

CENNI DI CARSOGENESI

a cura di **Franco Cucchi**, Dipartimento di Scienze Geologiche, Ambientali e Marine, Università di Trieste

Carsologia è il nome della disciplina scientifica che affronta lo studio degli ambienti carsici; *fenomeno carsico* è l'espressione morfologica delle molteplici risultanze dell'attacco e della dissoluzione delle rocce carbonatiche per via chimica, con meccanismi che vanno sotto il nome di *corrosione carsica*.

Il termine *carso* prende origine dal nome della regione geografica del Carso di Trieste, territorio che per primo fu analizzato dagli studiosi di carsologia in quanto particolarmente significativo e preso come riferimento assoluto e perciò chiamato anche "Carso classico". A sua volta il toponimo prende origine dalla radice paleoindoeuropea *kar*, che significa "roccia" o "pietra".

Sulla superficie terrestre affiorano con abbondanza rocce carbonatiche (i calcari e le dolomie costituiscono circa un quarto delle terre emerse), tutte più o meno carsificabili.

Dal punto di vista chimico, la corrosione è un fenomeno che avviene in un sistema a tre fasi (gas + liquido + solido) e consiste nella messa in soluzione di roccia da parte dell'acqua (di pioggia, di ruscellamento superficiale, di percolazione attraverso il suolo e le fratture della roccia, del mare) facilitata dal fatto che le acque vengono acidificate dalla anidride carbonica proveniente dall'aria e dal suolo.

La solubilità delle rocce carbonatiche è minima, oltre che molto lenta: l'abbassamento medio di una superficie calcarea come quella del Carso Triestino nelle condizioni meteorologiche attuali è di 0,025 mm/anno e quindi ci vogliono circa 10.000 anni per apprezzare sensibilmente le modificazioni indotte dal carsismo sulle superfici rocciose. E ci vogliono almeno 50.000 anni per consentire un rapido deflusso delle acque all'interno della massa rocciosa.

Le morfologie carsiche epigee

Anche se sono espressione dello stesso fenomeno e sono strettamente collegate e dipendenti, si suole distinguere le *forme carsiche epigee*, o superficiali, da quelle *carsiche ipogee*, o profonde.

Il paesaggio carsico è contraddistinto dalla presenza di roccia affiorante, o subaffiorante, elaborata da morfotipi spesso caratteristici e per la scarsità o l'assenza di reticoli fluviali. Infatti normalmente le acque scorrenti in superficie vengono catturate in *punti idrovori* o in *inghiottitoi* e convogliate all'interno della massa rocciosa carsificata.

La macroforma tipica di questo paesaggio è la *dolina*.

Le doline (termine internazionale derivato dalla lingua slovena) sono depressioni chiuse, a corona subcircolare o subellittica, solitamente più larghe che profonde. Le dimensioni sono estremamente variabili (da pochi metri ad alcune centinaia di metri di larghezza, per profondità da pochi metri ad alcune decine di metri). Il fondo può essere coperto da depositi fini (residuo di quanto non disciolto o di quanto "intrappolato" nella dolina) e/o da materiale grossolano (frammenti di roccia mobilizzati e franati dai fianchi). I fianchi hanno acclività e morfologia collegate alle caratteristiche litologico-strutturali del substrato roccioso. Dimensioni, fondo e fianchi, definiscono forme la cui genesi è legata ad assorbimento localizzato (praticamente puntiforme o da punti vicini e concentrati) di acque, con un successivo allargamento radiale per corrosione accelerata.

Particolari macromorfotipi sono le *doline di crollo*, depressioni che si generano per fenomeni di collassamento dei soffitti di cavità prossime alla superficie. Hanno forma solitamente circolare a pozzo, pareti subverticali e sul fondo si rinvengono depositi

grossolani di crollo; possono naturalmente evolvere verso forme più ampie e dai fianchi meno acclivi.

Molti tipi di paesaggio e numerose altre forme carsiche sono il risultato dell'azione combinata, nel tempo e nello spazio, del processo carsico e di altri processi. La combinazione favorisce lo sviluppo di forme miste, spesso influenzate anche dai processi eolici, marini, fluviali, glaciali, periglaciali (e quindi dalle caratteristiche climatiche), oltre che dalle particolari condizioni litologiche e geologico-strutturali.

Fra queste forme "miste" merita ricordarne alcune particolarmente interessanti: i polje, le valli cieche, le città di roccia, le forre carsiche, le conche glaciocarsiche.

I *polje* sono grandi depressioni chiuse di origine mista carsica e litologico-strutturale, con dimensioni talvolta fino a decine di chilometri. Sono macroforme allungate, da mettere in relazione a strutture tettoniche (faglie o assi di pieghe): i fianchi sono ripidi, acclivi o comunque non raccordati al fondovalle; il fondovalle è piatto, roccioso, spesso coperto da deboli depositi argilloso-alluvionali. Il fondo, o le fasce di raccordo con i fianchi, sono spesso caratterizzati da piccole depressioni allagate, da sorgenti e/o da inghiottitoi, che a loro volta possono funzionare anche da sorgenti e sono detti *inversac*.

Le *valli cieche* sono forme miste fluvio-carsiche, sono cioè valli fluviali lungo il cui corso si sono aperti uno o più inghiottitoi: a monte di questi l'incisione continua ad approfondirsi, a valle non c'è più acqua scorrente e quindi si genera una *valle secca*. L'area intorno all'inghiottitoio si evolve come una dolina, il resto del bacino di alimentazione come una valle fluviale.

Fra le forme carsiche miste possono anche essere inserite le *forre carsiche*, profonde incisioni alle quali mancano corsi d'acqua laterali che addolciscono i rilievi, e le cosiddette *città di roccia*, ampie aree o tavolati da cui si ergono, per alcuni metri, blocchi carbonatici ben definiti ed isolati, detti *hum* quando sono di grandi dimensioni. Per estensione si può parlare di città di roccia anche nel caso di estese aree in cui l'incarsimento e l'erosione hanno lasciato isolati, funghi, blocchi carbonatici, piccoli rilievi, colline.

Le *conche glaciocarsiche* sono conche montane chiuse, evolutesi sia per dissoluzione come le doline, sia per l'azione di esarazione di un ghiacciaio o di un nevaio.

Numerose sono le piccole forme (*Karren*, in senso lato ed in lingua tedesca), originate sulle superfici carsificabili direttamente esposte agli agenti atmosferici o coperte da suoli. Esse sono legate o alla dissoluzione attiva delle acque scorrenti sui fianchi rocciosi più o meno acclivi (*solubilità dinamica*) o alla dissoluzione statica delle acque stagnanti nelle depressioni (*solubilità statica*).

Si riconoscono:

- le *scannellature* (in tedesco *Rillenkarren*, in inglese *solution flutes*), forme minute rappresentate da solchi rettilinei (profondi circa 1 cm, larghi 1-4 cm, lunghi 5-50 cm) a sezione arrotondata. In genere sono riunite in complessi (a *pettine*, a *penna*, a *fascio*, a *isola*), sono separate da una "crestina" aguzza che funge da spartiacque e sono tipiche di superfici mediamente o poco inclinate.

La genesi va ricondotta alla corrosione da parte delle acque piovane su roccia calcarea per solubilità dinamica lungo linee di massima pendenza. A valle delle scannellature si trovano spesso superfici lisce che corrispondono alle zone dove l'acqua forma, per unione dei diversi filetti idrici, un velo continuo che scorre più lentamente in modo omogeneo senza variazioni laterali di velocità, quasi con moto laminare.

- i *solchi carsici* (in francese *lapiès*, in tedesco *Rinnenkarren* o *Wandkarren* a seconda della morfologia, in inglese *solution grooves*), sono solchi larghi più di 5 cm, profondi più di 3 cm, lunghi almeno 100 cm, che seguono la massima pendenza della superficie calcarea.

Hanno morfologia varia: la sezione è sempre ad U, ma i fianchi possono essere più o meno acclivi e gli spartiacque più o meno aguzzi. Lo sviluppo è tanto rettilineo che tortuoso o ad anse meandriformi, il fondo è liscio, talora incavato al centro da un solco secondario. Il profilo longitudinale è talvolta caratterizzato da un andamento a gradini per la presenza di piccole conche (quasi delle "mini marmitte" fluviali).

Si tratta di "grondaie", la cui genesi è legata allo scorrere con andamento lineare delle acque di ruscellamento, per cui la morfologia dipende dall'inclinazione della superficie, dal regime idraulico, dalla presenza di organismi vegetali e/o di suolo, dal tipo di clima: sono il classico effetto di quella che viene definita *corrosione accelerata*. Talora si sviluppano sotto copertura di suolo (si parla allora di *carsismo sottocutaneo*): sono più distanziati e hanno forma più arrotondata.

- le *vaschette di corrosione* (internazionalmente definite con il termine sloveno *kamenitza*, in tedesco *Napfkarren*, in inglese *solution pan* o *corrosion cup*), piccole conche chiuse (profondità da 2 a 50 cm, larghezza da 5 a 200 cm), tondeggianti, di diametro variabile, poco profonde rispetto le dimensioni areali. Il fondo è quasi sempre orizzontale, la sezione è a piatto o a scodella allargata verso il basso. Spesso hanno un *canale emissario di scarico*, e talvolta anche, specie se evolutesi lungo fratture, un limitato *bacino di impluvio*.

La genesi è legata allo stagnare dell'acqua in una microdepressione, talvolta originata o favorita da fitocarsismo. Se nella depressione permangono depositi e/o sostanze organiche, anche durante le fasi di svuotamento si possono generare delle tasche di approfondimento per carsismo sottocutaneo. Le vaschette si allargano più velocemente di quanto si approfondiscano in quanto la corrosione è più attiva ai bordi che sul fondo: spesso così si creano, alla base delle pareti, delle nicchie aggettanti, quasi dei "solchi di corrosione" simili ai solchi di battente marini.

- gli *alveoli di corrosione*, piccole (da 2-3 mm a 2-3 cm) concavità dai bordi acuti, generatesi per dissoluzione puntiforme (spesso favorita da attività biologica fitocarsica).

- i *fori di dissoluzione*, micropozzi, piccole cavità tubolari a sezione circolare o ellittica, di diametro da millimetrico a decimetrico, quasi trapananti la roccia e formati in corrispondenza di fratture. La genesi è da ricondurre a fenomeni di dissoluzione lungo canalicoli impostati in fratture: l'allargamento progredisce inizialmente dal basso verso l'alto per fenomeni di capillarità e poi per circolazione d'acqua e d'aria umida.

- i *crepacci carsici* (in tedesco *Kluftkarren*, in inglese *grikes*, in francese *lapiés de diacalse*), fratture profonde, incarsite, raramente legate ad anastomosi di fori, più spesso delle vere vie di deflusso preferenziale delle acque guidate dalla fratturazione. I fianchi sono sempre molto inclinati, il fondo è piatto o a V aperta verso l'alto. Dal punto di vista genetico sono simili ai solchi carsici; tuttavia, mentre nei solchi è la massima pendenza a guidare il defluire delle acque, nei crepacci sono i piani di discontinuità (normalmente quelli di frattura) a condizionare la direzione del movimento.

- le *grize*, pietraie date da blocchetti di roccia staccati dal substrato roccioso per carsismo lungo le superfici di discontinuità (stratificazione e fratturazione) e isolati in posto, senza aver subito trasporto.

- i campi carreggiati o *campi solcati* (*Karrenfeld* in tedesco, *lapiés* in francese) aree in cui sugli affioramenti rocciosi sono presenti in associazione più morfotipi quali solchi, scannellature, crepacci, vaschette, fori, ecc.

Le morfologie carsiche ipogee

L'analisi delle morfologie carsiche profonde non può prescindere dalla conoscenza delle fasi evolutive del massiccio o dell'area carsica in cui esse sono presenti. Questo in quanto i morfotipi ipogei sono il prodotto delle diverse situazioni idrologiche in cui si sono trovati nel tempo i volumi rocciosi carsificati.

Attraverso le superfici di discontinuità (siano esse piani di strato, faglie o fratture) e/o attraverso le porosità della roccia (siano esse primarie o secondarie) l'acqua penetra dalla superficie nell'interno della massa rocciosa e, tramite percorsi più o meno articolati e veloci, si trasferisce al livello di base e da lì ai punti di risorgenza.

L'evoluzione del reticolo ipogeo segue regole non univoche e modalità complesse, secondo processi non ancora noti nei dettagli anche perchè troppi sono i fattori che intervengono nella caratterizzazione dell'evoluzione. Ad un inizio quasi casuale della geometria delle linee di penetrazione delle acque nel sottosuolo, segue la formazione delle prime *protocavità* che si sviluppano con modalità *a casualità guidata* dalla geologia. In tempi che hanno in 10.000 anni l'unità di misura, segue l'allargamento preferenziale dei tratti di condotta idrica con sbocco all'esterno (quelli cioè in grado di richiamare per deflusso più acqua) e poi lo sviluppo vero e proprio, figlio di molteplici fattori fra cui prevalgono quelli geologici e quelli climatici.

In spazi temporali diversi, ma sempre in tempi che hanno come ordine di grandezza ed unità di misura le decine di migliaia di anni dal momento in cui le acque aggrediscono la superficie esposta, in seno alle masse rocciose carsificabili si genera, per dissoluzione, un più o meno complesso reticolo di vuoti comunicanti.

Il *reticolo ipogeo* viene ad interessare due porzioni di massiccio, una sottostante l'altra: quella inferiore con i vuoti carsici completamente riempiti d'acqua (la *falda di base*) e quindi situata al di sotto della cosiddetta *superficie freatica*, quella superiore con i vuoti interessati da percolazione e riempimento d'acqua solamente durante la fase di trasferimento delle acque dalla superficie alla falda di base.

Si ha così una suddivisione del massiccio carsificato in una *zona vadosa*, o *zona di percolazione*, e in una *zona freatica*, o *zona satura*, (prendendo a prestito termini usati dagli idrogeologi per gli acquiferi porosi); fra le due zone vi è una fascia intermedia, detta *zona di oscillazione*, il cui spessore dipende dal regime idraulico locale e dal variare della superficie piezometrica in funzione della quantità d'acqua che, percolando, preme con il carico idraulico per raggiungere le sorgenti.

E' così possibile inquadrare, dal punto di vista genetico-evolutivo e descrittivo, le morfologie profonde a parità di agente genetico prevalente.

Ben si comprende come le caratteristiche litologiche (rocce più o meno o per nulla carsificabili), quelle tettoniche (pieghe, faglie, ecc.) e le discontinuità (tipologia, frequenza e assetto spaziale dei piani di separazione della massa rocciosa) condizionino in maniera determinante lo sviluppo, la forma, il numero e le dimensioni dei fenomeni carsici in profondità.

Né va dimenticata, nell'analisi delle morfologie, l'influenza sullo sviluppo del carsismo delle vicissitudini geologiche (orogenesi, eustatismo, subsidenza, modellamento superficiale) ed in particolare di quelle climatiche (temperatura, piovosità, livello dei mari) che, dati i lunghi tempi necessari alla compiuta evoluzione, sono forse le vere modellatrici dei morfotipi carsici.

Nel tempo infatti, e nelle varie condizioni geologico-strutturali succedutesi durante la carsogenesi, vanno inquadrati, analizzati e compresi quelli che sono i risultati dell'azione singola o combinata dei tre principali agenti morfogenetici ipogei:

a) l'azione delle acque scorrenti o stagnanti, in quanto capaci di corrodere la roccia creando i vuoti e/o di ridepositare roccia sotto forma di concrezione riempiendo più o meno completamente i vuoti appena creati;

b) l'azione delle acque in quanto capaci, per l'energia derivante dalla loro velocità, di erosione meccanica e quindi di creare vuoti di varie dimensioni all'interno della massa

rocciosa o dei sedimenti, di trasporto e di deposito di materiale e quindi di modifica, in positivo ed in negativo, dei vuoti;

c) l'azione della gravità, cioè del processo di modifica delle morfologie originarie tramite crolli dai soffitti e dalle pareti di porzioni di roccia o di concrezione, con l'imposizione di nuove condizioni di stabilità e quindi di nuove forme dei vuoti.

In sintesi, ogni cavità è composta da vani, le cui caratteristiche spaziali sono integrate nella realtà geologica ed evolutiva, che hanno una loro morfologia tipica e che sono interessati a loro volta da morfotipi particolari.

Nell'analisi delle morfologie giova, quindi, distinguere quelle originatesi nella *zona freatica* (anche zona dell'acqua di fondo o zona umida) dette morfologie *dirette* o *singenetiche*, da quelle originatesi nella *zona di percolazione* (anche zona secca o zona epicarsica e di assorbimento) dette morfologie *indirette* o *paragenetiche*. Le due zone sono separate dalla *zona di oscillazione* (anche zona intermedia di oscillazione della falda o zona epifreatica) in cui occasionalmente il livello di base carsico si innalza ed in cui le morfologie che si creano sono *miste, dirette o indirette*.

Nella categoria delle morfologie dirette vanno inserite le forme la cui genesi è dovuta all'azione corrosiva delle acque esercitata in tutte le direzioni per allagamento totale: si tratta dei vani che si formano nella zona freatica.

Morfotipo classico è la condotta freatica o *condotta forzata*, quasi un tubo di comunicazione, una galleria più o meno inclinata e rettilinea, lungo la quale le acque si trasferiscono, in funzione del carico idraulico, a velocità variabile al di sotto della superficie freatica e spesso anche al di sotto del livello di base.

L'azione corrosiva si esplica sulle pareti e lungo la direttrice di flusso in ogni direzione e quindi la sezione trasversale ideale ha forma circolare o sinuosa in conseguenza dell'eventuale diversa corrodibilità della roccia nei diversi punti. Sempre tuttavia, le dimensioni longitudinali (quelle nel senso della corrente e dello sviluppo) prevalgono nettamente su quelle laterali e verticali. E' stato calcolato che l'allargamento di una condotta forzata dai pochi millimetri iniziali ad un paio di metri necessita di alcune decine di migliaia di anni di attività idrica.

Fra le morfologie dirette andrebbero anche inseriti i *pozzi*, cavità a prevalente, se non assoluto, sviluppo verticale, dalla sezione trasversale variabile da circolare a ellittica molto allungata sull'asse maggiore. I pozzi si originano nella zona satura solamente come condotte freatiche subverticali in pressione e solitamente si evolvono (impostandosi su superfici di discontinuità) nella zona vadosa per percolazione lungo le pareti, per caduta d'acqua e di vapor d'acqua dall'alto o per moti convettivi di aria satura di umidità. Si possono distinguere i "*pozzi classici*", a forma subcilindrica (con sezione simmetrica rispetto ad un piano verticale) e terminanti verso l'alto con un soffitto a campana anche molto allungata, ed i "*pozzi cascata*", originati da afflussi idrici provenienti da condotti laterali più o meno inclinati ed intersecanti una struttura verticale.

Sono definite morfologie indirette tutte quelle forme che sono il risultato della modifica della forma dei vani a morfologia diretta per fatti gravitativi, deposizionali fisici e chimici, tettonici. Molto spesso le morfologie indirette sono il risultato della concomitante (o distribuita nel tempo) azione dei diversi fattori morfogenetici.

Lo *scorrimento di acque libere* porta all'approfondimento per corrosione ed erosione del pavimento delle gallerie, con la formazione di *forre*, di *solchi di incisione*, di *marmitte*, cioè di forme molto simili a quelle che i corsi d'acqua ad alta energia generano in superficie. Frequente è lo *scalzamento al piede* di depositi (mensole, crolli e mobilizzazioni di depositi chimici o fisici, ecc.) per erosione, movimentazione e trasporto in altre zone della cavità.

La *sedimentazione* forma depositi più o meno grossolani abbandonati dalle acque per diminuita capacità di trasporto (cioè per variazione di velocità): ghiaie, sabbie, limi, argille. Talvolta nelle cavità si incuneano, spinti o portati dai ghiacci, anche depositi morenici.

I crolli sono la conseguenza dell'azione morfogenetica della *gravità* che elabora, con fatti microclastici o con episodi macrogravitativi, i vuoti che non sono più in equilibrio geostatico, alla ricerca di forme più stabili. Oltre alla caduta di piccoli volumi rocciosi si verificano grandi crolli dal soffitto o dalle pareti nelle sale e nelle gallerie; frequenti sono anche i cedimenti di pavimenti per anastomosi di gallerie, i ribaltamenti per scalzamento al piede, le fratture di tensione. Si possono formare così accumuli anche imponenti di materiale (talvolta successivamente cementato dalle acque circolanti ricche di carbonati disciolti) più o meno grossolano: merita tenere presente nelle analisi evolutive che i detriti occupano maggior volume del materiale sano in posto.

Il *concrezionamento* (la deposizione chimica) consiste nella ricristallizzazione di un determinato sale (solitamente carbonato di calcio, ma in occasioni speciali anche altri carbonati) per sovrasaturazione. La forma e la struttura delle concrezioni (dette *speleotemi*) dipende dal "tipo di moto" dell'acqua: provenienza puntuale o diffusa, gocciolio o scorrimento, evaporazione o traspirazione, portata costante o variabile, scorrimento su pareti o su pavimento, scorrimento laminare o turbolento, correnti d'aria, variazioni di umidità assoluta, pressioni interstiziali, capillarità, arricchimenti minerali o termali, ecc. Possiamo quindi leggere le forme, oltre che con estro artistico, in funzione del modello genetico e come testimonianza di passati regimi idrici e/o climatici.

Fra i meccanismi principali di cristallizzazione possiamo ricordare:

a) da gocciolamento (*tubolari, stalattiti, veli o cortine, stalagmiti*); b) da scorrimento (*colonne, colate, crostoni stalagmitici, gours*); c) da capillarità (*dischi, eccentriche, infiorescenze*); d) da condensazione (*rims, baffi*); e) in condizioni subacquee (*cristalli, mammelloni, pisoliti*); f) da acque salienti (*gaysermiti*).

Le *stalattiti* e le *stalagmiti* rappresentano le forme più comuni di concrezionamento di grotta. Si generano per effetto della deposizione di cristalli di calcite (CaCO_3) per evaporazione dell'acqua durante lo stillicidio.

Le stalattiti si formano sulla volta delle cavità: la goccia, perdendo per diffusione anidride carbonica nell'atmosfera, deposita sul bordo cristalli di calcite i cui assi di accrescimento sono perpendicolari alla superficie da cui gocciolano o su cui scorrono le acque. L'acqua percola attraverso un canalicolo centrale, il che contribuisce alla crescita verticale, e lungo la superficie esterna, il che fa accrescere radialmente lo speleotema con sottili veli concentrici.

Le *tubolari*, chiamate anche *spaghetti*, sono stalattiti particolari il cui diametro rimane costante e coincidente con quello della goccia d'acqua che le genera (0,4 - 0,6 cm). Il gocciolio è sufficientemente lento da permettere la deposizione di materiale a corona circolare, ma è abbastanza veloce da non consentire cristallizzazioni all'interno del tubolare.

Nel punto di caduta di una goccia si forma la stalagmite, la cui forma cilindrica con l'apice ogivale è dovuta al fatto che la deposizione è massima nel punto di impatto, mentre tende a diminuire radialmente di mano in mano che ci si allontana dal punto di caduta. La dimensione e la forma, estremamente variabili, della stalagmite dipendono oltre che dalla velocità di caduta (e quindi dall'altezza di gocciolio), dalla quantità d'acqua e dal suo regime (e quindi dal tipo di clima esterno).