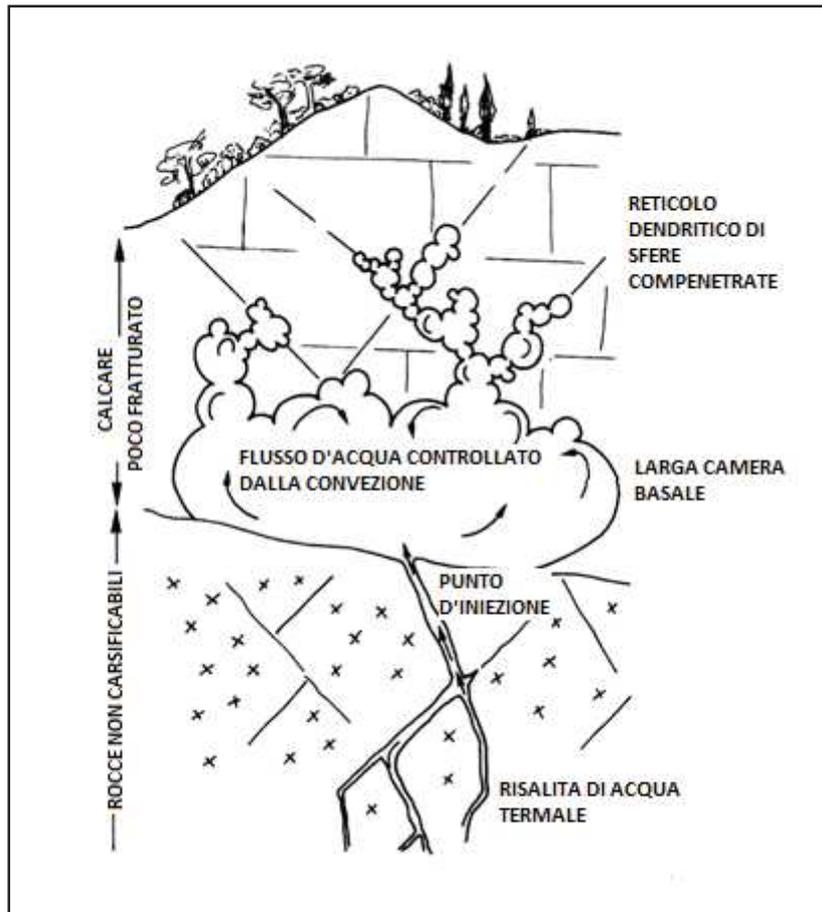


Figura 4.52 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.53 Valmalenco, Tana del Pirola. Fotografia di A. Bini.

- **Cavità di piping di Fantôme de Roche:** sistema di vuoti che si genera per asportazione di materiale alterato. In calcari ricchi di silice l'asportazione della frazione carbonatica non distrugge la roccia, ma la rende porosa, leggera e di consistenza argillosa (Fantôme de Roche). La genesi è limitata a litologie a solubilità non molto elevata con un alto contenuto di materiale non solubile. È necessario l'instaurarsi di un clima tropicale caldo-umido, in cui l'alterazione per dissoluzione della frazione carbonatica determina la formazione di piccoli vuoti. Si possono riconoscere delle forme residuali in superficie (pinnacoli, tor, pilastri e torri residuali, corridoi e trincee di alterazione in corrispondenza delle discontinuità fantômizzate) e in profondità (organizzazione spaziale dei sistemi di cavità secondo un reticolo a maglie regolari, gallerie a sezione subcircolare o ellittica/rettangolare alta e stretta, frequenti tratti di gallerie paralleli, affiancate o sovrapposte, frequenti chiusure a cul de sac delle gallerie).



Figura 4.54 Como, Monte Bisbino. Fotografia di A. Bini.

- **Cavità dovute a rilascio tensionale:** il rilascio tensionale produce nelle parti alte del versante e sulle creste forme che somigliano a quelle carsiche e le tipiche creste doppie. Terminano in generale in massi di frana o in corridoi impercorribili, possono esserci concrezioni e anche rimodellamenti parziali dovuti a circolazione di acqua successiva al rilascio.

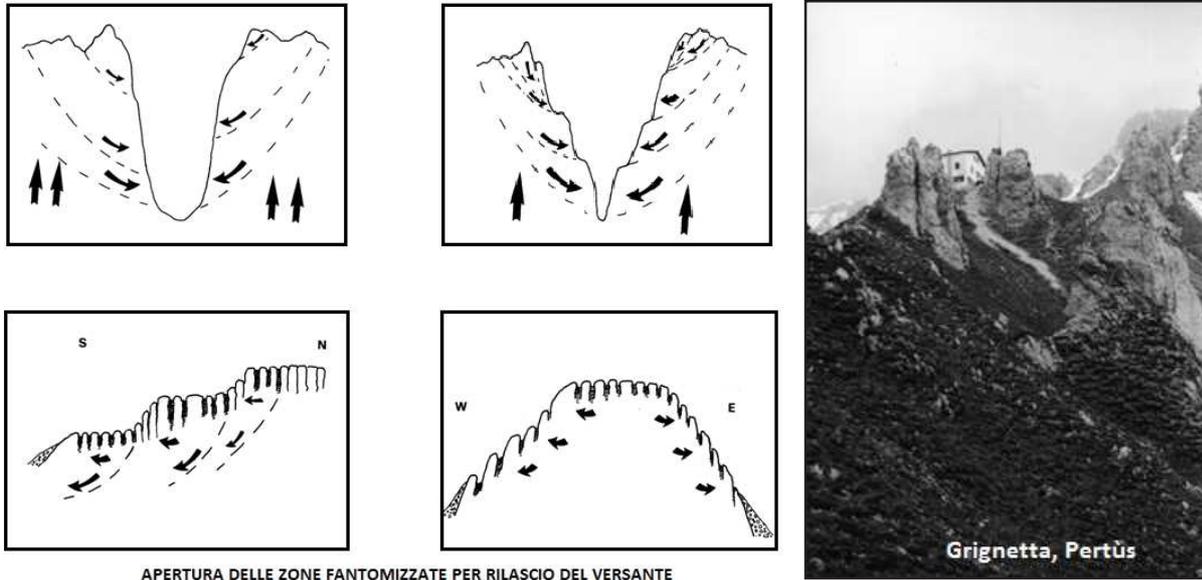


Figura 4.55 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.56 Fotografia di A. Bini.

- **Cavità di vuoti comunicanti in ammassi di frana:** presentano forme estremamente varie dovute al diverso accumularsi di massi, inoltre è presente una circolazione dell'aria.
- **Cavità per crescita di colate di travertino:** cavità che si generano quando nella genesi di un massiccio di travertino rimangono spazi liberi tra una colata e la successiva. L'età della roccia e l'età della grotta in questo caso coincidono. Sono grotte generalmente di piccole dimensioni ricche di acque di stillicidio

4.5.2.1 Travertini

Avendo parlato nel paragrafo precedente delle grotte formate in travertino è opportuno fornire una breve descrizione del tipo di roccia.

Il travertino è una roccia sedimentaria carbonatica che si forma per precipitazione chimica di carbonato di calcio. Presenta una struttura porosa con impronte vegetali. Non è stratificata ma organizzata in colate. Essi hanno genesi da diversi processi:

- **Travertino idrotermale:** si sviluppa in sistemi ad elevata temperatura, costruendo edifici molto consistenti. Le acque termali dissolvono i carbonati in condizioni di alta pressione e alta temperatura. In superficie l'abbassamento di temperatura fa precipitare calcite e aragonite.



Figura 4.57 Yellowstone, travertino idrotermale. Fotografia di A. Bini.

- **Travertini detritici:** si tratta di incrostazioni su particelle detritiche o su supporti vegetali (fitoclasti). Esistono differenti tipologie per genesi:
 - **Travertino fitoclastico:** incrostazioni di carbonato di calcio di riempimento di cavità, possono anche essere grandi dovute alla dissoluzione di tronchi.



Figura 4.58 Monteverchia. Fotografia di A. Bini.

- **Travertino bibliolitico:** incrostazioni che si formano su foglie intere o frammentate, le quali si accumulano in zone riparate dal flusso idrico, è compatto e laminato.



Figura 4.59 Val Menaggio. Fotografia di A. Strini.

- **Travertino oncolitico:** granuli e noduli sferici e sub sferici dovuti alla presenza di alghe e batteri.



Figura 4.60 fotografia di A. Bini.

- **Travertini autoctoni:** sono depositi in situ, derivano da rapidi processi di incrostazione su strutture vegetali in posizione di vita. Anche di questo esistono differenti tipologie legate alla genesi:
 - **travertino stromatolitico:** livelli lenticolari, presentano porosità primaria, con lamine spesse da 1 a 5 mm ondulate legate all'attività di batteri, costituendo duomi di alcune decine di centimetri di altezza.



Figura 4.61 Valmenaggio. Fotografia di A. Strini.

- **Travertino fitotermale:** su supporto vegetale su piante igrofile (erba) che rimangono in posizione di vita, presenta porosità legate e vuoti derivanti dalla dissoluzione della materia organica, non stratificato.



Figura 4.62 Valmenaggio. Fotografia di A. Strini.

- **Travertino microtermale:** costituito da microrganismi costruttori come muschi e alghe, presenta sottili lamine ondulate parallele al substrato che si ripetono ciclicamente.



Figura 4.63 Valmenaggio. Fotografia di A. Strini.

I travertini possono presentare varie morfologie influenzate dal luogo di formazione:

- **Slopesystem (gentle e steep scope):** corpi lobati o multilobati, da convessi a pianeggianti con morfologia a cuneo e apice. È rivolto verso monte e costituito da colate irregolari clinostratificate, inspessendo gli accumuli verso valle.



Figura 4.64 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Pool terraces:** sbarramenti in travertino con convessità rivolta a valle che si formano a partire da irregolarità sul fondo (tronchi e rami). Si estendono da una sponda all'altra dell'alveo e si rinvengono in singole unità o in serie continua di sbarramenti o pozzi. Le vaschette sono presenti sia nelle zone più pianeggianti sia alla base delle cascate. Presentano una facies porosa abbastanza compatta



Figura 4.65 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Travertino di cascata:** costituito da colate successive su elevata pendenza. È composto da travertino microermale, fitotermale con presenza di muschi e alghe.



Figura 4.66 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

4.5.3: Esocarso

4.5.3.1: Doline



Figura 4.67 Verona, Monte Baldo. Fotografia di A. Bini.

Le doline sono depressioni chiuse in corrispondenza delle quali l'acqua viene assorbita nel sottosuolo. Il diametro è molto più grande della profondità per questo motivo vengono distinte dai pozzi, i quali invece sono più profondi che larghi.

Le doline vengono classificate in base a diversi fattori che possono essere la forma o la genesi delle stesse. La classificazione per forma suddivide le doline nelle seguenti tipologie:

- **Emisferiche:** più ampie che profonde, con versanti e fondo concavi.

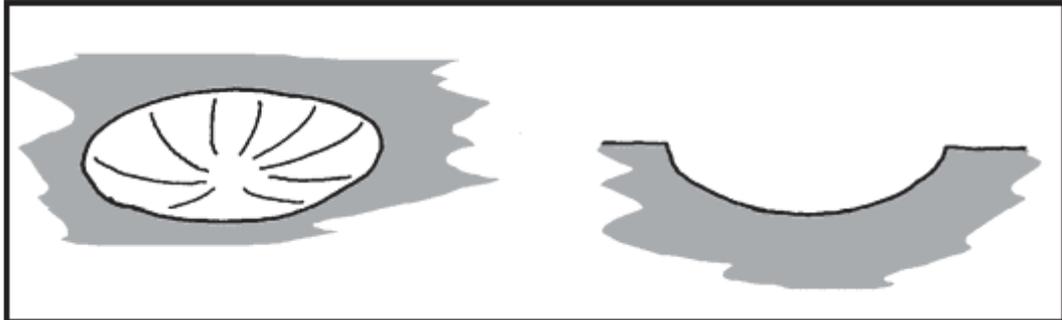


Figura 4.68 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Troncoconiche:** più ampie che profonde con il fondo piatto.

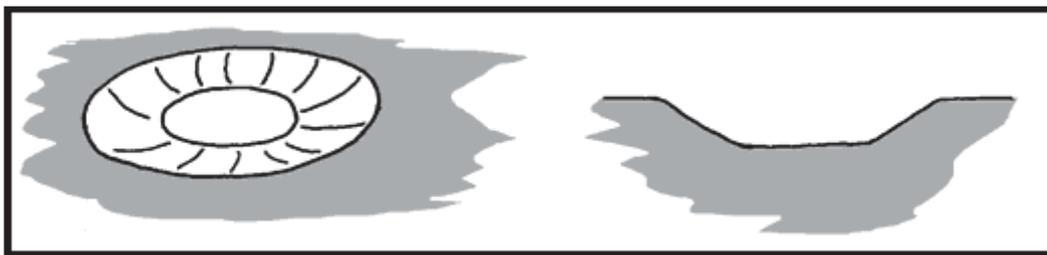


Figura 4.69 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Coniche:** con versanti uniformemente inclinati verso il punto centrale, possono essere molto profonde con versanti ripidi.

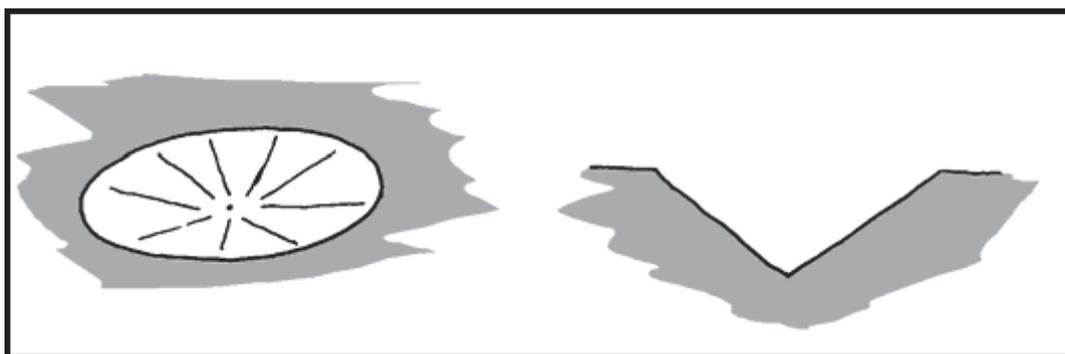


Figura 4.70 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

Se invece la classificazione avviene per genesi vengono distinte le seguenti tipologie:

- **Doline di corrosione (o di soluzione o di dissoluzione):** si generano per corrosione sotto la copertura di un suolo o di sedimenti a chimismo acido. Per convergenza delle acque verso un punto assorbente costituito dall'incrocio di due fratture. Esse hanno forma circolare con versanti dolci e fondo piano o concavo intasato dai sedimenti. Si formano sotto una copertura di sedimenti o di un suolo.

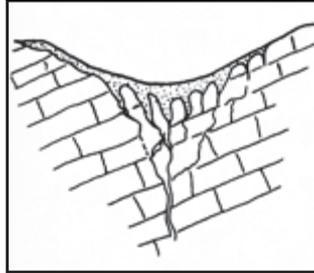


Figura 4.71 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Doline di crollo:** sono depressioni generate per il crollo di un diaframma di roccia tra una grotta preesistente sottostante e la superficie. Hanno forme aspre e pareti ripide, sul fondo ci sono i massi originali del crollo. Possono essere da sala sotterranea o basi di pozzi decapitati (costituite dalla parte inferiore di una sala o di un pozzo sotterraneo portati in superficie per erosione) o per rilascio del versante (si formano in rocce non carsificabili come graniti e gneiss, bisogna tuttavia specificare che la loro genesi è dovuta puramente per cause meccaniche e non ha nulla a che fare con il carsismo).

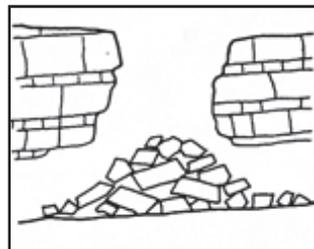


Figura 4.72 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Depressioni glaciocarsiche:** sono depressioni di grandi dimensioni (maggiori di 100 m) diffuse nei carsi di alta montagna. L'asse di allungamento viene ritenuto essere la direzione di scorrimento del ghiacciaio. Nella genesi intervengono sia la corrosione carsica sia l'esarazione glaciale. In generale si tratterebbe di doline preesistenti approfondite dai ghiacciai.
- **Doline di subsidenza:** sono doline che si sono formate in rocce non carsificabili che però poggiano su rocce solubili e carsificabili. La dissoluzione delle rocce sottostanti e la successiva formazione di vuoti provoca subsidenza nelle rocce sovrastanti. La dolina tuttavia non presenta fratture in superficie ma solo piegamento della roccia. Esistono varie tipologie che si formano in relazione a processi diversi: Breccia pipe (mano a mano che la dissoluzione procede il terreno

cede a dare la breccia di riempimento), *solutionsubsidencetrough* (depressioni allungate), *solution-induceddepositionalbasin* (depressioni riempite da sedimenti).

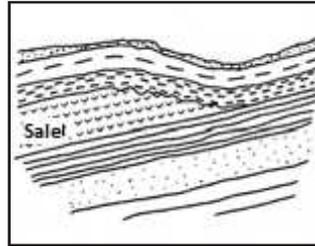


Figura 4.73 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Doline di soffusione:** sono depressioni doliniformi in rocce non carsificabili, riguardano sprofondamenti dovuti a collassi per adattamento del substrato a vuoti che si generano in rocce solubili sottostanti. Spesso sono localizzate in depositi sciolti di per sé non carsificabili.

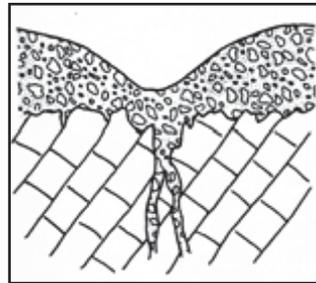


Figura 4.74 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

Le doline di soffusione possono essere dovute a vari fenomeni, le principali tipologie sono:

- **covercollapsepiping:** formate in zone con spesse coperture di suoli o altri sedimenti fini, sono dovute al movimento verso il basso della copertura non consolidata. Si formano piccoli vuoti causati dall'acqua che asportano il suolo nel carso sottostante e generano la dolina.
- **cavità dapiping:** l'acqua penetra e raggiunge il livello impermeabile, dove rimuove le particelle aumentando le dimensioni del vuoto che generano gallerie a cui possono seguire crolli.
- **crollo di cavità nel substrato:** doline di crollo che coinvolgono il terreno sovrastante.
- **piping e soilarch:** cavità nel substrato o discontinuità in presenza delle quali si creano vuoti nella copertura per *piping*, evolvendo per crollo o per asportazione di particelle,

nel caso in cui la cavità nella copertura si auto sostiene si genera un *soilarch* a forma di volta a cupola.

- **occhi pollini**: sprofondamenti improvvisi in alta pianura Lombarda. Sono dei vuoti che si incontrano nella copertura quaternaria durante scavi o che si aprono improvvisamente generando crolli. Sono direttamente collegati con l'avanzare e il ritirarsi dei ghiacciai. Possono provocare enormi danni e sono molto pericolosi.
- **Cockpit**: doline generatesi in zone tropicali.
- **Uvala**: depressioni complesse e irregolari derivate dalla coalescenza di più doline molto vicine per erosione dello spazio presente tra di esse in calcari ben fratturati oppure costituiscono depressioni complesse formatesi lungo discontinuità della roccia. Possiedono una forma articolata con più punti assorbenti.

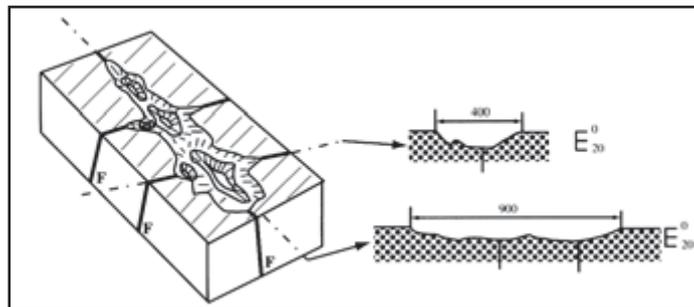


Figura 4.75 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

4.5.3.2 I polje



Figura 4.76 Gran Sasso, Piano di Fossetta Paganica. Fotografia di A. Bini.

Il termine *polje* indica vaste depressioni a fondo piatto con drenaggio sotterraneo per via carsica delle acque, con forme e dimensioni molto variabili ma sempre maggiori di 400 metri.

Tutti i *polje* sono legati a dispositivi strutturali che ne determinano direzione condizione di circolazione dell'acqua, le più comuni sono le faglie. Altri *polje* sono legati invece a pieghe sinclinali dove avviene il concentrazione delle acque sotterranee, oppure a pieghe anticlinali, dove è la tipologia della piega stessa a determinare uno sbarramento per le acque (nucleo impermeabile).

Per quanto riguarda la loro origine è stato notato che la presenza delle depressioni che ospitano i piani è legata a situazioni strutturali particolari come ad esempio tettonica distensiva ad *horst e graben*, depressioni di angoli di faglie e sinclinali. La sua evoluzione invece dipende da fenomeni carsici e di versante. Il carsismo inizia a svilupparsi durante i movimenti tettonici che portano alla formazione della depressione. Il carsismo quindi agisce non è da considerarsi causa della genesi di un *polje* ma bensì della sua evoluzione.

I *polje* rappresentano una "trappola" di sedimenti; infatti il fondo piano è costituito da depositi colluviali o lacustri. I versanti possiedono un'inclinazione di circa 30° e il profilo trasversale ha una forma ad "U" molto svasata e larga. L'allargamento per corrosione alla

base dei versanti è un fenomeno occasionale; nella maggior parte dei casi infatti i versanti sono modellati dal colluviamento dei suoli durante i periodi freddi. Spesso presentano il fondo costituito da superfici piane di calcare che sono superfici strutturali.

4.5.3.2 A: IDROLOGIA

Quasi tutti i *polje* possono essere allagati in determinati periodi dell'anno o causa di piogge eccezionali. Il periodo di allagamento e la sua durata dipendono dalle condizioni climatiche e dal grado di apertura delle fessure carnificate del calcare o dei sistemi carsici presenti.

L'idrologia del *polje* è molto complessa e diversificata a causa anche delle diverse condizioni strutturali presenti nel territorio. A seconda del tipo o dell'assenza di inondazioni i *polje* possono essere distinti in:

- *Polje* secchi, ossia mai inondati
- *Polje* periodicamente allagati
- *Polje* sempre allagati

Nel caso in cui il drenaggio sotterraneo non sia sufficiente, il *polje* tende ad allargarsi.

Se vi sono più *polje* in una stessa area a quote però diverse, è più probabile che i *polje* più alti risultino i più secchi. In alcuni casi sono presenti rilievi residuali che emergono dal fondo allagato detti *hum*.

L'allagamento del *polje* è dovuto in generale a precipitazioni e a corsi d'acqua ma non è raro che siano dovuti a sorgenti ai piedi dei versanti. Nei *polje* l'acqua viene drenata per via sotterranea attraverso degli inghiottitoi detti *ponor*. I *Ponor* possono svolgere sia la funzione di assorbimento delle acque sia quella di emittente, nel caso in cui esso svolga entrambe le funzioni prende il nome di *Estavelle*. L'allagamento può avvenire dunque non solo per piogge meteoriche straordinarie che causano l'incapacità dei *ponor* di assorbire tutte le acque, ma anche perché essi cambiano la loro funzione da assorbente ad emittente.

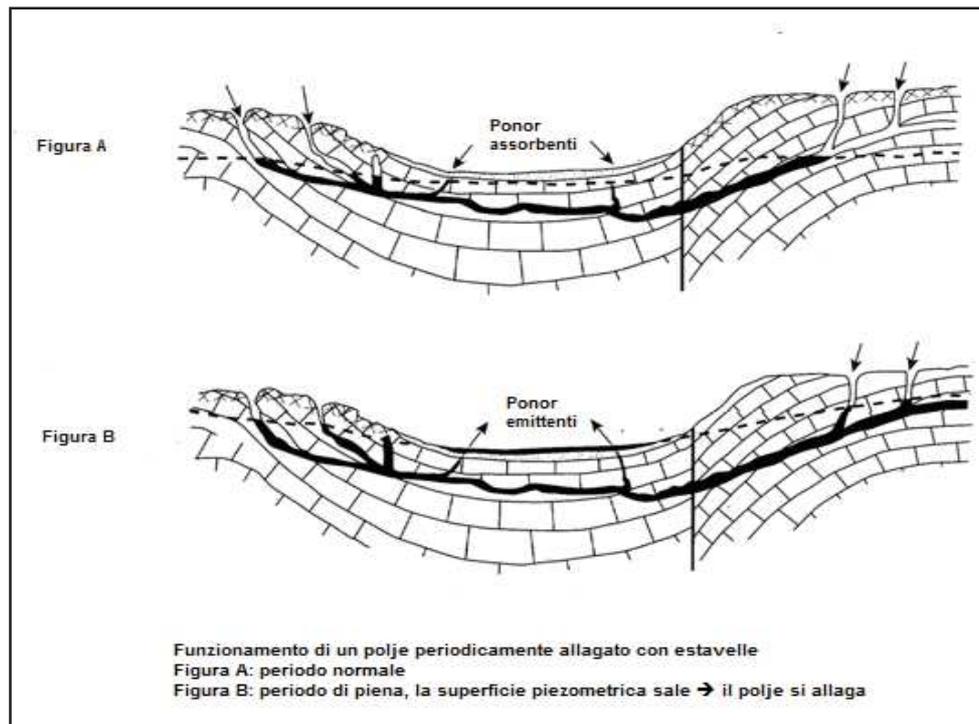


Figura 4.77 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

4.5.3.2 B: CLASSIFICAZIONE

Esistono diverse classificazioni dei *polje*. In Appennino ad esempio Lehmann ha distinto:

- **Polje sulle superfici di erosione alte:** formati indipendentemente da precedenti sistemi vallivi
- **Polje vallivi:** formati su precedenti sistemi vallivi
- **Semipolje:** presentano un fianco sviluppato in rocce impermeabili non carsificabili

Un'altra classificazione molto diffusa è quella di Gams, che classifica *ipolje* basandosi sulla idrologia:

- **BorderPolje:** localizzato al contatto con rocce impermeabili dalle quali riceve acqua. Il fondo piano tronca in parte le rocce carbonatiche ed è coperta da un sottile spessore di alluvioni. L'acqua successivamente si perde in un *ponor*.
- **Piedmontpolje:** una valle fluviale normalmente posizionata a valle di una occupata da un ghiacciaio dal quale derivano gran parte dei depositi quaternari.
- **Peripheralpolje:** bacino chiuso che riceve acque da una vasta area di rocce impermeabili drenate radialmente da *ponor*.
- **Overflowpolje:** vasta depressione chiusa con rocce impermeabili che formano una barriera idrologica alle acque che emergono dalla sorgente poste ad un lato del *polje*, scorrono sopra le rocce impermeabili e vengono inghiottite da *ponor* posti all'altro lato del *polje*.

- **Baselevelpolje:** il fondo è completamente in rocce carbonatiche, ma è posto nella zona epifreatica (sopra il livello dell'acqua) e di conseguenza è inondato quando la superficie del livello dell'acqua sale.

Tale classificazione non è però da considerarsi significativa in quanto tutti i *polje* sono di tipo strutturale e quindi risulta inutile fare una categoria a parte basata unicamente sull'idrologia, inoltre il rapporto tra rocce impermeabili e *ponor* è troppo variabile per permettere una corretta classificazione.

La classificazione definitiva divide in *polje* in due sole categorie:

- ***polje* completamente circondati da rocce carbonatiche:** in cui le rocce impermeabili sono limitate unicamente al fondo del *polje* e sono generalmente (ma non sempre) *polje* chiusi.
- ***Borderpolje:*** a contatto tra rocce carbonatiche e rocce impermeabili, formatesi per corrosione differenziale, sono generalmente aperti.

4.5.3.3 Valli Carsiche

Le valli sono il risultato dell'azione dell'acqua che scorre sulla superficie e quindi principalmente da processi fluviali. Come illustrato nei capitoli precedenti il carsismo è caratterizzato dal drenaggio sotterraneo delle acque, quindi parlare di valli carsiche potrebbe sembrare un controsenso, tuttavia le valli presenti su territori carsici offrono caratteristiche peculiari tali da giustificare il termine.

Quando si parla di valli carsiche è bene tenere presente che spesso in molte aree l'organizzazione e lo sviluppo di un carsismo sotterraneo precede la formazione delle valli fluviali. Si riconoscono normalmente i seguenti tipi di valli carsiche:

- **Valli cieche:** vengono così denominate per la loro caratteristica morfologia in quanto tali valli risultano chiuse nella parte a valle. Sono forme presenti su plateau o in regioni collinari, poiché in montagna la circolazione delle acque nei calcari è prevalentemente verticale. In un plateau i calcari assorbono facilmente le acque dei fiumi che finiscono per seccare. I corsi d'acqua attraversano in genere il carso per una certa distanza prima di scomparire dalla superficie. Il letto del corso d'acqua viene perciò interessato da una serie di inghiottitoi assorbente. Questi corsi terminano spesso contro una parete di roccia calcarea alla cui base una grotta assorbe tutte le acque e il fiume scompare. La valle cieca continua ad approfondirsi nella parte a monte su rocce impermeabili divenendo così più bassa del plateau carbonatico alla cui base viene assorbito.
- **Valli chiuse:** sono valli a canyon chiuse a monte da un anfiteatro di rocce. Sono in genere in relazione con una grossa sorgente che scaturisce ai piedi dell'anfiteatro. Sono localizzate nella parte superiore di un'area carsica e a differenza delle valli cieche l'acqua anziché entrare nel sottosuolo ne esce. Presentano un fondo piatto o a forma di U con versanti molto ripidi. Normalmente la sorgente è legata ad un

sistema carsico e può accadere che al di sopra dell'anfiteatro la valle chiusa prosegua come valle secca crivellata da doline. Sono stati proposti due diversi modelli di genesi delle valli chiuse: la prima sostiene che siano il frutto di una regressione della sorgente, lo spostamento porterebbe infatti la fonte verso monte a causa di un eventuale franamento della parete sovrastante; la seconda invece si basa sull'evidenza che le valli chiuse sono localizzate soprattutto intorno al mar Mediterraneo, è stato dunque proposto che in origine queste valli fossero originariamente valli cieche e la grotta-sorgente fosse in precedenza un inghiottitoio, il disseccamento del mar mediterraneo avrebbe dunque invertito la loro funzione da inghiottitoio a sorgente.

- **Valli secche:** sono valli in cui non è più presente un corso d'acqua vengono per questo anche chiamate valli morte. Sono le valli più numerose presenti in territorio carsico. Presentano versanti blandi e fondo piatto oppure a U su cui possono essere presenti doline disposte in serie. In calcari ben fratturati sono più incassate che in calcari a strati sottili.

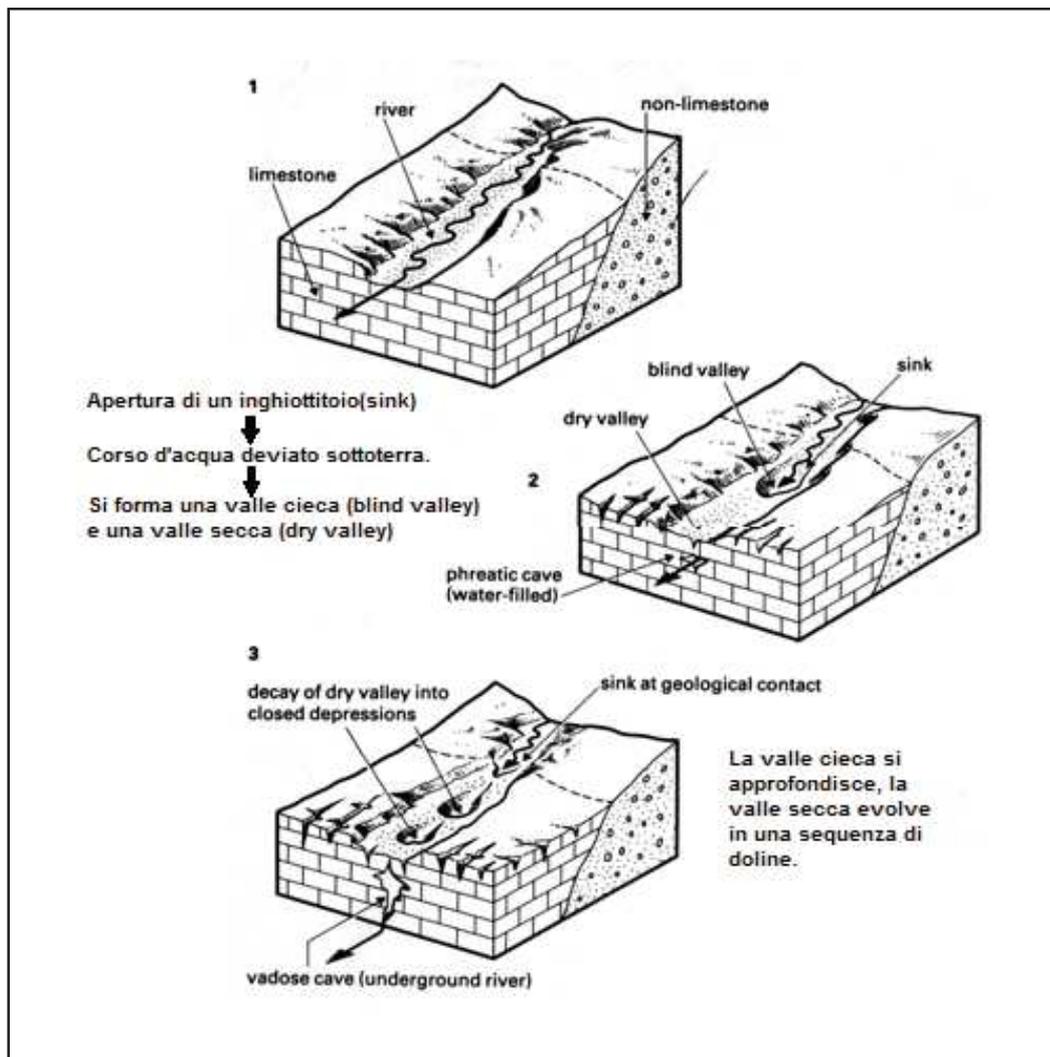


Figura 4.78 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.

- **Valli chiuse:** sono valli a canyon chiuse a monte da un anfiteatro di rocce. Sono in genere in relazione con una grossa sorgente che scaturisce ai piedi dell'anfiteatro. Sono localizzate nella parte superiore di un'area carsica e a differenza delle valli cieche l'acqua anziché entrare nel sottosuolo ne esce. Presentano un fondo piatto o a forma di U con versanti molto ripidi. Normalmente la sorgente è legata ad un sistema carsico e può accadere che al di sopra dell'anfiteatro la valle chiusa prosegua come valle secca crivellata da doline. Sono stati proposti due diversi modelli di genesi delle valli chiuse: la prima sostiene che siano il frutto di una regressione della sorgente, lo spostamento porterebbe infatti la fonte verso monte a causa di un eventuale franamento della parete sovrastante; la seconda invece si basa sull'evidenza che le valli chiuse sono localizzate soprattutto intorno al mar Mediterraneo, è stato dunque proposto che in origine queste valli fossero originariamente valli cieche e la grotta-sorgente fosse in precedenza un inghiottitoio, il disseccamento del mar mediterraneo avrebbe dunque invertito la loro funzione da inghiottitoio a sorgente.
- **Canyon:** dipendono da corsi d'acqua provenienti da terreni non carbonatici; entrando in zona calcarea il fiume perde il suo carico solido diventando particolarmente limpido. A differenza dei canyon presenti su altre litologie in questo caso i versanti si conservano in quanto le acque si infiltrano per carsismo eliminando l'effetto di ruscellamento e i conseguenti movimenti franosi preservando quindi i versanti. il fondo contiene scarsi depositi alluvionali ed è ricco di grandi cavità isolate. Attraverso i calcari il fiume perde acqua e quindi la parte a valle potrebbe risultare secca. Canyon e sistemi sotterranei evolvono separatamente, ma il livello di base del canyon è governato dal livello della falda carsica. Caratteristici delle pareti sono: le entrate a portico delle grotte, le nicchie, le anse di meandro sospese e resti di grandi cavità.

4.5.3.4: Campi Solcati o Karren

- **Scannellature (*rillenkarren*):** piccoli solchi rettilinei profondi meno di 1 cm, larghi da 1 a 4 cm e lunghi massimo 20cm, presentano un fondo arrotondato separato da creste affilate. La lunghezza dipende dall'inclinazione della superficie su cui si sviluppano. Si trovano solo su superfici nude. Si dipartono sempre da zone dove l'acqua piovana forma filetti di corrente che scivolano lungo la superficie di massima pendenza. Per quanto riguarda l'origine di tali morfologie si ritiene che il principale agente sarebbe l'acqua piovana che genera i solchi per corrosione.

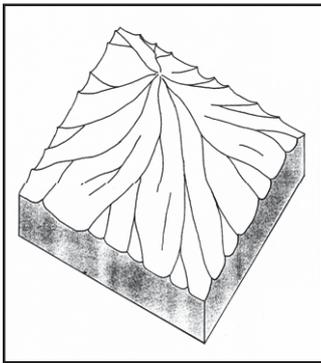


Figura 4.79 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.80 Bergamo, Presolana. Fotografia di A. Bini.

- **Solchi a doccia:** sono solchi larghi e profondi 40/50cm e lunghi fino a 15/20m che seguono la massima pendenza delle superfici rocciose.

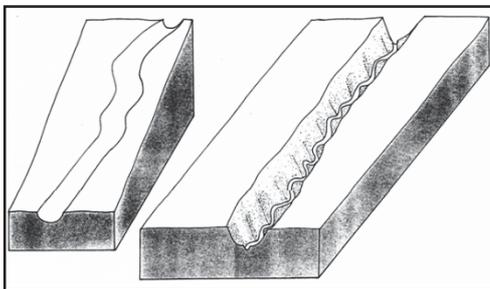


Figura 4.81 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.82 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Impronte di passi:** piccole conche aperte verso valle, più che larghe che lunghe, con dimensioni da 5 a 30cm. Presentano un fondo piatto semicircolare o ellittico orizzontale, raccordato a monte ad un versante ripido. Due impronte contigue generano una cresta aguzza.

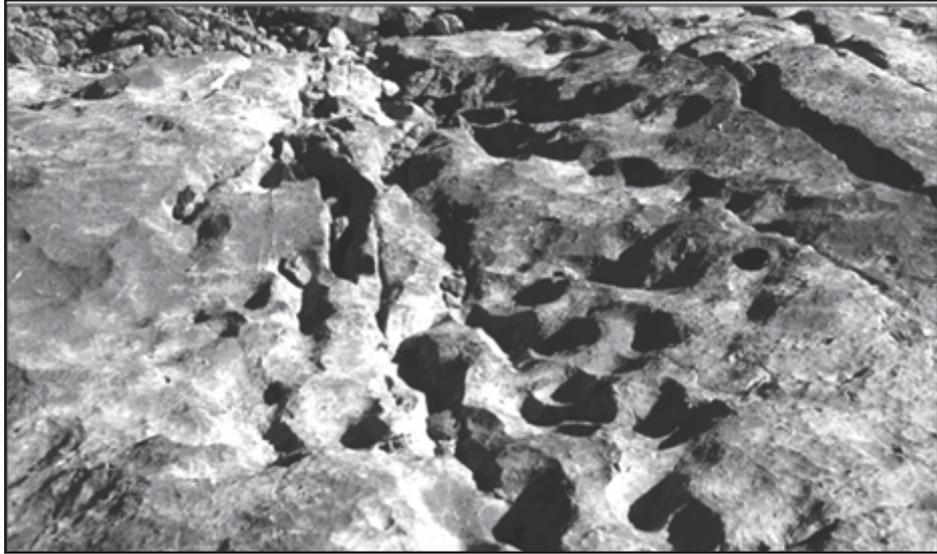


Figura 4.83 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Lame dentate:** si generano su pareti con inclinazione maggiore di 50° . Iniziano con un piccolo ripiano orizzontale largo pochi centimetri a cui segue una piccola cresta. La genesi potrebbe essere legata alla presenza di neve la quale fondendo formerebbe un velo d'acqua che scorre lungo le pareti.

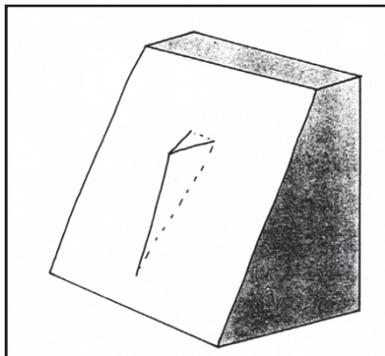


Figura 4.84 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.85 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Alveoli:** cavità emisferiche o irregolari molto ravvicinate al punto di diventare coalescenti e lasciare sottili diaframmi o formare un intricato reticolo di piccoli vuoti. Si formano su pareti di tipo irregolare.

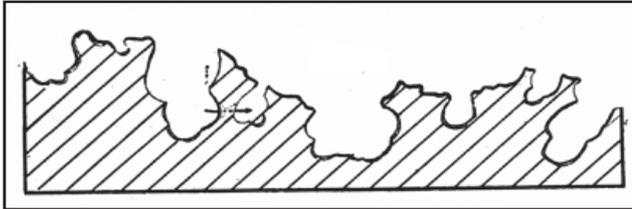


Figura 4.86 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.87 Fotografia di A. Bini.

- **Fori carsici:** cavità tubolari, verticali a sezione circolare od ellittica di dimensione centimetrica. Si prolungano verso il basso sino ad un vuoto sottostante costituito da una cavità planare. Il foro evolve rapidamente poiché inghiotte acqua di tipo meteorico. Si generano partendo dall'interno della roccia evolvendosi poi sino alla superficie.



Figura 4.88 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Crepacci carsici:** si generano quando i fori carsici sono talmente fitti da generare un unico crepaccio. Ciò può accadere sia per allargamento dei fori stessi sia per corrosione ad opera delle acque che scorrono in superficie, ma anche rilascio tensionale in rocce bene stratificate.

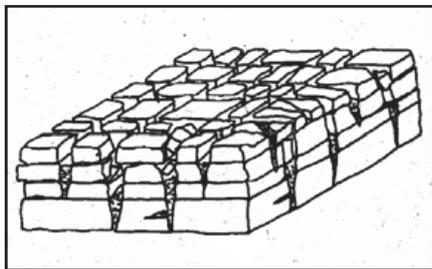


Figura 4.89 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.90 Bergamo, Presolana. Fotografia di A. Bini.

- **Vaschette di corrosione:** piccole conche chiuse di forma generalmente tondeggianti, con diametro da pochi centimetri ad alcuni metri. L'acqua nelle vaschette ristagna a lungo dopo la pioggia, provocandone un approfondimento. Si osservano su superfici nude, pianeggianti o poco inclinate con fondo orizzontale.



Figura 4.91 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Cavità planari sub orizzontali:** cavità sviluppate lungo piani di discontinuità sub orizzontale, rappresentati in genere da giunti di strato. Possono costituire un reticolo di piccole condotte lamellate collegate da fori e crepacci. Svolgono funzioni di assorbimento delle acque oppure di emissione.

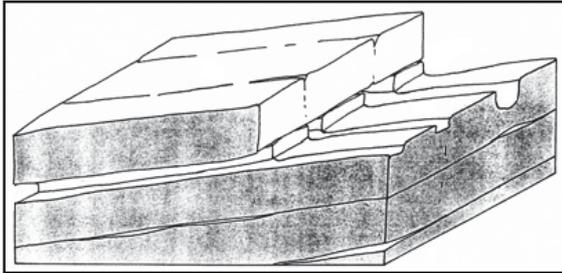


Figura 4.92 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.93 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

- **Karren a punte:** famiglia eterogenea di guglie, punte e piccoli pinnacoli. Possono formarsi per coalescenza di altre forme di *karren* o per semplice corrosione selettiva della superficie.



Figura 4.94 Lecco, Artavaggio. Fotografia di A. Bini.

- **Grize:** campi di blocchi e massi corrosi in posto, ma completamente staccati per dissoluzione chimica lungo la discontinuità di roccia.

- **Blocchi pedunculati:** si tratta di blocchi deposti, in genere come massi erratici di trasporto glaciale, su una superficie carnificata. La presenza del blocco impedisce o rallenta la corrosione della roccia sottostante, per cui tale porzione rimane in rilievo rispetto alla roccia circostante non protetta, formando un peduncolo che regge il blocco stesso.

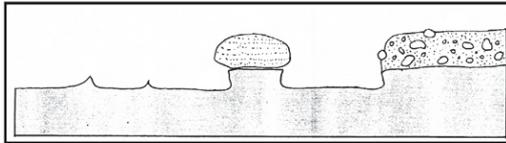


Figura 4.95 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.96 Dolomiti. Fotografia di A. Bini.

- **Karren arrotondati:** si formano sotto un suolo a chimismo acido, caratterizzati da forme arrotondate e divengono visibili solo quando viene asportata la copertura di suolo. Gli arrotondamenti sono dovuti a corrosione incanalata in rivoli e acque di imbibizione dei suoli (assorbimento di un liquido da parte di un solido). Sono forme del cosiddetto carso coperto (CRIPTOCARSO).



Figura 4.97 Dolomiti. Fotografia di A. Bini.

- **Bogaz:** forre a pareti verticali di dimensioni molto variabili. Sono frequenti in zone fortemente carsificate. Il fondo può essere piatto, corrispondente ad un giunto di strato oppure irregolare e coperto da detriti di crollo. Derivano da allargamento di crepacci carsici per corrosione carsica e disgregazione da gelo della roccia, oppure per crollo della volta di grotte, o si possono formare direttamente lungo le fratture sotto la copertura di suolo. Non sono in ogni caso dovuti a corsi d'acqua.

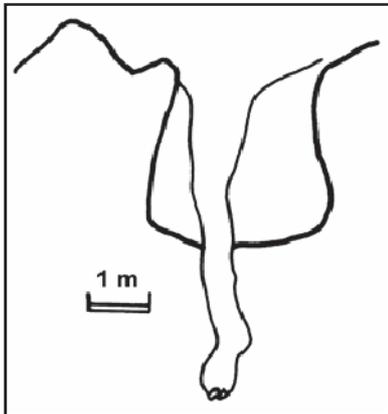


Figura 4.98 tratta dalle dispense del corso di Geomorfologia di A. Bini.



Figura 4.99 Lecco, Grigna Settentrionale. Fotografia di A. Bini.

4.6. GEOMORFOLOGIA DI NEMBRO

4.6.1 Inquadramento territoriale

Nembro si trova situato nella media Val Seriana, a circa 9 km da Bergamo, occupando grazie alla frazione di Gavarno, entrambi i versanti orografici del fiume Serio.

Il comune confina a valle con i comuni di Alzano Lombardo e Villa di Serio, a monte con il comune di Albino, a nord con i comuni di Zogno e Selvino, a sud con i comuni di Pradalunga e Scanzorosciate.

Nembro al suo interno è suddiviso inoltre in varie frazioni: sul versante orografico sinistro del Serio è presente La frazione di Gavarno, mentre salendo di quota si incontrano le frazioni di Lonno e Salmezza nella valle del Luio, Trevasco e San Vito nella valle del Carso.

Il corso d'acqua principale è il fiume Serio, che taglia longitudinalmente il territorio, con diversi affluenti dalla sponda destra (partendo da monte ci sono i torrenti Carso, Lonzo e Luio) e uno solo dalla sponda sinistra (il torrente Gavarnia).

I principali rilievi che caratterizzano il territorio nembrese si trovano tutti sul versante orografico destro e sono il m. Cereto, Il m. Valtrusa, il m. Podone, (i Corni di Lonno, la Corna Bianca che sono preceduti verso il fiume Serio da una serie di colli (Altopiano di Piazza, di S. Pietro, Botta, Bastia, Zuccarello, m. Ganda).

4.6.2 Carta geomorfologica

La carta geomorfologica di Nembro è stata redatta a cura del Geologo Sergio Ghilardi. Per usufruirne si possono consultare gli allegati **3** e **4**.

4.6.3 Morfologie presenti a Nembro



Figura 4.100 Veduta del paese di Nembro da Pradalunga. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.101 Veduta della valle del Luio da Lonno. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.102 Monte Cereto. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.103 Frana presso le cave di Trevasco. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.104 Val Brughere (monte Cereto). Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.105 Pozza nel Carso nella zona vicino a Trevasco e San Vito. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.106 Esempio di “sciabolatura” di un tronco d’albero dovuto al creep presso il torrente Carso. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.107 Vista del fiume Serio dal ponte della pista ciclabile. Fotografia di A. Pezzotta.



Figura 4.108 Barra fluviale nel fiume Serio e affioramento sul quale è stata depositata. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.109 Vista del fiume Serio presso il ponte Romano. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.110 Terrazzo fluviale presso Crespi. Fotografia di A. Pezzotta.



Figura 4.111 Deposito fluviale presso Crespi. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.112 Segni di stratificazione nel terrazzo fluviale presso Crespi. Fotografia di A. Pezzotta.



Figura 4.113 Deposito fluviale presso Crespi. Fotografia A. Pezzotta.



Figura 4.114 Deposito fluviale presso la “miniera” in via Lonzo. Fotografia di G. Comotti

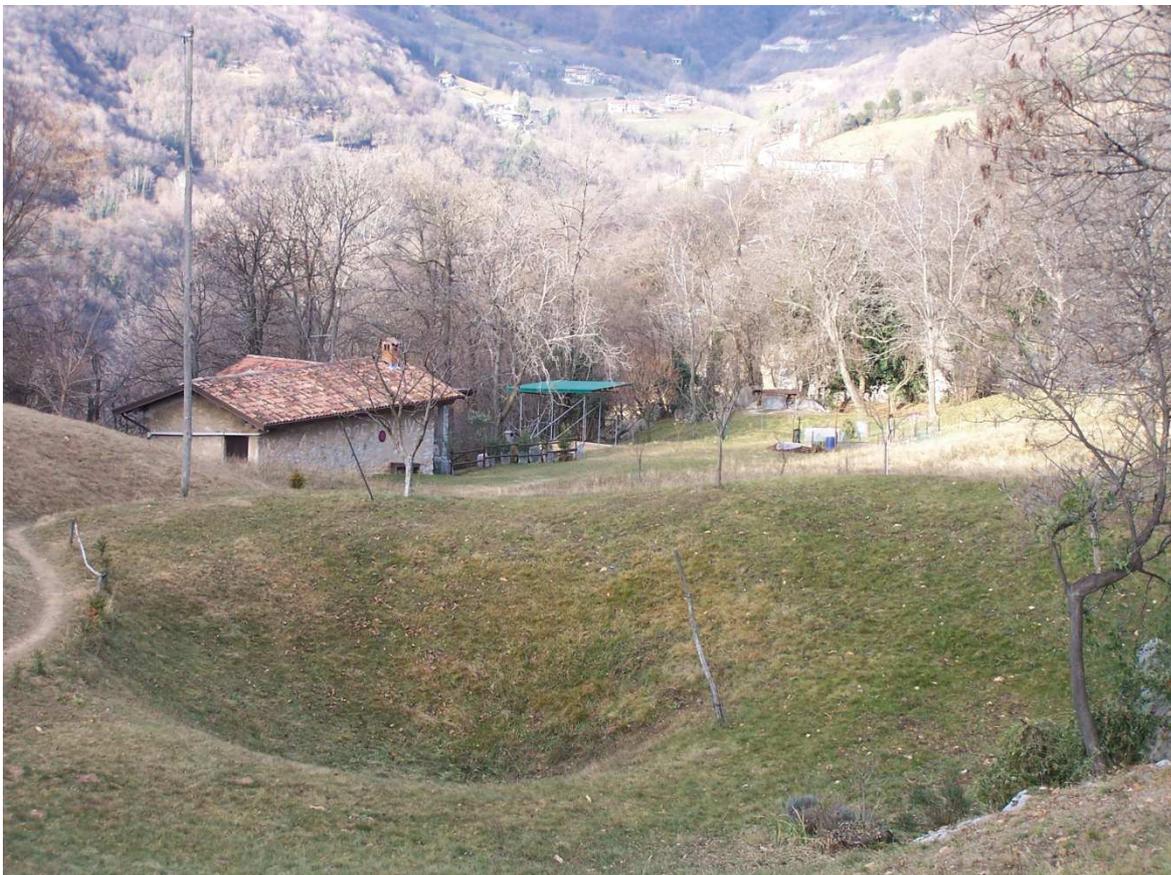


Figura 4.115 Piazza. Dolina presso la cava Cugini. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.116 Piazzo. Dolina di crollo. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.117 Gavarno, Buca della Pecora – Ingresso. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.118 Gavarno, Buca della Pecora – Concrezioni calcaree a vela presenti sulla volta. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.119 Gavarno, Buca della Pecora – Concrezioni calcaree su stalattiti. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.120 Gavarno, Buca della Pecora – Pisoliti vadose. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.121 Gavarno, Buco del Podona – Ingresso. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.122 Gavarno, Buco del Podona – Concrezioni. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.123 Gavarno, Buco del Podona – Concrezioni su parete. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.124 Gavarno, Buco del Podona – Colata calcarea. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.125 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Ingresso. Fotografia di G. Comotti.

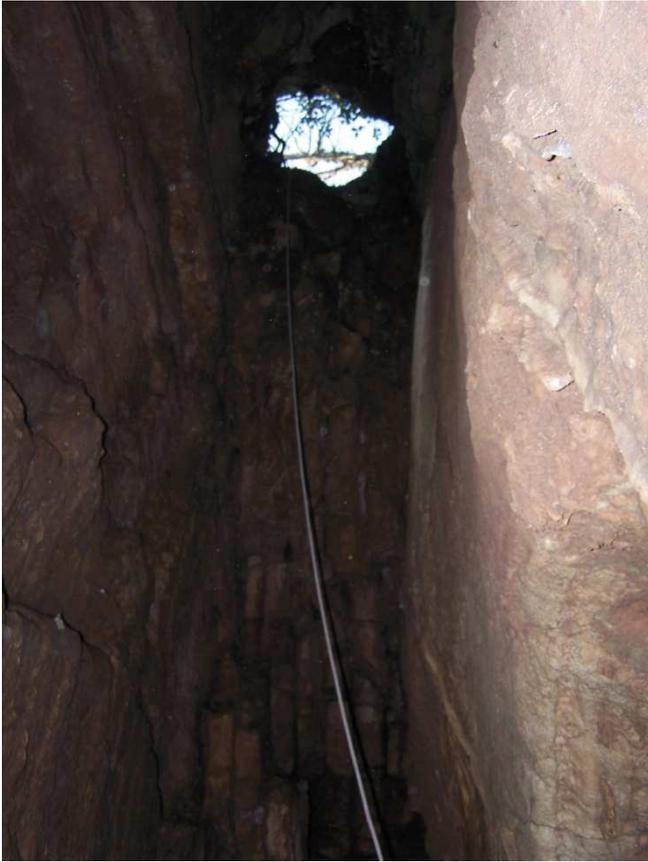


Figura 4.126 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Ingresso. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.127 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Stalattiti spezzate su cui poi sono cresciute altre. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.128 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Probabile piega nella stratificazione visibile all'interno. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.129 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Stalattite eccentrica. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.130 Monte Valtrusa, Laca de Altrusa – Percolazione che sta generando una stalattite. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.131 San Vito, Grotta nel travertino – Ingresso. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.132 San Vito, Grotta nel travertino – Colate di travertino. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.133 San Vito, Grotta nel travertino. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.134 San Vito, Grotta nel travertino. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.135 Lonno, zona in cui è presente carsismo superficiale. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.136 Lonno, Vaschetta di corrosione. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.137 Lonno, Karren. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.138 Lonno, Karren. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.139 Lonno, Karren a punte. Fotografia di G. Comotti.



Figura 4.140 Lonno, impronte di passi e Karren. Fotografia di G. Comotti.

BIBLIOGRAFIA

Giovanbattista Castiglioni, 1992

Geomorfologia

Alfredo Bini, 2010, 2013

Dispense del corso di Geomorfologia
presso l'Università degli Studi di Milano

Mauro Cremaschi, 2016

Dispense del corso di Geomorfologia
presso l'Università degli Studi di Milano

Sergio Ghilardi, 2001

“Relazione Tecnica - Indagini geologiche
di supporto al piano regolatore generale ai
sensi della l.r. 41/97”