

José-Maria Calaforra
Paolo Forti

Speleotemi peculiari dei Gessi e delle Anidriti



Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia
Serie II vol. 36 - 2021

Fin dalla mia prima uscita, oltre mezzo secolo fa, in una cavità in gesso del bolognese, mi sono perduto appassionato ai depositi chimici che si formano in questo particolare tipo di grotte. Da allora non ho mai smesso di cercarne e fotografarne sempre nuovi, spesso affrontando anche lunghi viaggi attorno al mondo. In questo mezzo secolo le conoscenze su questo particolare aspetto del carsismo sono molto migliorate, tanto da rendere, a mio avviso, necessario un punto fermo che permetta, auspicabilmente, a giovani speleologi di iniziare ricerche e studi in questo tuttora promettentissimo campo di studio.

Paolo Forti

Era il 1985 quando, studente di geologia all'Università di Granada decisi di avventurarmi nella stesura di una tesi di dottorato sulla "Karstología de yesos". Era realmente un'avventura... infatti quando iniziai a ricercare la bibliografia su questo argomento realizzai subito che in Spagna, a quel tempo, praticamente non esisteva nulla... Solo un professore dell'Università di Bologna si era avventurato nello studio di cosa nascondevano queste "strane" grotte in gesso. Decisi quindi di andare a trovarlo per cominciare a conoscere questo mondo sotterraneo ancora tutto da scoprire. Da quella prima volta, non abbiamo più smesso di percorrere assieme un lungo cammino all'interno del "mondo sotterraneo nel gesso"... Eppure ancora oggi queste oramai non più "strane grotte" continuano a regalarci e a regalare a chiunque le voglia studiare nuove eccitanti scoperte

José-Maria Calaforra

Testo:

Josè-Maria Calaforra,

Dipartimento di Biologia e Geologia, Università di Almería, Spagna, jmcalforra@ual.es

Paolo Forti,

Istituto Italiano di Speleologia, Università di Bologna, paolo.forti@unibo.it

Disegni e schemi: Paolo Forti

Impaginazione: Piero Lucci

Gli Autori ringraziano il Prof. Viacheslav Andreychouk per le notizie e le immagini fornite sugli speleotemi criogenici della Grotta di Kungur (Russia) e gli ossidi-idrossidi di Ferro e Manganese della grotta Zoolushka (Ucraina), Dott. Olga Kadebskaya per le informazioni sugli speleotemi e i depositi chimici della Grotta di Kungur e la grotta Ice Fern in Kazaakhstan, Marco Vattano per le foto e le notizie sulle grotte siciliane, e Francisco Hoyos e Víctor Ferrer per le foto degli speleotemi delle grotte dell'area carsica di Sorbas e Baena (Spagna). Infine gli Autori ringraziano Paolo Grimandi e Marco Vattano per la rilettura critica del manoscritto.

In copertina: l'Abete di gesso della Sima de los Pinos in Sorbas (Spagna) (Foto: Francisco Hoyos).

Quarta di copertina: immagine al microscopio elettronico di cristalli scheletrici di gesso criogenici della Grotta di Kungur (Russia) (Foto: Olga Kadebskaya e Elena Chirkova).

Con il patrocinio di:



“Progetto finanziato con il contributo della Legge Regionale 9/2006 “Norme per la conservazione e valorizzazione della geodiversità dell’Emilia-Romagna e delle attività ad essa collegate”.

ISBN: 978-88-943271-8-2



Finito di stampare
nel mese di marzo 2021

La responsabilità di quanto affermato nei testi è dei singoli autori.

Tutti i diritti d'autore, di traduzione, elaborazione o riproduzione sotto qualsiasi forma, intera o parziale, sono riservati a:
Società Speleologica Italiana
Via Zamboni, 67 - 40126 Bologna (BO).

José-Maria Calaforra

Paolo Forti



SPELEOTEMI PECULIARI DEI GESSI E DELLE ANIDRITI

Il punto sulle concrezioni e mineralizzazioni
delle grotte in gesso e anidrite, rarità e peculiarità
ad oggi poco conosciute



Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna

Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia
Serie II vol. 36 - 2021

Indice

Prefazione di Massimo Ercolani.....	pag. 7
Riassunto/Abstract	pag. 9
Introduzione	pag. 11
Grotte nelle anidriti e gesso-anidriti	pag. 12
<i>Gli speleotemi peculiari</i>	pag. 12
<i>I minerali secondari</i>	pag. 15
<i>I depositi chimici delle grotte in anidrite</i>	pag. 16
Grotte nei gessi	pag. 18
Le concrezioni	pag. 19
<i>Speleotemi di calcite</i>	pag. 19
<i>Concrezioni carbonatiche peculiari dell'ambiente gessoso</i>	pag. 26
Le lame.....	pag. 26
Le mezze bolle.....	pag. 28
Le bolle.....	pag. 28
Le calciti flottanti con gesso.....	pag. 30
Speleotemi biogenici.....	pag. 32
• Le rootsicles (pseudo-stalattiti su radici).....	pag. 33
• La colata biogenica.....	pag. 34
Gli aggregati cristallini criogenici.....	pag. 35
<i>Speleotemi di gesso</i>	pag. 35
Speleotemi peculiari di gesso.....	pag. 39
• Gli alberi di Natale.....	pag. 39
• Le palle di gesso.....	pag. 40
• Le stalagmiti cave.....	pag. 40
• Le polveri di gesso.....	pag. 44
1 - Da rapida evaporazione.....	pag. 44
2 - Da congelamento.....	pag. 46
3 - Da mineralizzazione del guano.....	pag. 47
4 - Da idratazione della bassanite.....	pag. 48

Le cristallizzazioni	pag. 49
<i>La sericolite</i>	pag. 51
<i>Le infiorescenze gessose</i>	pag. 52
<i>I cristalli di gesso peculiari</i>	pag. 54
I cristalli criogenici.....	pag. 54
I porcospini criogenici.....	pag. 54
I cristalli tabulari epitassiali.....	pag. 58
Gli aggregati microcristallini lungo i piani di sfaldamento principali.....	pag. 60
I cristalli prismatici sopra stalattiti di gesso.....	pag. 62
Gli abeti di gesso.....	pag. 64
Le monete di <i>lapis</i>	pag. 67
Gli aggregati cristallini antropogenici.....	pag. 68
I minerali di grotta	pag. 70
<i>Gli ossidi-idrossidi</i>	pag. 72
Il ghiaccio.....	pag. 72
Gli ossidi di ferro e manganese.....	pag. 78
<i>I carbonati</i>	pag. 80
<i>I solfati</i>	pag. 90
<i>I cloruri</i>	pag. 91
<i>I fosfati</i>	pag. 92
<i>I silicati</i>	pag. 92
<i>Lo zolfo</i>	pag. 96
<i>I borati</i>	pag. 98
Conclusioni	pag. 100
Bibliografia	pag. 103
Foto di speleotemi rari	pag. 108

Prefazione

Questo libro vuol far conoscere, a molti, un aspetto eclatante del mondo ipogeo, fino ad ora confinato nelle pagine delle riviste scientifiche, riservate a studiosi e specialisti del settore.

Tuttavia, la complessità del chimismo che è alla base della genesi e dell'evoluzione degli speleotemi, rende l'argomento di non immediata acquisizione.

La chiarezza del testo, le splendide foto, nonché i disegni e gli schemi, di cui il volume è ricco, aiutano ad affrontare la complessità del tema.

Ma appunto nella dinamica dei processi chimici e nell'interazione con i fattori esterni all'ambiente di grotta, stanno, in particolare, l'interesse e la bellezza degli speleotemi.

È una chiave di lettura, o meglio di studio, che propongo e raccomando: la sola, credo, che consenta di apprezzare appieno l'eccezionalità di questo libro.

Essa trascende il lato estetico: del resto, questi speleotemi spesso appaiono come dettagli marginali degli ambienti ipogei. Nelle grotte di gesso e ancor più in quelle di anidrite, sono infatti relativamente rari, sovente limitati a poche zone, e, a volte, visibili solo ad occhi attenti.

Eppure, come spesso avviene, nei dettagli si cela la comprensione di schemi più vasti che possiamo svelare, nel modo migliore, attraverso i particolari che attraggono la nostra attenzione.

C'è un'immagine, in questo senso, che mi ha colpito: un filo di nylon abbandonato dagli speleologi in una grotta dei gessi bolognesi e ritrovato dopo alcuni decenni; ebbene, la concrezione calcarea, che si è depositata sopra, registra, con straordinaria precisione, i cinquecento maggiori eventi piovosi che, nel tempo, si sono succeduti. Consideriamo allora il tesoro di informazioni su clima, vegetazione, presenza umana, registrato negli speleotemi che si sono formati in grotta nell'arco di alcune migliaia di anni...

In sintesi, le concrezioni rendono le grotte uno straordinario archivio ipogeo in grado di documentare, con la loro evoluzione, eventi che, non di rado, hanno coinvolto l'intero pianeta.

La Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna è ormai da anni impegnata a documentare le grotte e le aree carsiche regionali. Lo fa coinvolgendo, a titolo sempre volontario, studiosi e ricercatori tra i massimi esperti a livello mondiale. Questo volume non fa certo eccezione, che anzi i due autori sono da ritenersi i soli al mondo in grado di affrontare, in modo esaustivo, un argomento tanto difficile e complesso.

Altri testi seguiranno a breve; altri studiosi contribuiranno a far conoscere un ambiente nascosto e straordinario che, oggi più che mai, ha necessità di essere salvaguardato e protetto.

C'è urgenza di comprendere e documentare, perché una seria e consapevole salvaguardia dell'ambiente implica necessariamente una sua profonda conoscenza.

Massimo Ercolani

*Presidente della Federazione Speleologica Regionale
dell'Emilia-Romagna*

Riassunto

È noto che i depositi chimici presenti nelle grotte in gesso o in anidrite sono assai meno comuni e sviluppati di quelli che si trovano di norma nelle grotte in calcare. Inoltre, essi hanno una molto minore variabilità mineralogica e questo per una serie di fattori, di cui i più importanti sono: 1- il solfato di calcio (sia anidro che biidrato) è molto meno reattivo del carbonato di calcio; 2- gli affioramenti di roccia solfatica normalmente presentano una variabilità mineralogica scarsa nella loro area di ricarica.

Anche per questo e fino a poche decine di anni addietro, gli ambienti carsici in questi litotipi sono stati storicamente meno studiati da questo punto di vista. Ma recentemente alcuni studi mineralogici hanno dimostrato che, in alcune grotte in roccia solfatica, possono svilupparsi meccanismi minerogenetici del tutto particolari, e spesso ristretti a tali ambienti, che possono portare allo sviluppo di nuovi tipi di concrezioni e anche di nuovi minerali di grotta.

Molti di questi studi, pur essendo stati effettuati in aree carsiche italiane e spagnole sono stati pubblicati all'estero, in riviste non facilmente accessibili agli speleologi dei nostri paesi. Si è ritenuto pertanto importante fare il punto sulle conoscenze attuali in questo campo. Nel presente lavoro, infatti, oltre a descrivere brevemente tutti i meccanismi minerogenetici attivi nelle grotte in gesso e anidrite, vengono anche riportate le conseguenti concrezioni e/o minerali di grotta.

Comunque, lungi dall'essere esaustiva, la recente ricerca mineralogica in grotte solfatiche ha essenzialmente messo in evidenza l'inaspettata ricchezza di peculiari forme concrezionarie e rari depositi mineralogici.

Se si considera poi che in tutto il nostro pianeta sono state studiate solamente un piccolo numero di aree carsiche gessose, e ancora meno in anidrite, è molto probabile che in un futuro prossimo verranno scoperti molti altri speleotemi che possono svilupparsi solo in questo particolare ambiente carsico. Questo non farà che accrescere l'importanza minerogenetica di queste grotte.

Completa l'opera una piccola selezione di immagini di speleotemi che, pur non essendo peculiari dei gessi, sono poco comuni.

Parole chiave: meccanismi minerogenetici, speleotemi, grotte in gesso e anidrite.

Abstract

Chemical deposits inside gypsum and anhydrite caves are far less common than those developed within limestone. Moreover they exhibit a very scarce mineralogical variability due to several reasons, the most important of which are: 1- calcium sulfate is by far less reactive than calcium carbonate; 2- sulphate outcrops normally have a scarce mineralogical variability within the cave recharge areas.

Therefore these karst environments were less investigated from this point of view in the past: several mineralogical studies were carried out in the last decades in different sulfate areas proving that some of them host peculiar minerogenetic mechanisms, which are, at the moment, exclusive for these areas, and sometimes also gave rise to rare or even new cave minerals.

In the present paper, together with a short overview on all the actually known minerogenetic mechanisms active within the evaporite caves, the related chemical deposits and speleothems are shortly described.

Far from being exhaustive, the recent mineralogical research on evaporite caves puts in evidence their unexpected richness in peculiar speleothems and rare cave deposits.

Taking into account that only a few sulfate areas have been, so far, studied, it is highly probable that in the near future many more new cave deposits will be discovered, thus increasing the mineralogical interest of these unique caves.

Finally a short selection of photos of rare speleothems, even not restricted to gypsum caves, has been added at the end.

Keywords: minerogenetic mechanisms; speleothems; anhydrite and gypsum caves.

Introduzione

La presenza di depositi chimici sviluppatasi all'interno di grotte in gesso era nota sin dall'antichità (ALDROVANDI, 1648; LAGHI, 1806; SANTAGATA, 1836; FEDOROF, 1883). Tuttavia, quando dalla metà del secolo scorso sono iniziati studi specifici sulla mineralogia di grotta (WHITE, 1962; HILL, 1976), le grotte in gesso o in anidrite sono state completamente trascurate. A quel tempo, infatti, nessuna concrezione particolare e solo 5 minerali (calcite, epsomite, gesso, ghiaccio e mirabilite) erano stati osservati in questo tipo di grotte.

La scarsa variabilità nella composizione chimica e la dimensione generalmente piccola dei depositi secondari delle grotte in gesso e gesso-anidriti rispetto alle analoghe formazioni presenti nelle cavità naturali in altri litotipi (calcare certo, ma anche dolomia e, in parte, anche la silice) è la conseguenza diretta di alcune caratteristiche intrinseche degli affioramenti del solfato di calcio sia anidro che idrato:

- 1 - Il CaSO_4 , essendo un sale di un acido molto forte, è estremamente meno reattivo del CaCO_3 e degli altri sali di acidi meno forti.
- 2 - Le grotte nei gessi e nelle gesso-anidriti hanno generalmente una scarsa variabilità mineralogica nelle loro aree di ricarica.

Non c'è da stupirsi quindi che, fino a 25 anni fa, non ci fosse alcuna pubblicazione generale sui minera-

li secondari delle grotte in gesso (FORTI, 1996), poi aggiornata solo venti anni più tardi in un lavoro più ampio sulle evaporiti, che quindi, oltre ai gessi, considerava anche, per la prima volta, le gesso-anidriti e il salgemma (FORTI, 2017).

Solo nelle ultime due decadi del secolo scorso un piccolo numero di aree carsiche in gesso e gesso-anidrite (Fig. 1) hanno cominciato ad essere studiate dal punto di vista mineralogico ed esattamente una nelle gesso-anidriti dell'Alta Val di Secchia (CHIESI & FORTI 1985), e 5 nei gessi (Kungur sugli Urali, i Gessi dell'Emilia Romagna, l'area di Santa Ninfa in Sicilia, l'area di Verzino in Calabria e quelle di Sorbas e Baena in Spagna) (VOLKOV *et al.*, 1986; FORTI 1986; FORTI & ROSSI 1987; FORTI & LOMBARDO 1988, CALAFORRA & FORTI, 1993 e 1994), ma anche oggi esse sono una frazione minima delle aree carsiche in questi litotipi esistenti sul nostro pianeta.

Attualmente solamente due aree al mondo nelle gesso-anidriti e 14 in gesso sono state studiate specificamente per i loro speleotemi e, spesso, questi studi non possono considerarsi esaustivi ma solamente preliminari. Tuttavia sono stati sufficienti a mettere in evidenza come soprattutto le grotte nei gessi, ma anche in parte quelle nelle gesso-anidriti, siano ambienti molto interessanti, caratterizzati da meccanismi minerogenetici spesso peculiari, e a volte esclusivi, con conseguente presenza di minerali estremamente rari



Fig. 1 - Localizzazione di tutte le aree carsiche in gesso e anidrite sino ad oggi studiate dal punto di vista dei depositi chimici. In Anidrite: 1 - Alta Val di Secchia, Italia; 2 - Germania centrale. In Gesso: 1 - Moncalvo Piemonte; 2 - Emilia-Romagna; 3 - Verzino, Calabria; 4 - Santa Ninfa, Sicilia; 5 - Cozzo Disi, Sicilia; 6 - Podolia, Ucraina; 7 - Almeria e Baena, Spagna; 8 - Darhedi, Algeria; 9 - New Mexico, USA; 10 - Punta Alegre, Cuba; 11 - Neuquén, Argentina; 12 - Pinega, Russia; 13 - Kungur, Russia e 14 - Lago Inder, Kazakistan (da FORTI 2017, modificata).

e, in qualche caso, addirittura nuovi per l'ambiente di grotta.

Lo scopo del presente lavoro è quello di fornire un quadro generale ed esaustivo sulle attuali conoscenze sulle concrezioni e sulle mineralizzazioni peculiari di queste grotte. Le concrezioni e i minerali di grotta sono descritti separatamente per le gesso-anidriti e i gessi, perché i relativi meccanismi genetici differiscono da una litologia all'altra.

Al termine si è poi deciso di aggiungere anche una breve carrellata di immagini per documentare quelle concrezioni che, pur non essendo ristrette all'ambiente solfatico, presentano caratteristiche particolari dal punto di vista estetico, dimensionale o comunque di oggettiva rarità.

Vi è infine la speranza di sollecitare l'interesse, non solo degli speleologi ma anche degli scienziati, per questo particolare campo di ricerca ancora poco indagato e che, sicuramente, potrà portare a interessanti scoperte in un futuro auspicabilmente prossimo.

Grotte nelle anidriti e gesso-anidriti

Fenomeni carsici in anidrite sono noti in molte parti del mondo ma, nella quasi totalità dei casi, essi si sono sviluppati all'interno di acquiferi più o meno profondi e pertanto è praticamente impossibile esplorarli e tanto meno studiarne gli eventuali depositi chimici, come invece accade per quelli di altre formazioni evaporitiche (FORD & WILLIAMS, 2007).

Essenzialmente per questo motivo a tutt'oggi solamente due aree al mondo sono state esplorate e i loro speleotemi studiati (Fig. 1): si tratta del Sud Harz in Germania (anidriti) e dell'Alta Val di Secchia in Italia, dove però la formazione non è costituita da anidrite pura ma da una mescolanza di gesso e anidrite.

Nell'alta Val di Secchia (Emilia-Romagna) le grotte si sono sviluppate in un diapiro formato da gesso-anidriti e i loro depositi chimici secondari erano in realtà già noti quando è stato pubblicato il primo lavoro monografico sugli speleotemi delle grotte in gesso (FORTI, 1996). A quel tempo, però quelle cavità erano erroneamente considerate grotte in gesso e pertanto i loro depositi chimici sono stati descritti assieme a quelli delle cavità sviluppatesi in aree carsiche gessose (FORTI, 2017).

La genesi e l'evoluzione delle grotte tedesche e italiane sono differenti: infatti le prime sono ipogeniche (KEMPE, 2014) e, conseguentemente, spesso mancano di un accesso naturale dall'esterno e inoltre la loro alimentazione frequentemente non deriva da una infiltrazione diretta dalla superficie esterna. Per questo sono state, quasi sempre, scoperte grazie a lavori minerari che le hanno intersecate per caso. Le grotte dell'Alta Val di Secchia sono invece epigeniche, spesso epidermiche,

e possiedono quindi sempre una connessione diretta con la superficie esterna anche se a volte non transitabile (MALAVOLTI, 1949).

A causa della loro differente genesi i depositi chimici secondari delle cavità di queste due aree sono assolutamente diversi, essendo peculiari dell'ambiente che ha controllato la genesi e l'evoluzione delle grotte stesse.

Va detto subito che la quasi totalità del gesso che si osserva all'interno di queste cavità non può essere considerato un deposito secondario di grotta dato che la sua formazione è avvenuta per processi di idratazione dell'anidrite primaria, non dovuti alla presenza delle grotte stesse. Comunque, le cavità in anidrite e/o in gesso-anidrite sono in generale molto povere in depositi chimici secondari (FORTI, 2017). I motivi di questa scarsità che accomuna ambedue le categorie di queste grotte sono differenti: infatti nelle cavità ipogeniche in anidrite mancano i depositi chimici perché quasi tutto il loro sviluppo è stato caratterizzato da sommersione totale in acqua quasi stazionaria, con l'impossibilità pratica che importanti reazioni chimiche potessero dar luogo a precipitazione di minerali differenti. Nelle grotte epigeniche in gesso-anidrite invece, a causa del notevole aumento di volume dovuto all'idratazione dell'anidrite (e conseguente sua trasformazione in gesso), le pareti e il soffitto si rigonfiano fatturandosi e diventano così estremamente instabili. Questo causa un continuo distaccarsi di piccoli frammenti di roccia che ovviamente impedisce lo sviluppo anche di piccoli speleotemi (di gesso e/o calcite o anche di altri depositi chimici), che comunque, anche quando riuscissero a formarsi, verrebbero inevitabilmente dilavati ed asportati da una delle frequenti piene che caratterizzano le grotte dell'Alta Val di Secchia.

Nonostante quanto appena detto, le grotte in anidrite si sono dimostrate interessanti non solo dal punto di vista mineralogico, dato che ad oggi ospitano ben due minerali esclusivi di questi ambienti (clinocloro e devillina) (CHIESI & FORTI, 1985), ma anche per la presenza, in alcune delle grotte ipogeniche, di un tipo di concrezione peculiare, formato da una miscela di gesso e argilla: le grandi "pelli di gesso" della Barbarossa Hohle (ANONIMO, 1988).

Gli speleotemi peculiari

A differenza delle grotte in gesso, sempre molto ricche di speleotemi di $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, le cavità in anidrite e gesso-anidrite sono del tutto prive di concrezioni in CaSO_4 . Diretta conseguenza questa, del fatto che il solfato di calcio bi-idrato (gesso) in condizioni normali di temperatura è meno solubile del solfato anidro (anidrite) (HARDIE, 1967), proprietà che ovviamente impedisce la formazione di concrezioni di anidrite.

Comunque anche gli speleotemi di gesso sono assolutamente rari e, qualora esistenti, molto piccoli. Questo perché la stragrande maggioranza del gesso che si forma dall'idratazione dell'anidrite sostituisce tale minerale nella struttura della roccia e perciò non dà luogo ad alcuna concrezione. A volte, comunque, possono formarsi piccoli depositi di gesso secondario come osservato nelle grotte nelle gesso-anidriti dell'Alta Val di Secchia (CHIESI & FORTI, 1988). La loro genesi è strettamente connessa alla presenza di acqua di condensazione che, dopo aver sciolto l'anidrite può muoversi lentamente per capillarità lungo la volta o le pareti della grotta e quindi evaporare depositando così piccole croste o sottili colate di gesso. Nel caso poi che il meccanismo di condensazione-evaporazione sia mol-

to lento e quindi la sovrassaturazione eventualmente raggiunta sia talmente bassa da rendere impossibile la nuova nucleazione, allora, al posto delle concrezioni policristalline, si possono sviluppare piccoli aggregati macrocristallini, o addirittura, monocristallini di gesso. Piccoli cristalli di gesso secondario possono essere osservati anche nelle grotte in anidrite della Germania, dove il processo appena descritto di condensazione-evaporazione è divenuto attivo non appena quelle grotte hanno cessato di essere totalmente sommerse. In ogni caso, però, queste concrezioni sono di nessun interesse estetico e di scarso interesse scientifico. Solamente le grotte ipogeniche in anidrite della Germania ospitano uno speleotema di gesso davvero particolare e attualmente unico nel suo genere al mondo:

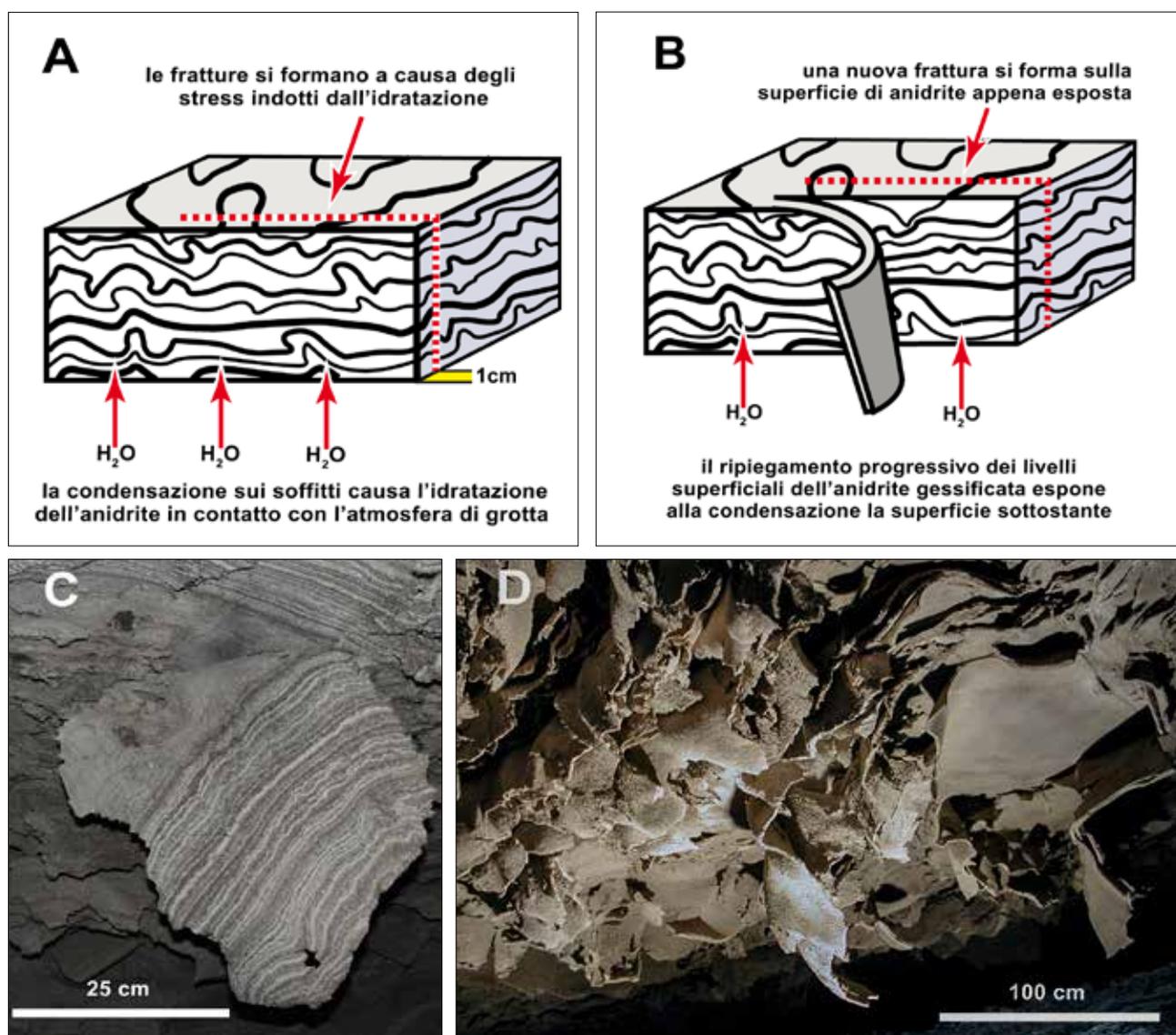


Fig. 2 – Meccanismo genetico che permette l'evoluzione delle "pelli di gesso": l'idratazione e la conseguente espansione dei livelli di anidrite in contatto con l'atmosfera della grotta ne "scolla" un sottile straterello (A) con la conseguente formazione di una prima "pelle di gesso", che si piega all'esterno e, contemporaneamente, il processo continua con lo sviluppo di una seconda "pelle". (B); (C) la struttura finemente laminata degli strati di anidrite alternate ad argilla e (D) foto di una porzione delle "pelli di gesso" che pendono dal soffitto della sala della "Conceria" all'interno della Barbarosahohle in Germania (Foto: Stephan Kempe) (da FORTI 2017, modificata).

le cosiddette “pelli di gesso”.

La località dove queste “pelli” raggiungono il loro massimo sviluppo è la grotta turistica “Barbarossa”, che è anche una delle più grandi grotte in anidrite della Germania, con uno sviluppo di oltre 700 metri (KUPETZ & MUCKE, 1989; KUPETZ & KNOLLE, 2015). Al suo interno si trova la sala “della Conceria”, cosiddetta proprio per la presenza delle “pelli di gesso”, che altro non sono che grandi ma sottili “vele” costituite da un’alternanza di straterelli di anidrite, gesso e argilla che pendono dal soffitto (Fig.2D).

L’evoluzione di queste strutture è stata resa possibile dal fatto che, nell’area dove si è sviluppata questa grotta, gli strati di anidrite sono suborizzontali e spessi non più di un centimetro alternandosi con livelli dello stesso spessore di argilla plastica (Fig. 2C). L’atmosfera della grotta è inoltre praticamente satura di umidità per la presenza al suo interno di numerosi laghi

e quindi è sede di una forte condensazione a livello delle volte delle cavità più ampie, condensazione che ovviamente causa una rapida idratazione dell’anidrite. Pertanto la quasi totalità dell’anidrite direttamente esposta si è trasformata in gesso e, di conseguenza, la superficie esterna della roccia subisce un notevole aumento in volume, che da luogo a una discontinuità tra lo strato parzialmente gessificato (di circa 2 cm di spessore) e la porzione di roccia sottostante ancora inalterata (Fig. 2B). A questo punto l’idratazione può procedere lungo la frattura cosicché la lamina distaccata aumenta progressivamente di dimensioni e si piega sempre più grazie alla plasticità degli interstrati argillosi (Fig. 2C). Contemporaneamente l’idratazione della superficie sottostante appena esposta fa sviluppare una nuova “pelle di gesso”: nel tempo quindi la volta della cavità si riempie di “pelli” pendenti, che la fanno assomigliare alla superficie di un dolce di pa-

	Nome	Formula chimica	Caratteristiche	Prima citazione
1	Brochantite	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	Croste verde smeraldo, associate a devillina and clinocloro	CHIESI & FORTI, 1985
2	Calcite	CaCO_3	Crostoni nel letto dei torrenti, piccole e rare stalattiti o tubolari Microcristalli associati a dolomite e calcite nelle “ceneri di dolomite”	CHIESI & FORTI, 1988; KUPETZ & KNOLLE, 2015
3	Clinocloro*	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	Piccoli cristalli aciculari nelle croste verde smeraldo con brochantite e devillina	CHIESI & FORTI, 1985
4	Devillina	$\text{CaCu}_4(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Cristallini tabulari verde pallido associati a brochantite e clinocloro	CHIESI & FORTI, 1985
5	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Microcristalli associati a gesso e calcite nelle “ceneri di dolomite”	KUPETZ & KNOLLE, 2015
6	Gesso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Piccole crosticine e cristalli eudrali Microcristalli associate a calcite e dolomite nelle “ceneri dolomitiche”	CHIESI & FORTI, 1986; KUPETZ & KNOLLE, 2015
7	Ghiaccio	H_2O	Grandi stalattiti e colate effimere	CHIESI & FORTI, 1986
8	Magnesite	MgCO_3	Piccoli cristalli in sedimenti sciolti	BERTOLANI & ROSSI, 1986
9	Opale	$\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Sottili croste e coralloidi all’interno di depositi incoerenti di ossidi-idrossidi di Fe	CHIESI & FORTI, 1986
10	Ossidi-idrossidi di Ferro		Sottili interstrati terrosi all’interno di una stalattite di calcite	CHIESI & FORTI, 1986
11	Ossidi di Manganese		Componenti minoritari di crosticine di ossidi idrossidi di Fe	CHIESI & FORTI, 1986

Tab. 1 – Elenco dei minerali secondari di grotta osservati nelle grotte in Anidrite e in Gesso-Anidrite (* = nuovo minerale per l’ambiente di grotta).

sta sfoglia (Fig. 2D).

È evidente che il fattore fondamentale per lo sviluppo delle “pelli di gesso” è lo spessore delle lamine alternate di anidrite e argilla, che deve essere abbastanza grosso da permettere un effetto di aumento di volume sufficiente a creare la frattura, ma non tale da causare il distacco e la conseguente caduta della porzione idratata. Questo è perfettamente coerente con il fatto che nelle altre grotte della stessa area, dove le laminazioni sono leggermente più spesse, lo sviluppo delle “pelli di gesso” è molto minore. Un’ulteriore conferma di quanto appena detto è data dal fatto che in Alta Val di Secchia, dove, essendo gli strati di anidrite spessi vari centimetri e gli interstrati argillosi praticamente assenti, nessuna “pelle di gesso”, anche minima, è mai stata osservata.

I minerali secondari

A tutt’oggi nelle grotte in anidrite e gesso-anidrite sono stati segnalati solo 11 minerali secondari (Tab. 1), ma due di questi sono stati osservati in una sola grotta al mondo (HILL & FORTI, 1997) delle gesso-anidriti dell’Alta Val di Secchia.

La grande maggioranza dei minerali di grotta (10), sono presenti nelle grotte dell’Alta Val di Secchia, di cui due (il clinocloro e la devillina, Fig. 3) (CHIESI & FORTI, 1985) sono esclusivi di quest’area, dove sono associate a brochantite in piccole crosticine di color verde smeraldo, che si trovano nella Risorgente di Monte Rosso. La loro genesi è correlata all’ossidazione dei rari cristalli di calcopirite dispersa nella roccia incassante.

Tra gli ossidi, il ghiaccio dà luogo a grandi colate, stalattiti e stalagmiti, presenti esclusivamente nei mesi più freddi dell’anno e solo nei primi ambienti di grotta (Fig. 4).

Gli ossidi di ferro e manganese sono abbastanza comuni in molte delle grotte dell’Alta Val di Secchia, anche se praticamente non formano ben definiti minerali: si trovano infatti come composti del tutto amorfi che formano straterelli di materiale scarsamente cementato sulle pareti delle grotte e, in un caso, anche sottili interstrati all’interno di una concrezione di calcite nell’Inghiottitoio dei Tramonti. La loro origine è stata messa in relazione ai processi pedogenetici indotti dalla deforestazione operata dall’uomo (CHIESI & FORTI, 1986).

Le concrezioni di calcite sono di gran lunga il deposito chimico più comune delle grotte in gesso-anidrite dell’Alta Val di Secchia, anche se le concrezioni normalmente più comuni (stalattiti, stalagmiti, vele) in queste grotte sono quasi totalmente assenti e, anche se presenti, sono di dimensioni estremamente ridotte: questo a causa dell’instabilità del soffitto e delle pareti

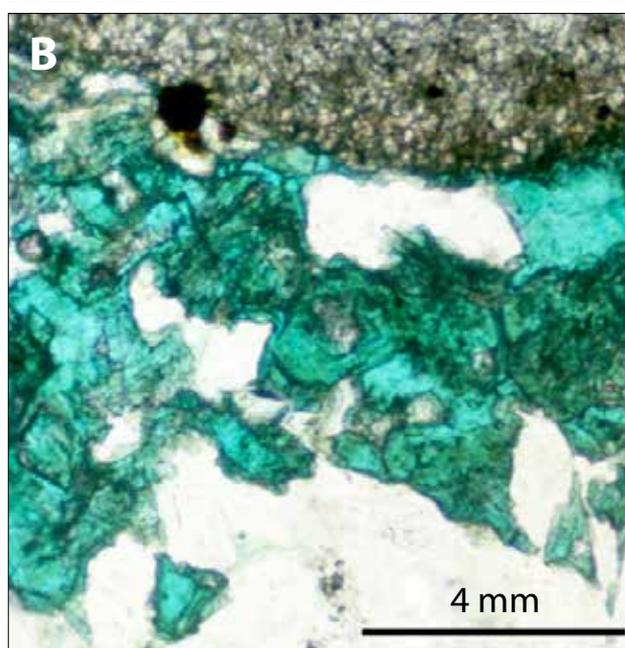
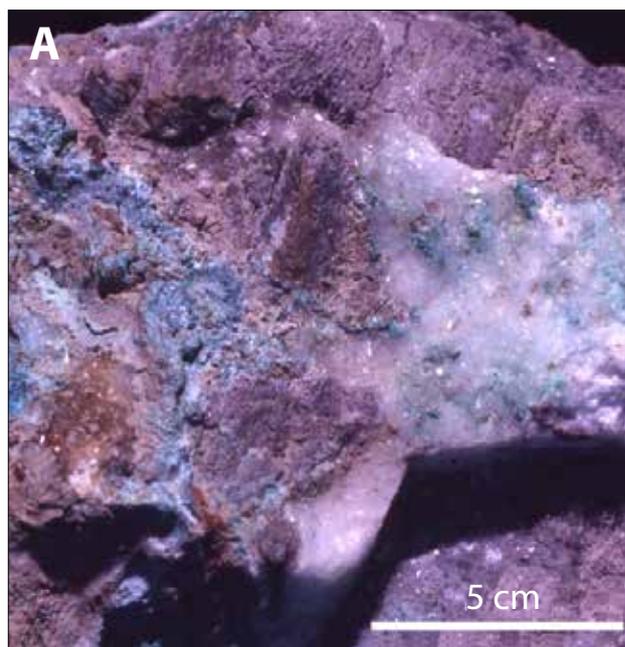


Fig. 3 – Risorgente di Monte Rosso (Alta Val di Secchia, Reggio Emilia): A) incrostazioni contenenti brochantite, devillina e clinocloro (Foto: Mauro Chiesi); B) sezione al microscopio delle stesse croste (Foto: Paolo Ferrieri).

di grotta che ne impediscono la genesi prima e lo sviluppo dopo.

Sono invece frequenti i grandi e spessi crostoni che rivestono la totalità o quasi dei letti dei torrenti sotterranei: il loro meccanismo evolutivo è diverso dal ben noto processo di diffusione della CO_2 dalla soluzione, che porta all’evoluzione delle concrezioni di calcite nelle grotte calcaree.

Nelle gesso-anidriti, infatti, la formazione dei crostoni è indotta sia dal progressivo sviluppo di anidride carbonica per ossidazione del materiale organico tra-



Fig. 4 – Tanone Grande della Gacciolina (Alta Val di Secchia, Reggio Emilia): i grandi speleotemi di ghiaccio che si formano non lontano dall'ingresso nei periodi invernali (Foto: Stefano Bergianti).

sportato del fiume, sia per solubilizzazione dell'anidride carbonica dall'atmosfera. La CO_2 così resa disponibile reagisce immediatamente con il calcio presente in soluzione formando il deposito di calcite. Contemporaneamente, però, essendo stato sottratto il calcio in soluzione, si innesca il processo di dissoluzione incongruente dell'anidrite (Fig. 5) che permette al sistema di rimanere sovrassaturo rispetto alla calcite, che continua a precipitare lungo tutto il corso del torrente sotterraneo. Questo fenomeno si verifica soprattutto nelle zone in cui il moto è turbolento (Fig. 5A), se la quantità di materiale organico da ossidare e/o la diffusione della CO_2 dall'atmosfera di grotta è sufficiente. Il secondo minerale carbonatico, la magnesite, è stato trovato solamente sotto forma di cristallini euedrali, che erano una componente minoritaria di un deposito argilloso-sabbioso all'interno del Tanone Grande della Gacciolina. La loro genesi è da attribuirsi all'evaporazione totale dell'acqua interstiziale con un alto contenuto di Mg, che proviene dalla dissoluzione di piccole lenti di dolomite presenti negli strati di anidrite (BERTOLANI & ROSSI, 1986).

Sottili crosticine e piccoli coralloidi di opale sono stati osservati all'interno dei livelli di ossidi di ferro e manganese che si alternano alle bande di calcite di

una stalattite dell'Inghiottitoio del Tramonti. Il loro sviluppo è stato probabilmente indotto dall'abbassamento del pH conseguente all'ossidazione dei composti ferro-magnesiaci (CHIESI & FORTI, 1986).

Infine l'ultimo silicato, il clinocloro, come detto precedentemente, è un minerale nuovo di grotta trovato sino ad oggi solo nell'Inghiottitoio dei Tramonti nell'Alta Val di Secchia (CHIESI & FORTI, 1985), sotto forma di cristallini aciculari microscopici dispersi all'interno delle croste verde-smeraldo, composte da devillina e brochantite. La sua genesi è da ricondurre alla reazione tra l'acido solforico (che deriva dall'ossidazione dei solfuri dispersi nell'anidrite) e le argille.

I depositi chimici delle grotte in anidrite

Solamente 3 minerali (dolomite, gesso e calcite) si sono sviluppati nelle grotte in anidrite dell'Hartz: di questi la dolomite è l'unico che non è stato rinvenuto anche nell'Alta Val di Secchia, mentre il gesso e la calcite si trovano in ambedue le località anche se la loro morfologia e genesi è spesso assolutamente differente, non fosse altro che per il fatto che le grotte tedesche sono ipogeniche e quelle italiane epigeniche (FORTI, 2017).

Si è già accennato alle "pelli di gesso", che si possono

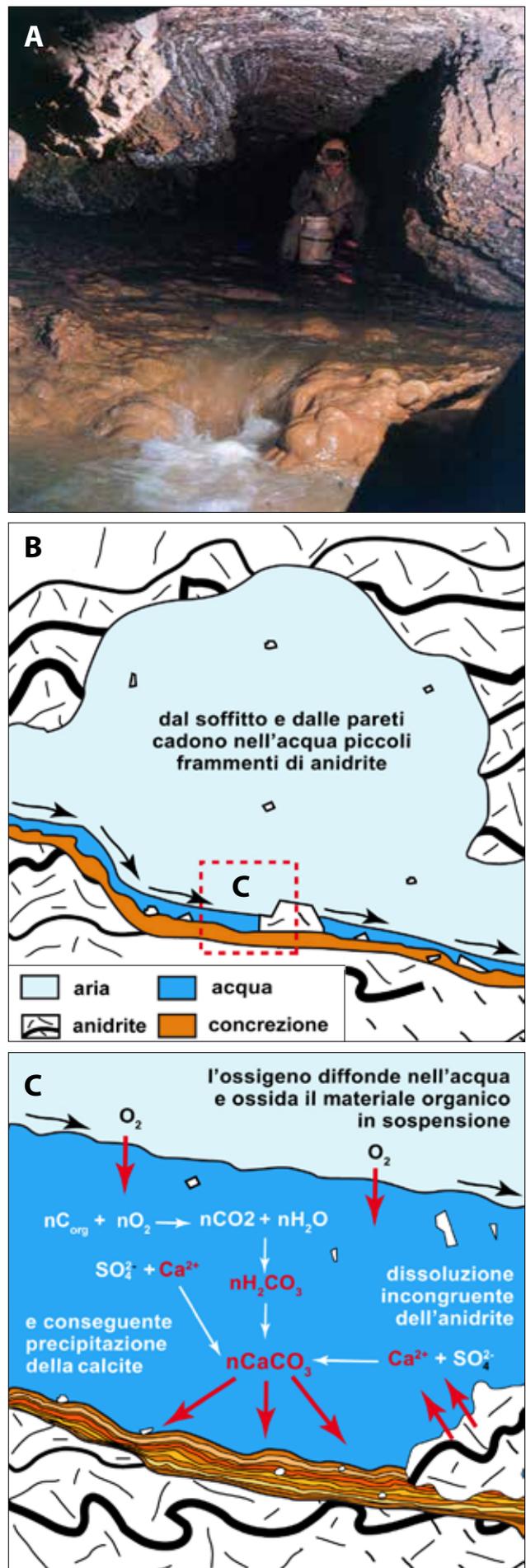
formare all'interno delle grotte tedesche quando non sono più totalmente allagate. Resta quindi da descrivere solo un ulteriore deposito chimico peculiare, che però si sviluppa quando le cavità sono ancora sommerse dall'acqua. Nelle grotte dell'Hartz sono stati infatti trovati dei depositi incoerenti residuali, a granulometria fine, al cui interno sono mescolati cristallini di neoformazione di gesso, calcite e dolomite. Questi accumuli di materiali sono stati chiamati "ceneri di dolomite" dai minatori che lavoravano nelle miniere di rame e che, a partire dal 1600, con le loro gallerie spesso intersecavano le grotte in anidrite (KUPETZ & KNOLLE, 2015). Fino a che non è stata effettuata una dettagliata analisi chimica e morfologica, le "ceneri di dolomite" sono state considerate essenzialmente come resti della dissoluzione del calcare e della dolomia.

Recentemente, però, l'analisi chimica ha evidenziato che si tratta di una miscela di materiali residuali (granuli di calcite e dolomite provenienti dalle formazioni carbonatiche sottostanti e argilla derivante dagli interstrati insolubili parzialmente esposti sulle pareti di anidrite delle grotte) e da minuscoli cristalli euedrali di neoformazione costituiti da calcite, dolomite e gesso (KUPETZ & KNOLLE, 2015).

La genesi delle "ceneri di dolomite" è strettamente correlata a quella delle grotte di quest'area: infatti esse si sono formate quando le acque, provenienti dalle formazioni carbonatiche sottostanti e quindi ricche in Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- hanno iniziato a solubilizzare l'anidrite, dando quindi luogo alla formazione delle grotte ipogeniche (Fig. 6A).

Ma la dissoluzione dell'anidrite ha indotto una sovrassaturazione rispetto ai carbonati di calcio e di magnesio (calcite e dolomite) che quindi hanno iniziato a precipitare favorendo, nel contempo, la dissoluzione incongruente di ulteriore anidrite (Fig. 6B). Questo processo è andato avanti per tutto il tempo che le grotte sono state invase dall'acqua che continuava a risalire dalle formazioni sottostanti. Contemporaneamente, la solubilizzazione dell'anidrite liberava le impurezze insolubili contenute al suo interno (essenzialmente particelle di argilla) che, assieme ai piccoli frammenti delle formazioni sottostanti, andavano a sedimentarsi con la calcite e la dolomite di neoforma-

Fig. 5 – A) Tanone Grande della Gacciolina (Alta Val di Secchia, Reggio Emilia): letto del fiume completamente ricoperto di uno spesso crostone calcitico (Foto: Paolo Forti); B e C) il meccanismo basato sulla dissoluzione incongruente dell'anidrite che permette alle acque dei torrenti sotterranei di mantenere a lungo la loro sovrassaturazione rispetto al carbonato di calcio e che porta quindi alla formazione di lunghi tratti di letti concrezionati (da FORTI 2017, modificata).



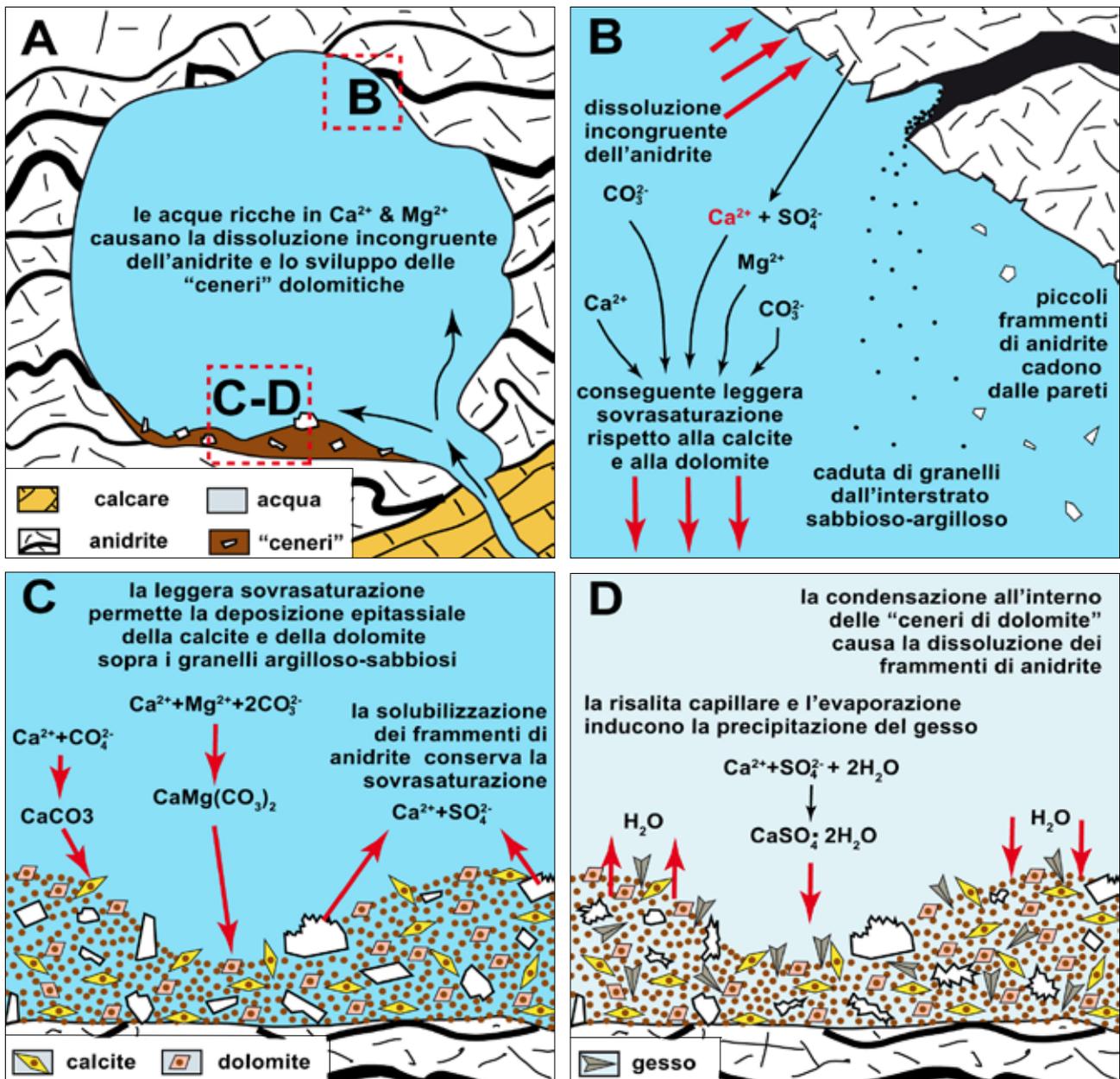


Fig. 6 – Meccanismo genetico che permette lo sviluppo delle "ceneri di dolomite" (da FORTI 2017, modificata).

zione (Fig. 6C).

È anche possibile che alcuni dei rari cristalli di gesso presenti nelle "ceneri dolomitiche" si siano depositati mentre si scioglieva l'anidrite, a causa del fatto che il gesso, a basse temperature, è meno solubile dell'anidrite stessa (HARDIE, 1967). In ogni caso, è assai più probabile che il gesso abbia iniziato a formarsi quando queste grotte sono diventate vadose e quindi i processi di condensazione-evaporazione si sono attivati (Fig. 6D).

Grotte nei gessi

Grazie soprattutto alle ricerche e agli studi condotti in Italia (FORTI, 1996; 2017) adesso si è consapevoli

che queste cavità possono ospitare concrezioni uniche e nuovi minerali di grotta. Occorre tuttavia precisare che pochissime ricerche sono state effettuate negli ultimi due decenni e, cosa ancora più grave, nessuna in aree carsiche gessose che non fossero già state oggetto di studio.

Attualmente sono state, almeno parzialmente, studiate solo 14 aree (Fig. 1), che non rappresentano più del 10% delle aree carsiche gessose mondiali. La loro distribuzione certo è sufficiente a rappresentare le differenti zone climatiche del nostro pianeta, ma una futura maggiore copertura sarebbe utilissima per aumentare in modo significativo la nostra conoscenza sui depositi chimici delle grotte in gesso. Attualmente

sono state descritte molte concrezioni particolari, sia di gesso che di calcite, e osservati ben 38 minerali di grotta di cui 7 esclusivi di questi ambienti (buserite, cloromagnesite, gaylussite, howlite, inderite, inyoite, e ulexite) a cui devono essere aggiunti 3 gruppi di composti indifferenziati (FORTI, 2017) (Fig. 8 alle pagg. 20 e 21).

Le concrezioni

La presenza di concrezioni all'interno delle grotte in gesso era stata già documentata alcune centinaia di anni addietro da Ulisse Aldrovandi nel suo *Musaeum Metallicum* (1648), dove era stata descritta una stalattite di calcite da lui campionata in una grotta (non specificata) nei pressi di Bologna (Fig. 7). Aldrovandi diede alla stalattite il nome di "stelechite" (dalla parola del greco antico *στηλεκος* che significa tronco). Come nel primo lavoro generale sulle concrezioni delle grotte in gesso (FORTI, 1996), vengono qui di seguito trattate separatamente le concrezioni in calcite e quelle in gesso.

Speleotemi di calcite

Le concrezioni di calcite sono abbastanza comuni nelle grotte in gesso e il loro sviluppo relativo è strettamente correlato al clima dell'area in cui si sono sviluppate le cavità (CALAFORRA & FORTI, 1999; COLUMBU *et al.*, 2015): il massimo sviluppo si riscontra in quelle delle aree temperate continentali e tropicali umide, mentre le concrezioni carbonatiche diminuiscono rapidamente andando verso climi freddi o aridi.

Il meccanismo di formazione di queste concrezioni, comunque, è del tutto differente da quello che genera gli analoghi depositi nelle grotte in calcare, che notoriamente si sviluppano per la diffusione della CO₂ nell'atmosfera di grotta, con conseguente precipitazione del CaCO₃ che già saturava la soluzione. Questo dipende dal fatto che nelle grotte in gesso la diffusione della CO₂ nell'atmosfera di grotta spesso non è in grado di funzionare perché quasi tutte le aree carsiche gessose fino ad ora studiate sono affioranti e quindi non è possibile, per le acque di percolazione, arricchirsi in calcite prima di arrivare in contatto con i gessi.

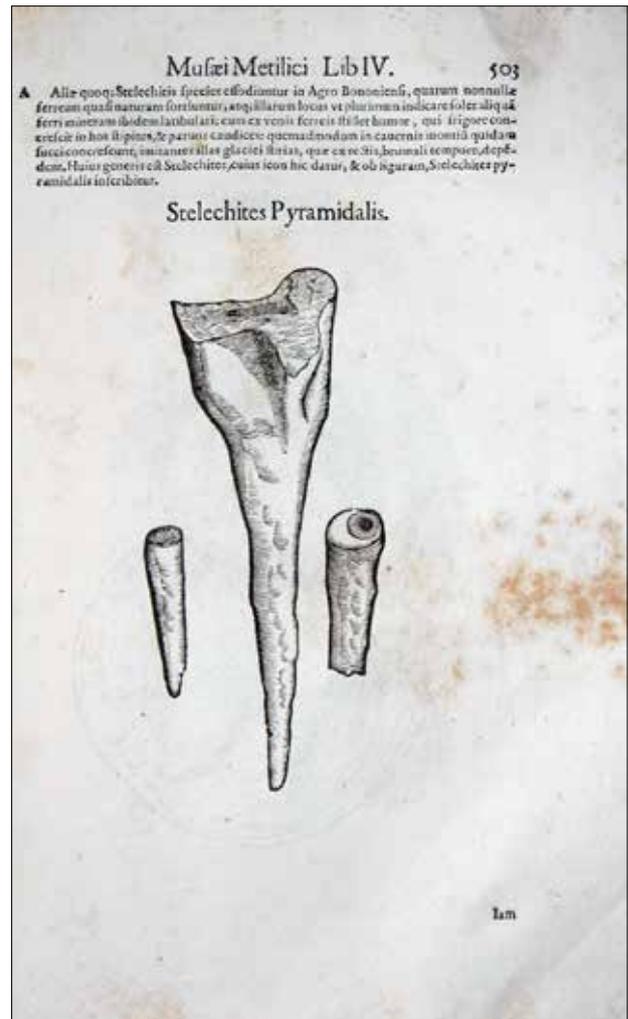
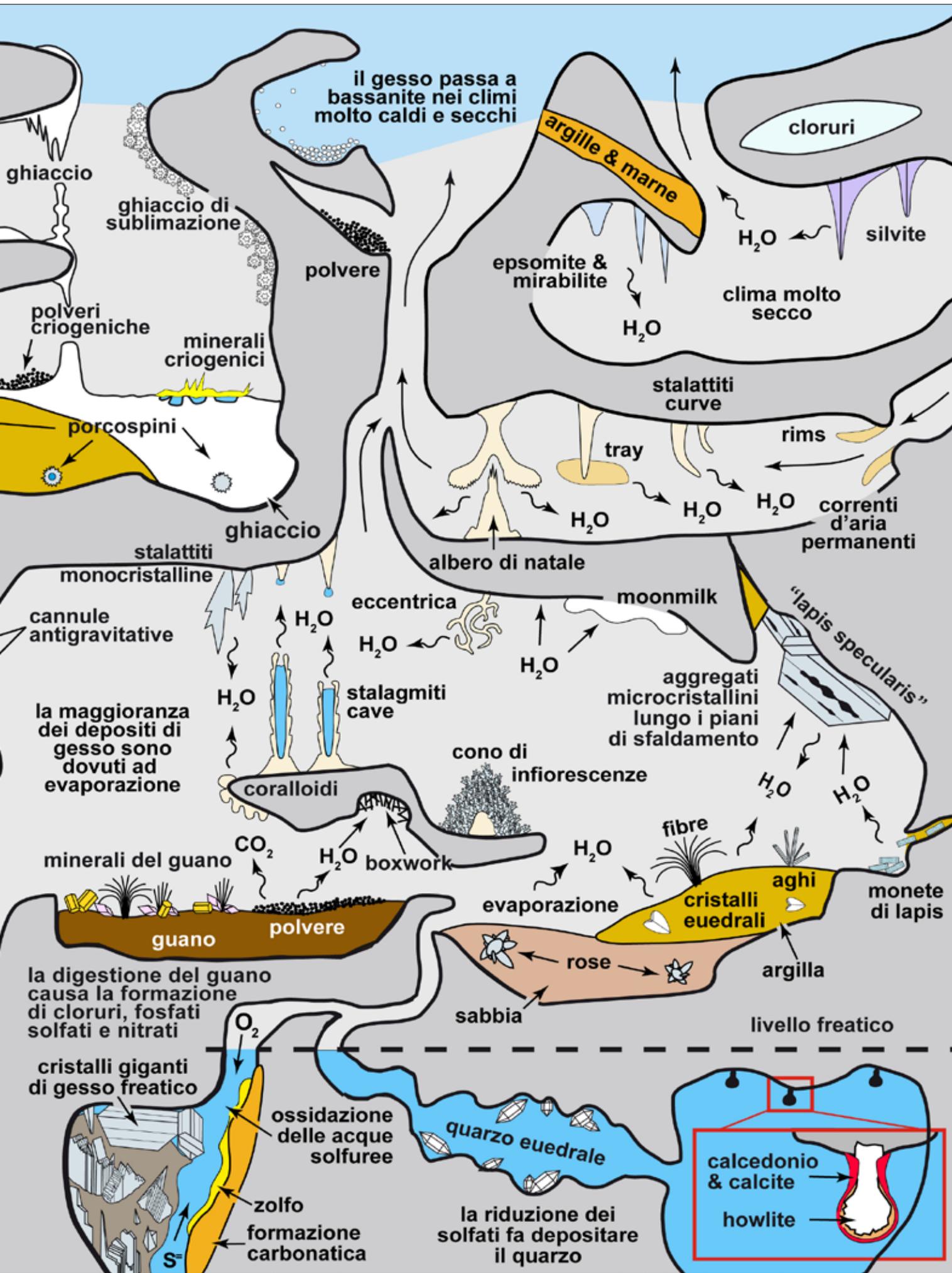


Fig. 7 – Il frontespizio del *Musaeum Metallicum* e la pagina in cui è rappresentata la stelechite delle grotte in gesso di Bologna.



Pertanto il processo normale che permette la deposizione della calcite all'interno della cavità gessose è normalmente la "dissoluzione incongruente" (FORTI & RABBI, 1981), processo che si basa sul fatto che il carbonato di calcio è molto meno solubile del gesso. Pertanto, quando un'acqua ricca in anidride carbonica entra in contatto con il gesso lo solubilizza, ma rapidamente diviene sovrassatura rispetto alla calcite che quindi è costretta a precipitare. Questo processo continua fintantoché tutto l'eccesso di CO_2 non è stato consumato e, ovviamente, sottraendo ioni Ca^{2+} dalla soluzione costringe nuovo gesso a sciogliersi: in pratica, di mano in mano che la calcite precipita, nuovo gesso si scioglie (da qui il nome appunto di "dissoluzione incongruente" perché si scioglie una sostanza e ne precipita una differente) (Fig. 9).

Se, come già accennato, nella maggioranza dei casi la diffusione dell'anidride carbonica nell'atmosfera di una grotta in gesso è inefficace ai fini della formazione di concrezioni carbonatiche, va comunque ricordato che il processo inverso, la diffusione dall'atmosfera ad una soluzione satura di gesso, può invece produrre la formazione di depositi calcarei, come nel caso della calcite flottante (FORTI, 2003), che verrà trattato più avanti.

I processi che permettono lo sviluppo dei due depositi chimici principali (CaCO_3 e $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) nelle grotte in gesso sono totalmente differenti (dissoluzione incongruente per il carbonato di calcio ed evaporazione per il solfato di calcio), che pertanto risentono in maniera del tutto diversa del clima dell'area.

Questo è particolarmente evidente in quelle aree in cui è attivo il processo di dissoluzione incongruente, dato che, come accennato precedentemente, quella reazione si sviluppa non appena l'acqua di infiltrazione

meteorica affiora all'interno della grotta in gesso.

Se si considerano infatti due aree in cui le grotte sono sviluppate in formazioni identiche (gessi messiniani), mentre il clima è leggermente differente (Gessi bolognesi, con clima temperato umido, e Gessi siciliani, con clima temperato secco e temperature medie superiori di 3-4 gradi) l'effetto sulla formazione, per dissoluzione incongruente, delle croste carbonatiche sopra il gesso è molto differente. In pratica nelle grotte del bolognese queste concrezioni sono molto diffuse, mentre nei Gessi siciliani lo sono molto meno. Inoltre, mentre nei Gessi bolognesi il processo è costante per tutto l'anno, in Sicilia, nei periodi secchi, l'evaporazione è assai elevata, tanto da permettere in alcuni casi lo sviluppo di gesso secondario, esattamente nel punto dove generalmente si originano le croste di calcite (Fig. 10).

In pratica: durante il periodo umido (Fig. 10C), il flusso di acqua meteorica ricca in CO_2 causa la rapida dissoluzione della roccia gessosa, con formazione delle croste di calcite parzialmente distaccate dalla roccia stessa, mentre nei vuoti residui si depositano le impurezze (essenzialmente particelle argillose). Nel periodo secco e caldo, invece, l'acqua intrappolata all'interno delle masserelle argillose, ovviamente satura di gesso, ma depauperata di CO_2 , risale per capillarità ed evapora (Fig. 10D), causando così il progressivo sviluppo di sottili fibre di gesso che, incurvandosi, danno luogo allo sviluppo di delicate infiorescenze di gesso fibroso (Fig. 10B). Con ogni probabilità queste delicatissime strutture, poi, non sopravvivono a lungo e vengono completamente demolite per erosione e/o dissoluzione, non appena ricomincia la stagione umida.

Sfruttando quindi la forte dipendenza climatica dei

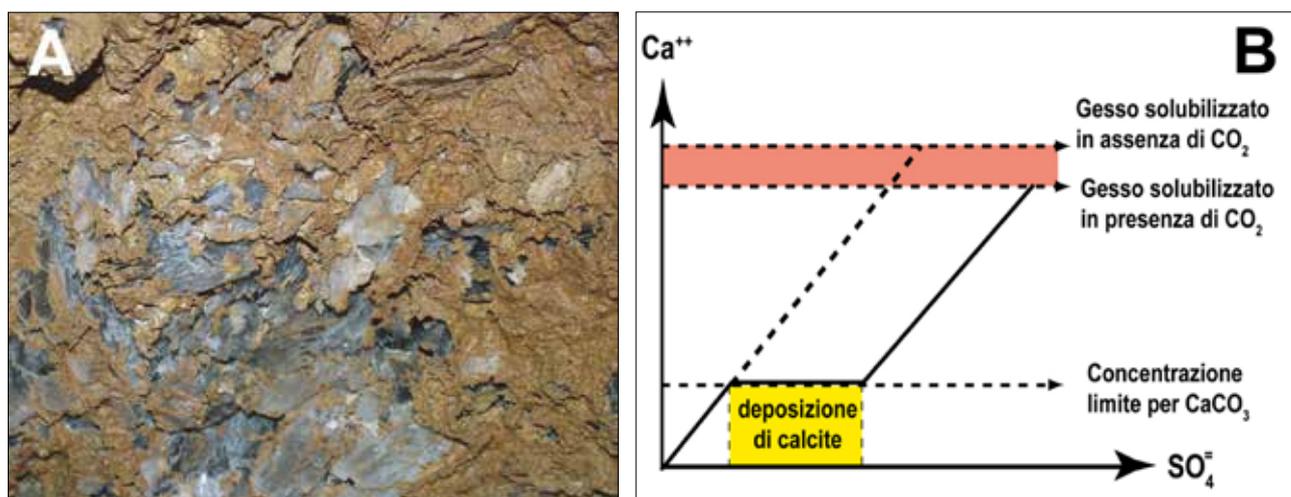


Fig. 9 – A) Grotta Novella (Gessi Bolognesi): è evidente che mentre si deposita la concrezione di calcite al di sopra della superficie del gesso, quest'ultima viene aggredita e sciolta a causa della dissoluzione incongruente (Foto: Paolo Forti); B) concentrazione relativa dello ione Calcio e dello ione Solfato nella soluzione mentre è attiva la dissoluzione incongruente.

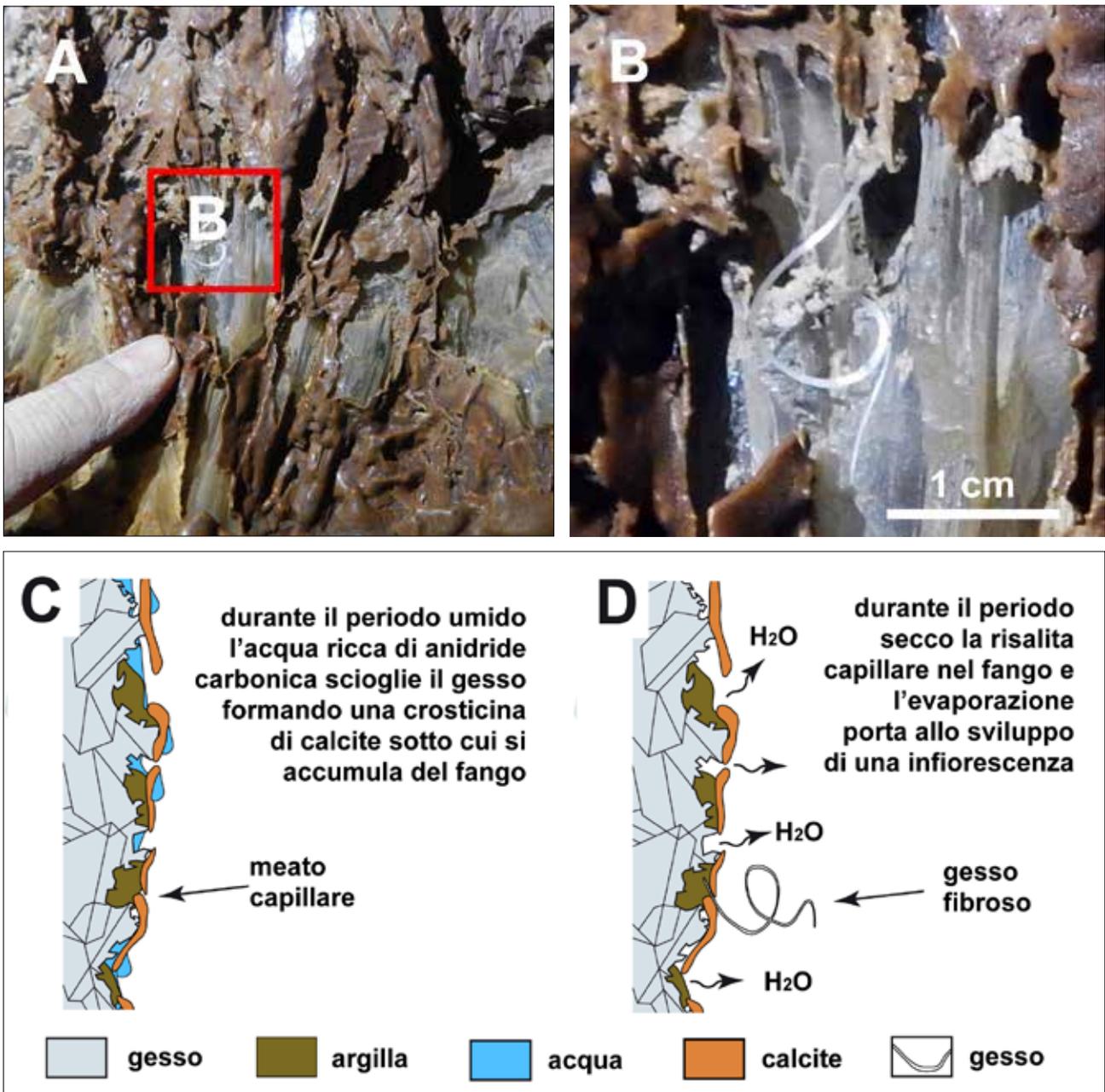


Fig. 10 – Inghiottoio di Monte Conca, Sicilia: A) parete sottoposta nella stagione umida a forte stillicidio e quindi rapidamente sciolta con conseguente deposito di crosticine di calcite, sotto cui si accumulano le impurezze argillose originariamente presenti nei cristalli di gesso; B) particolare di A per evidenziare la presenza di una eccentrica di gesso fibroso secondario (Foto: Marco Vattano); C) in periodo umido si sviluppano le croste di calcite per dissoluzione incongruente; D) in periodo secco possono svilupparsi per evaporazione lenta eccentriche stagionali di gesso fibroso.

depositi di calcite e gesso, è stato possibile elaborare un metodo sperimentale per la ricostruzione dei paleoclimi che hanno interessato una data area gessosa. Tale metodo (CALAFORRA & FORTI, 1999, CALAFORRA *et al.*, 2009, GAZQUEZ *et al.*, 2020) si basa sull'analisi del rapporto quantitativo esistente tra concrezioni carbonatiche e gessose che si trovano all'interno delle cavità: infatti questo, almeno in linea teorica, è una diretta conseguenza del clima al momento della loro deposizione e pertanto una loro variazione nel tempo indica con chiarezza una marcata modificazione cli-

matica (Fig. 11).

Nelle grotte in gesso gli speleotemi di calcite normalmente crescono più in fretta che nelle cavità in calcare (fino a 1 mm ogni anno, DALMONTE & FORTI, 1995): questo perché l'efficienza del meccanismo della dissoluzione incongruente è molto maggiore rispetto a quella della normale diffusione della CO_2 nell'atmosfera di grotta.

D'altro canto, però, data la epidermicità di molte delle grotte gessose, l'evoluzione degli speleotemi di calcite è strettamente controllata dal regime delle acque di

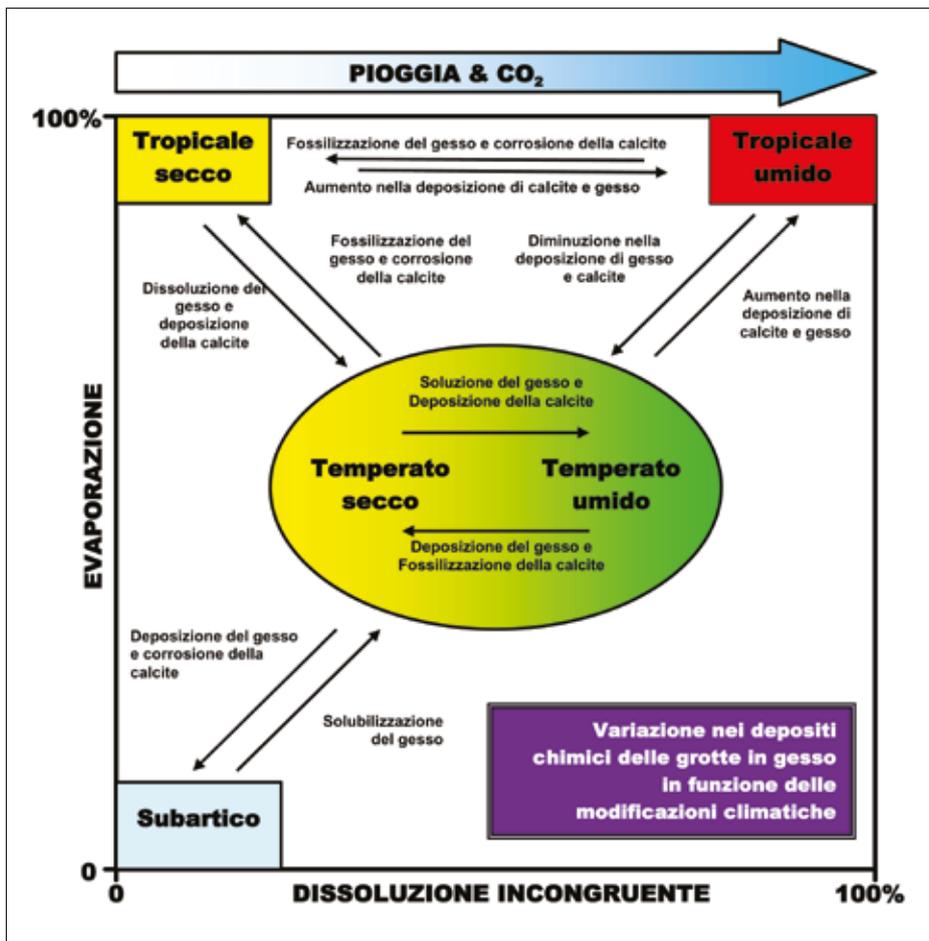


Fig. 11 – Schema riassuntivo delle variazioni percentuali nelle concrezioni di gesso e di calcite indotte dal clima dell'area (da CALAFORRA & FORTI, 1999, modificata).

alimentazione, che può fare sì che una stessa pioggia possa indurre processi opposti sulle concrezioni attive presenti in grotte che si aprono nella stessa area. È stato infatti dimostrato sperimentalmente (DALMONTE *et al.*, 2003) che, mentre alcuni speleotemi rimanevano attivi, altri subivano invece una parziale corrosione. Questo fenomeno è comunque ristretto alle concrezioni che si sviluppano molto vicino alla superficie esterna (da 1-2 metri ad un massimo di 10-15 al di sotto), mentre quelle che si trovano più in profondo non sono in alcun modo interessate dalla corrosione temporanea.

Accade in effetti che, durante i forti temporali, il contatto tra la roccia gessosa e l'acqua di infiltrazione rapida sia molto basso e pertanto la reazione di solubilizzazione risulti poco efficiente e tale da non riuscire a raggiungere la saturazione rispetto alla calcite. Questo fa sì che l'acqua ancora aggressiva rispetto al CaCO_3 , quando arriva in contatto con la concrezione, la corrode parzialmente.

La corrosione degli speleotemi carbonatici, in questo caso generalizzata, può avvenire anche durante i lunghi periodi di siccità, quando si attiva il fenomeno della condensazione direttamente sulla superficie delle concrezioni di calcite, impedendo così alla CO_2 disciolta di essere neutralizzata dalla dissoluzione in-

congruente (Fig.12).

Quanto appena detto è confermato dal fatto che la porzione della concrezione che si sta corrodendo ha perso la sua colorazione marron-rossiccia, che invece è ancora ben visibile nella sua parte superiore. Tale colorazione è infatti data dalla presenza di acidi umici e fulvici intrappolati nella struttura cristallina della calcite (altrimenti incolore).

Questi acidi organici, quando vengono in contatto con l'atmosfera di grotta, sono rapidamente ossidati con liberazione di CO_2 che da un lato contribuisce ad aumentare la corrosione della concrezione, e dall'altro causa la scomparsa della colorazione marron-rossiccia. Un esempio classico di questo fenomeno è dato dalla formazione di pisoliti bianche (Fig. 13A) cresciute al di sopra di una colata giallo-rossiccia nella Grotta Risorgente del Rio Basino, nella Vena del Gesso romagnola (FORTI & LUCCI, 2016). A differenza della Grotta Novella, dove la CO_2 prodotta corrodeva la concrezione, nel Rio Basino, in presenza di acqua già chiaramente concrezionante, si è avuta la deposizione di carbonato di calcio puro (privo quindi al suo interno di acidi umici e fulvici che sono agenti cromofori). In questo caso va poi notato che il processo di ossidazione degli acidi umici è stato sicuramente più efficiente (Fig. 13B) grazie alla turbolenza dell'acqua,

che gocciolava esattamente sulle pisoliti bianche della vaschetta, e che ha quindi permesso una maggiore ossigenazione esattamente in quel punto. Allontanandosi progressivamente dal punto di impatto si possono osservare pisoliti debolmente giallastre e, via via, concrezioni sempre più colorate di giallo-rossiccio.

Infine, sempre nelle grotte in gesso sviluppate vicino alla superficie esterna, può succedere che un singolo evento di pioggia possa indurre lo sviluppo di una nuova lamina di accrescimento invece che causare, come normalmente avviene nelle grotte in calcare, l'ingrossamento della lamina precedente. Questo dipende dal fatto che nelle grotte in gesso epidermiche (come quelle dell'Emilia-Romagna o di Santa Ninfa in Sicilia, ma anche a Sorbas, in Spagna) la percolazione delle acque di precipitazione meteorica è molto rapida e quindi il flusso a livello delle concrezioni di calcite si interrompe poche ore o pochi giorni dopo la fine dell'evento piovoso (Fig. 14).

A questo punto, se l'intervallo di tempo prima della pioggia successiva è abbastanza lungo, la superficie esterna dello speleotema può asciugarsi completamente e quindi un nuovo apporto d'acqua può causare, almeno teoricamente, lo sviluppo di una nuova banda di accrescimento. È esattamente ciò che è accaduto alla concrezione che si è formata sopra un filo di nylon abbandonato per circa 20 anni sopra una colata attiva dell'Inghiottitoio dell'Acquafredda (Gessi Bolognesi), la cui analisi ha evidenziato la presenza di oltre 500 lamine (CAZZOLI *et al.*, 1988) (Fig. 14B).



Fig. 12 – Grotta Novella (Gessi Bolognesi): particolare della colata presente in un camino vicino all'ingresso: la parte in alto a sinistra è attiva e in accrescimento mentre quella in basso a destra è fortemente corrosa dalle acque di condensazione, come dimostrano i piccoli solchi lungo la sua superficie (Foto: Paolo Forti).

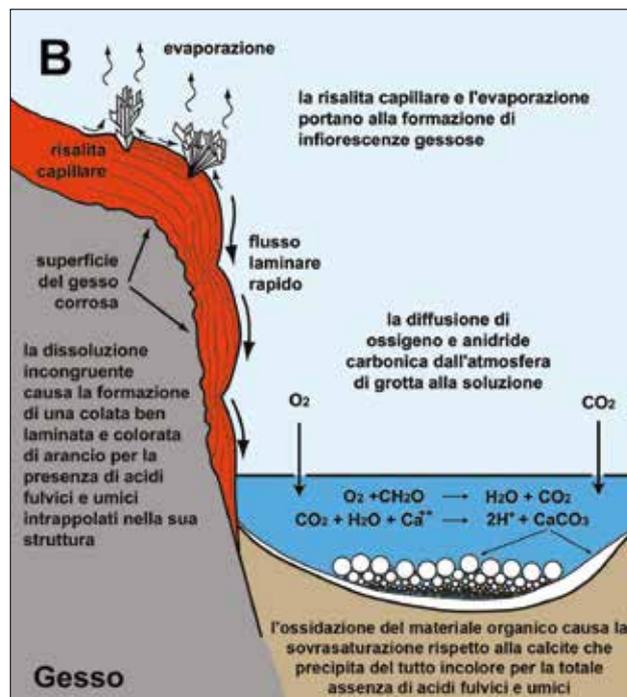
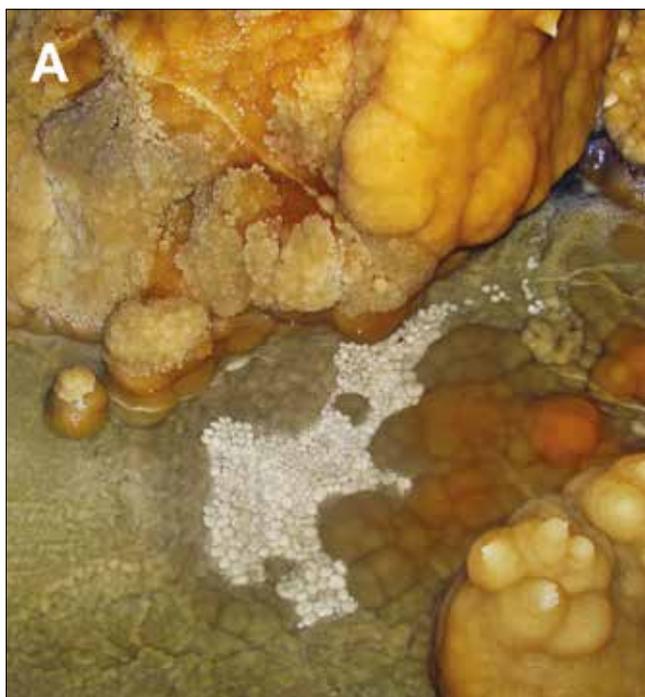


Fig. 13 – A) le pisoliti bianche nella Grotta Risorgente del Rio Basino, nella Vena del Gesso romagnola (Foto: Piero Lucchi); B) lo schema evolutivo delle stesse, basato sulla lenta ossidazione del materiale organico trasportato dalle acque che, dopo aver accresciuto la colata, alimentano la vaschetta (da FORTI & LUCCI 2010, modificata).

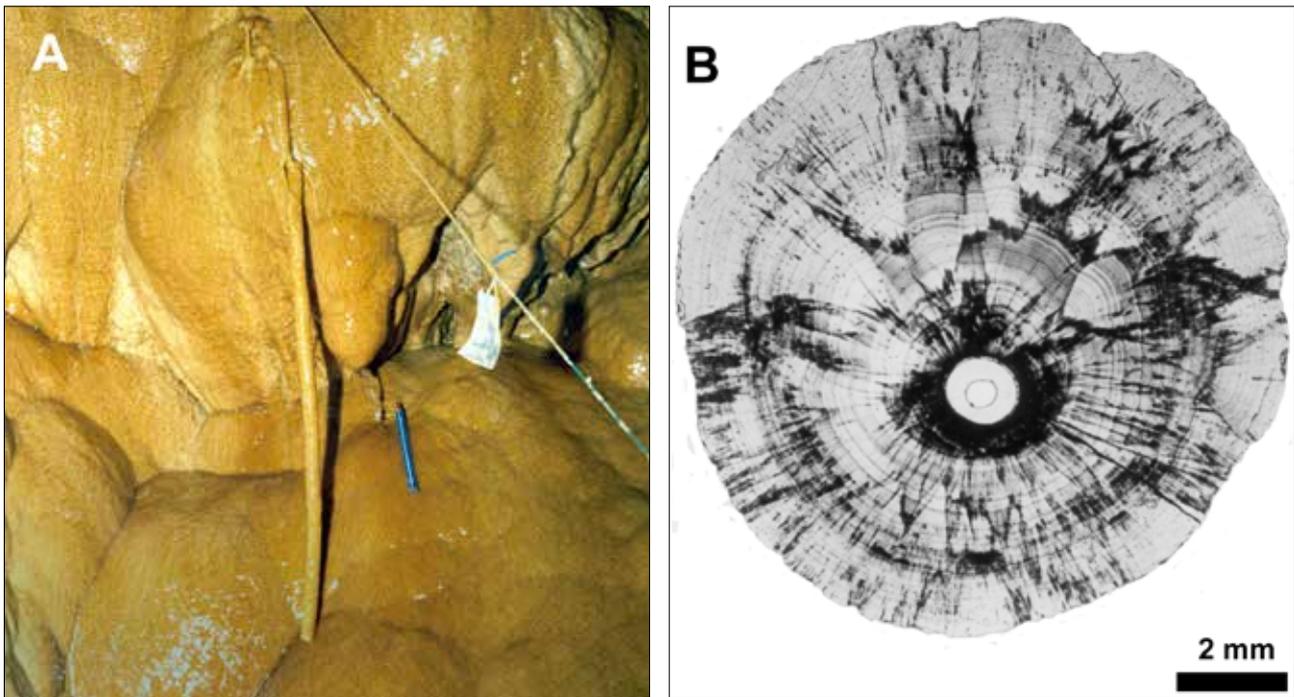


Fig. 14 – Inghiottitoio dell’Acquafredda (Gessi Bolognesi): A) la concrezione sviluppatasi nell’arco di 20 anni su un filo di nylon utilizzato per il rilievo (Foto: Mariangela Cazzoli); B) al microscopio la sezione sottile della concrezione ha evidenziato la presenza di oltre 500 bande di accrescimento che sono state perfettamente correlate con i principali eventi piovosi occorsi nell’area in quel periodo (Foto: Paolo Ferrieri).

Concrezioni carbonatiche peculiari dell’ambiente gessoso

Nei gessi le concrezioni di calcite più comuni sono le stalattiti, le colate, le concrezioni da splash e le pisoliti: di solito questi speleotemi non mostrano alcuna differenza morfologica da quelli che si sviluppano invece in grotte carbonatiche (MAKSIMOVICH, 1969).

Esistono tuttavia alcune concrezioni che, per forma e/o meccanismo genetico, sono del tutto peculiari dell’ambiente gessoso e che quindi, almeno sino ad oggi, sono state osservate esclusivamente in questo ambiente: in particolare le “lame di calcite”, le bolle e semibolle, un tipo di calcite flottante, le colate biogeniche, le concrezioni su radici o “rootsicles” e gli aggregati criogenici (Tab. 2).

Lo sviluppo di tutti questi particolari speleotemi, che verrà qui di seguito brevemente discusso, è controllato dal rapporto esistente tra la solubilità della calcite e quella del gesso, ma solo uno (le “lame di calcite”) si forma come conseguenza diretta della dissoluzione incongruente, mentre gli altri 6 sono il risultato dell’aumento locale della concentrazione dell’anidride carbonica disciolta.

Le lame

La dissoluzione incongruente è responsabile della formazione non soltanto, come già detto, della stragrande maggioranza delle “normali” concrezioni di

calcite che si osservano nelle grotte in gesso, ma anche di particolari, e a volte grandiose, croste di concrezione carbonatica quasi completamente distaccate dalla parete di gesso, che risulta essere fortemente disciolta tanto che queste “lame di calcite”, come venivano chiamate dagli speleologi bolognesi nei primi anni ’60 del secolo scorso, sono ancora ancorate alla roccia gessosa esclusivamente in pochissimi punti. Una curiosa loro caratteristica è poi quella di presentare sempre al loro interno un sottile strato di fango (FORTI & RABBI, 1981).

Nel tempo lame del tutto analoghe a quelle del bolognese sono state scoperte anche nelle grotte del diapiro gessoso di Punta Alegre a Cuba (CHIESI *et al.*, 1992) e a Sorbas in Spagna (CALAFORRA, 1996).

La più grande di queste “lame di gesso” (alta 14 m, larga fino a 3 metri, ma spessa appena 10 cm) è stata scoperta all’interno della Grotta Novella nei Gessi bolognesi (Fig. 15A).

La loro formazione inizia quando un’acqua ancora sottosatura rispetto al gesso fluisce con moto laminare sopra una parete subverticale: ovviamente il gesso viene solubilizzato, ma le particelle argillose, un tempo inglobate nella roccia, non possono essere prese in sospensione dalla soluzione per mancanza di energia cinetica sufficiente e quindi rimangono depositate sulla superficie del gesso. Contemporaneamente però la dissoluzione incongruente fa depositare il carbona-

Nome	Meccanismo genetico	Prima citazione
Lame di calcite	Dissoluzione incongruente	FORTI & RABBI, 1981
Bolle	Diffusione della CO ₂ da una schiuma stazionaria	ERCOLANI <i>et al.</i> , 2013
Mezze bolle	Diffusione della CO ₂ da una schiuma stazionaria	FORTI & CHIESI, 1995
Calcite flottante	Diffusione di CO ₂ dall'atmosfera di grotta nella soluzione	FORTI, 2003
Colate biogeniche	CO ₂ prodotto dalla respirazione di organismi viventi	POLUZZI & MINGUZZI, 1998
"Rootsicles"	CO ₂ prodotto dalla respirazione di organismi viventi	FORTI, 1996
Aggregati criogenici	Cristallizzazione frazionata da congelamento	ANDREYCHOUK <i>et al.</i> , 2017

Tab. 2 – Speleotemi di calcite peculiari delle grotte in gesso e loro meccanismi genetici.

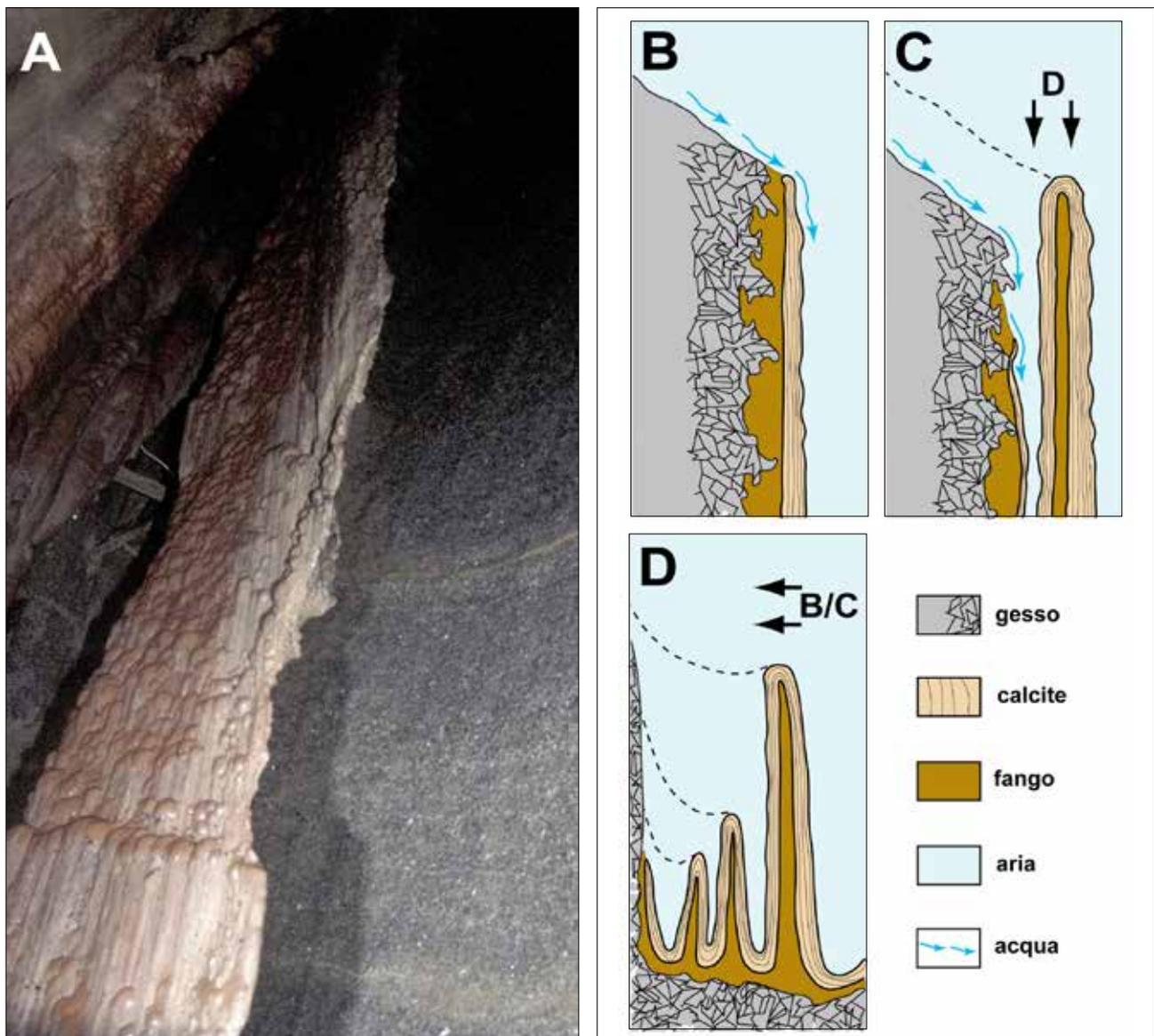


Fig. 15 – A) la grande lama di gesso della Grotta Novella: la dissoluzione della parete di gesso su cui la lama aveva iniziato a formarsi ha causato un arretramento della stessa di quasi 2 m (Foto: Sandro Mandini); B) il flusso idrico causa la dissoluzione incongruente della parete di gesso e la deposizione di una colata di calcite mentre il fango rimane intrappolato tra colata e parete in dissoluzione; C) l'arretramento progressivo della parete causa l'evoluzione di una prima lama di calcite; D) la prosecuzione del processo porta allo sviluppo di una serie di lame subparallele (da FORTI 2017, modificata).

to di calcio al di sopra dell'eventuale sottile strato di gesso (Fig. 15B) (FORTI & RABBI, 1981).

Continuando il processo di dissoluzione del gesso, e quindi l'arretramento della parete, ad un certo punto l'acqua riesce ad infilarsi tra la parete stessa e lo strato di fango, permettendo quindi la deposizione del carbonato di calcio anche sull'altro lato del deposito di argilla. In pratica inizia la formazione di una vera e propria lama di calcite che progressivamente si allontana dalla parete di gesso (Fig. 15C). Lo stesso processo si può ripetere varie volte cosicché si ottengono una serie di sottili bande di calcite tutte subparallele le une alle altre (Fig. 15D).

Le mezze bolle

Si tratta di un particolare tipo di calcite flottante che deve il suo nome al meccanismo genetico che le ha generate (FORTI & CHIESI, 1995). A tutt'oggi è stato osservato esclusivamente in una grotta al mondo: Grave Grubbo nei gessi di Verzino in Calabria.

Questo speleotema, originariamente chiamato "gusci galleggianti", è formato di una serie di semi-bolle (da 3 a 25 mm di diametro e di spessore attorno a 0,5 mm) di calcite microcristallina che si sono cementate tra loro e che galleggiano sulla superficie di un laghetto del fiume sotterraneo (Fig. 16A). Lo specchio d'acqua in cui si sono formate è caratterizzato dalla presenza di una schiuma particolarmente consistente a livello della piccola cascatella che lo alimenta.

La loro genesi è indotta dalla presenza, all'interno dell'acqua, di una grande quantità di materiale organico, la cui ossidazione produce una schiuma molto persistente (Fig. 17.1) soprattutto a livello della cascatella, dove è massima la miscela con l'ossigeno dell'atmosfera di grotta. L'aria intrappolata all'interno delle bolle di schiuma risulta essere particolarmente ricca di CO₂ che, reagendo con l'acqua satura di gesso delle pareti delle bolle, causa la formazione di microscopici cristalli di calcite (Fig. 16B). La gravità li fa progressivamente sedimentare nella parte inferiore della bolla (Fig. 16B e 17.2), dove la sovrasaturazione residua li cementa l'uno con l'altro, fino a creare una concrezione unica (una semibolla appunto). Proseguendo la precipitazione i gusci delle bolle a contatto tendono a saldarsi assieme e a formare un'unica concrezione (Fig. 17.2, 17.3) e da quel momento il punto di contatto tra le due semibolle di calcite tende progressivamente ad alzarsi e ad ispessirsi, anche grazie alla tensione superficiale della parete delle bolle. Il processo continua con la cementazione di varie semibolle ma, ad un certo punto, viene bruscamente interrotto dal collasso delle bolle di schiuma (Fig. 17.3), spesso indotto dalle goccioline di splash create dalla turbolenza della cascatella che alimenta il laghetto.

In questo modo la concrezione così formatasi, grazie alla sua conformazione concava e alla sua leggerezza, riesce facilmente a galleggiare sull'acqua e pertanto può proseguire nel suo sviluppo, che, da questo momento in poi, è limitato al bordo esterno dove l'acqua del laghetto risale per capillarità e, evaporando, lo ispessisce ed innalza (Fig. 17.4).

Lesistenza di questi particolari speleotemi è comunque effimera: infatti le ricorrenti piene del torrente sotterraneo li distruggono o comunque li fanno affondare trasformandoli in normali frammenti di calcite flottante sul fondo del laghetto.

Le bolle

Questo tipo di speleotemi è stato osservato di recente e attualmente sembra ristretto a due sole grotte della Vena del Gesso romagnola: la Grotta Grande dei Crivellari e l'Abisso Mornig (ERCOLANI *et al.*, 2013).

Si tratta di piccole, e spesso quasi perfettamente sferiche, concrezioni di calcite con un diametro che varia da 2 ad un massimo di 8-9 mm. La loro principale caratteristica è che, al di sotto della crosta di calcite microcristallina (di spessore costante di circa 1 mm), sono del tutto vuote.

In ambedue le cavità in cui sono state osservate, le bolle si sono sviluppate su piccoli blocchi di gesso (Fig. 18A) che vengono sommersi dalle piene occasionali del torrente sotterraneo (Fig. 18B), con conseguente formazione di piccoli alveoli da dissoluzione ed erosione sulla loro superficie superiore.

Quando le acque di piena si ritirano, lasciano poi su tali massi un sottile strato di fango argilloso-siltoso molto ricco di materiale organico, che funge da substrato per lo sviluppo delle bolle di calcite (Fig. 18C). Data la loro fragilità, comunque, le bolle di calcite sono speleotemi effimeri destinati ad esistere solo nell'intervallo tra una piena e quella successiva, dato che l'energia di quest'ultima è più che sufficiente a distruggerle completamente ogniqualvolta superi il livello della superficie superiore del masso di gesso su cui si sono sviluppate. Come nel caso appena trattato delle semi-bolle, la genesi delle bolle presuppone la presenza del fango e di acqua ambedue ricchi di materia organica, anche se in questo caso la bolla non galleggia, ma si sviluppa esclusivamente all'interno di uno dei tanti alveoli che caratterizzano la superficie del masso di gesso (Fig. 19A). Solamente all'interno delle depressioni è infatti possibile che si formi una bolla stazionaria, mentre dove il fango è sub-orizzontale si assiste alla deposizione di crosticine di carbonato di calcio prodotte dal meccanismo di dissoluzione incongruente. La calcificazione avviene anche all'interno del fango stesso che quindi viene parzialmente trasformato in concrezione carbonatica.

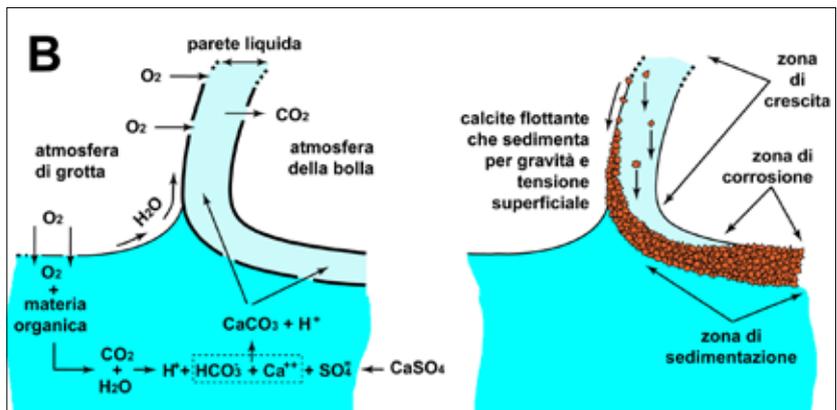
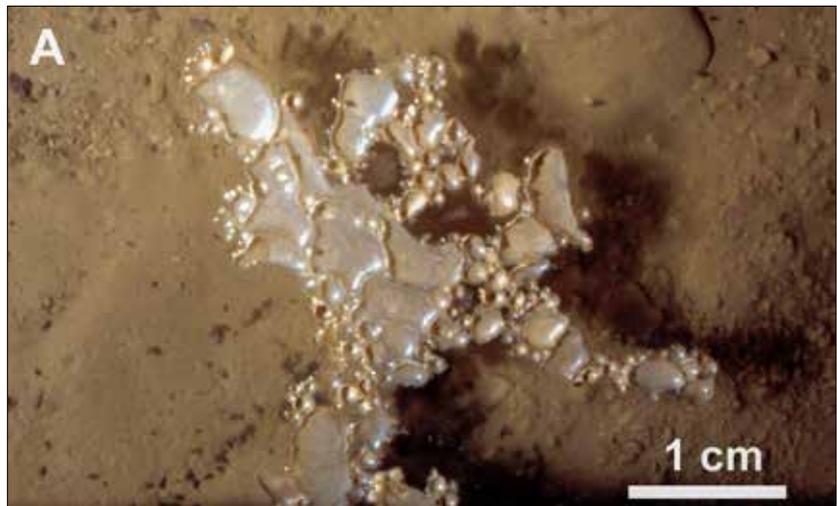


Fig. 16 – A) Grotta di Grave Grubbo (Verzino): le semibolle di calcite sulla superficie del laghetto (Foto: Paolo Forti); B) il meccanismo che permette lo sviluppo dei microcristalli di calcite che formeranno le semibolle (da FORTI, 2017, modificata).

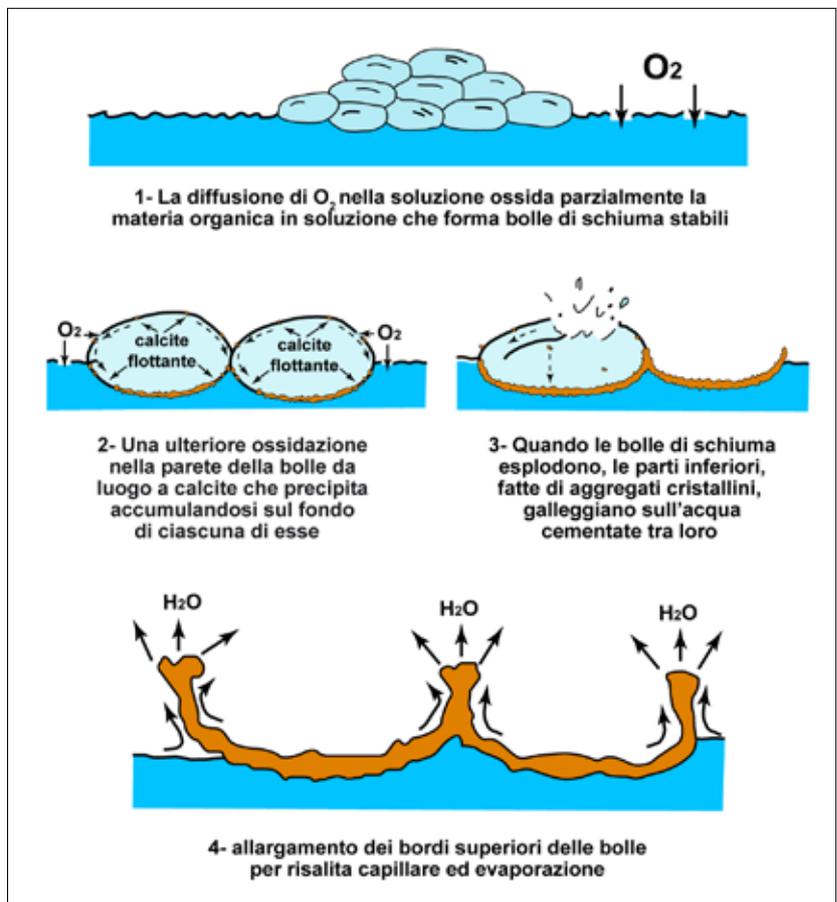


Fig. 17 – Evoluzione delle semibolle di Grave Grubbo: 1) formazione della schiuma stazionaria nell'acqua ricca di materiale organico; 2) la CO_2 prodotta dai processi ossidativi causa la formazione di microcristalli di calcite che si accumulano sul fondo della bolla; questo processo porterà alla fusione tra semibolle adiacenti; 3) il collasso della bolla di schiuma fa galleggiare i gusci vuoti sull'acqua; 4) da quel momento in poi le semibolle evolvono solo ingrossando i loro bordi superiori per risalita capillare ed evaporazione (da FORTI & CHIESI, 1995, modificata).

Lo sviluppo delle bolle comincia non appena il livello dell'acqua del torrente sotterraneo scende al di sotto dell'alveolo, consentendo così all'ossigeno dell'atmosfera di iniziare ad ossidare la materia organica dell'acqua residua (Fig. 19B) e delle eventuali tracce di fango al fondo della depressione.

L'ossidazione del materiale organico dentro ognuna di queste piccole vaschette produce infatti una bolla per-

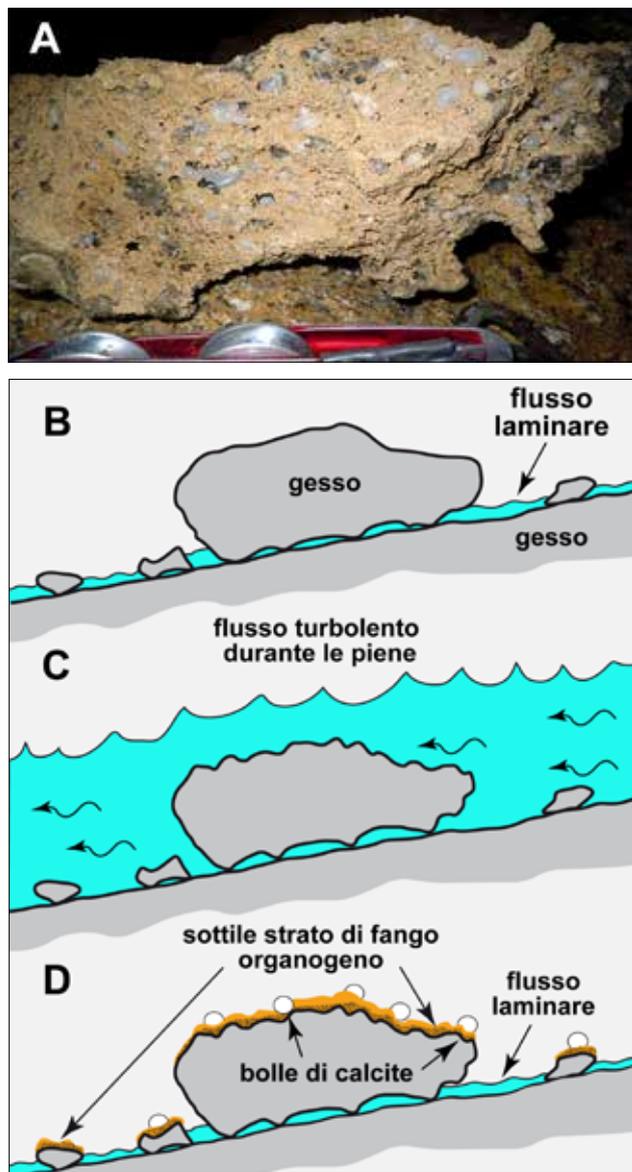


Fig. 18 – A) Abisso Mornig (Vena del Gesso romagnola): il masso di gesso ricoperto da uno straterello di fango su cui si sono sviluppate le bolle di calcite (Foto: Davide Del Borgo) e caratteristiche idrodinamiche di quel tratto di grotta: B) in condizioni di magra sul letto del torrente sotterraneo scorre solo un sottile strato di acqua con moto laminare; C) nelle brevi piene conseguenti a forti precipitazioni meteoriche il livello del fiume sotterraneo arriva a sommergere il blocco di gesso sciogliendolo ed erodendolo; D) al termine della piena l'acqua ritirandosi abbandona sul masso di gesso un sottile strato di fango organogeno su cui si sviluppano prima la schiuma ad alta persistenza e quindi le bolle di calcite. (da ERCOLANI *et al.*, 2013).

sistente che contiene un'atmosfera ricca in CO_2 che, a sua volta, reagisce con l'acqua satura di gesso causando, per dissoluzione incongruente, la formazione di microcristalli di calcite lungo la superficie della bolla stessa, con un meccanismo identico a quello descritto precedentemente per le semibolle (Fig. 17B).

Il processo continua fintantoché vi è acqua all'interno della vaschetta, dopodiché la concrezione diventa inattiva in attesa di essere distrutta da una nuova piena del torrente sotterraneo.

Le calciti flottanti con gesso

Nelle grotte in gesso delle aree a clima temperato umido (in particolare nei Gessi dell'Emilia-Romagna) è stato osservato un particolare tipo di calcite flottante (Fig. 20A), che si forma nelle pozze d'acqua, originariamente riempite da una soluzione satura di gesso, quando vengono sottoposte a prolungata evaporazione senza nessuna alimentazione (FORTI, 2003). L'analisi chimica ha infatti dimostrato che queste calciti flottanti sono costituite per oltre l'80-90% da carbonato di calcio, mentre il gesso rappresenta una frazione che non supera mai il 20% (Fig. 20B).

Il meccanismo, che porta alla formazione del carbonato di calcio a spese di una soluzione satura di gesso, è dovuto al fatto che la CO_2 necessaria a indurre la deposizione del CaCO_3 è fornita dal processo continuo di diffusione di quel gas dall'atmosfera di grotta nell'acqua che ovviamente, a causa della precipitazione di calcite, vede diminuire il suo contenuto in Ca^{2+} . In questo modo, anche se il processo di evaporazione continua, la soluzione rimane quasi costantemente leggermente sottosatura o, al massimo, satura rispetto al gesso, che quindi riesce a precipitare solo durante periodi particolari, e comunque limitati di forte diminuzione del contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera di grotta (fenomeno quest'ultimo che può manifestarsi nei periodi più freddi dell'inverno).

La calcite invece si deposita perché si ha una costante diffusione, dall'atmosfera della grotta alla soluzione, di anidride carbonica (Fig. 20C) che, legandosi agli ioni calcio, causa la sovrasaturazione rispetto al carbonato di calcio, con conseguente sua precipitazione al contatto tra la fase liquida e quella aerea perché è la zona in cui, a causa della concomitante evaporazione, la concentrazione ionica è maggiore.

Cristalli di gesso di neoformazione si formano invece all'interno del fango al fondo della vaschetta perché in quest'area l'effetto della diffusione della CO_2 è nullo e quindi anche una lieve sovrasaturazione rispetto al gesso è sufficiente a farlo precipitare.

Va notato invece che la semplice evaporazione, normalmente, non è in grado di garantire la sovrasaturazione (rispetto al solfato di calcio) necessaria alla pre-

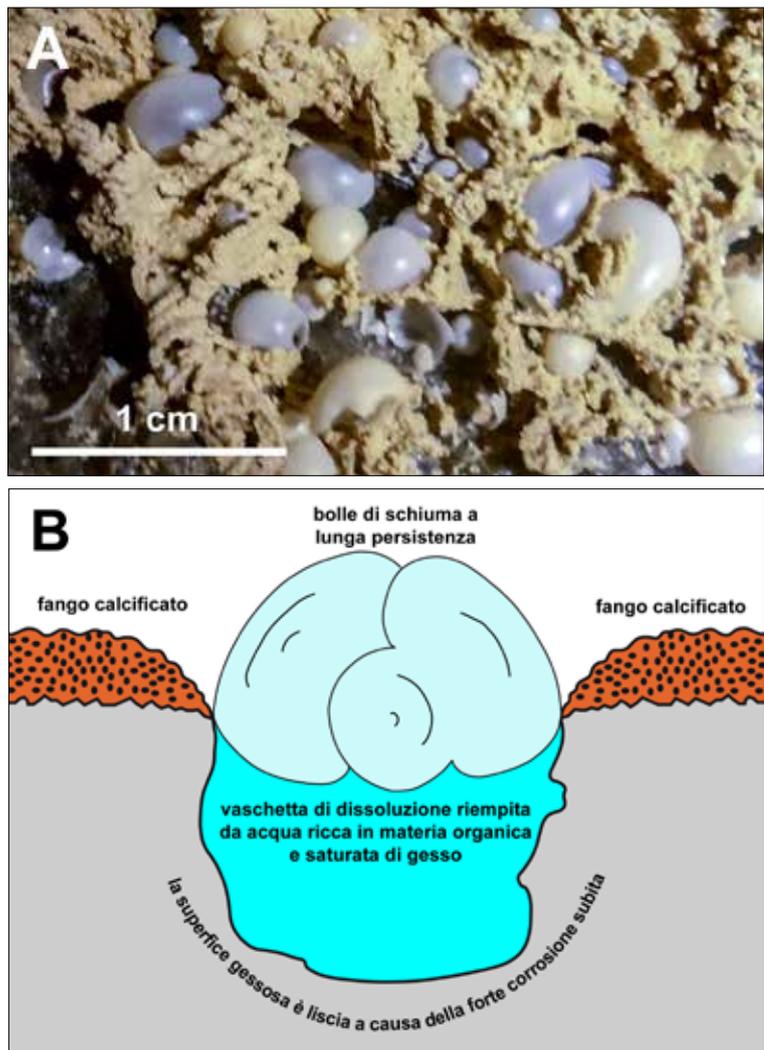


Fig. 19 – A) particolare di alcune vaschette piene di bolle di calcite dell'Abisso Mornig nella Vena del Gesso romagnola (Foto: Davide Del Borgo); B) la formazione di bolle di schiuma permanenti all'interno delle depressioni permette che si instauri il meccanismo di sviluppo delle bolle di calcite (da ERCOLANI *et al.*, 2013).

cipitazione del gesso all'interfaccia aria-acqua: infatti il processo di diffusione della CO_2 è talmente rapido da bilanciare immediatamente questo fenomeno.

Per permettere la deposizione del gesso, infatti, non è sufficiente l'evaporazione, per rapida che sia, ma bisogna che la pressione parziale dell'anidride carbonica nell'atmosfera di grotta si abbassi molto, rispetto ai valori normali, e questo può accadere solo quando i processi biologici a livello del suolo sono molto diminuiti o addirittura interrotti del tutto.

Probabilmente quindi la formazione di gesso, che ha parzialmente inglobato i cristalli di $CaCO_3$ nella faccia inferiore della calcite flottante, è avvenuta quando quest'ultima si è depositata sul fondo della vaschetta dove, protetto dalla diffusione della CO_2 dall'atmosfera di grotta, il gesso si è potuto sviluppare per risalita capillare dal fango sottostante.

Inoltre le calciti flottanti sono presenti anche in grotte delle aree calde e aride, come Sorbas in Spagna e il Nuovo Messico: questo conferma l'ipotesi che la loro formazione è essenzialmente legata al fenomeno della diffusione della CO_2 dall'atmosfera di grotta.

Questo processo, comunque, almeno nelle aree temperate umide come quelle dei Gessi dell'Emilia-Romagna, teoricamente dovrebbe limitarsi al periodo più caldo dell'anno, perché il contenuto di CO_2 nell'atmosfera di grotta è funzione diretta delle reazioni nel suolo pedologico, che a sua volta sono strettamente correlate al clima esterno (FORTI, 2017). Invece è stato osservato sperimentalmente nelle grotte del Bolognese che le calciti flottanti si sviluppano generalmente in inverno, quando l'assenza di precipitazioni meteoriche favorisce la diminuzione della umidità relativa e quindi, in ultima analisi, l'evaporazione. Processo quest'ultimo che è fondamentale per permettere all'acqua delle pozze di evaporare quasi totalmente e innescare quindi la precipitazione della calcite flottante che, nel Bolognese, avviene esclusivamente nei periodi di prolungata siccità.

Ovviamente nelle aree con clima più arido questi speleotemi avrebbero la possibilità teorica di svilupparsi tutto l'anno, sempreché la concentrazione dell'anidride carbonica nell'atmosfera di grotta sia sufficiente ad innescare il processo di precipitazione del $CaCO_3$.

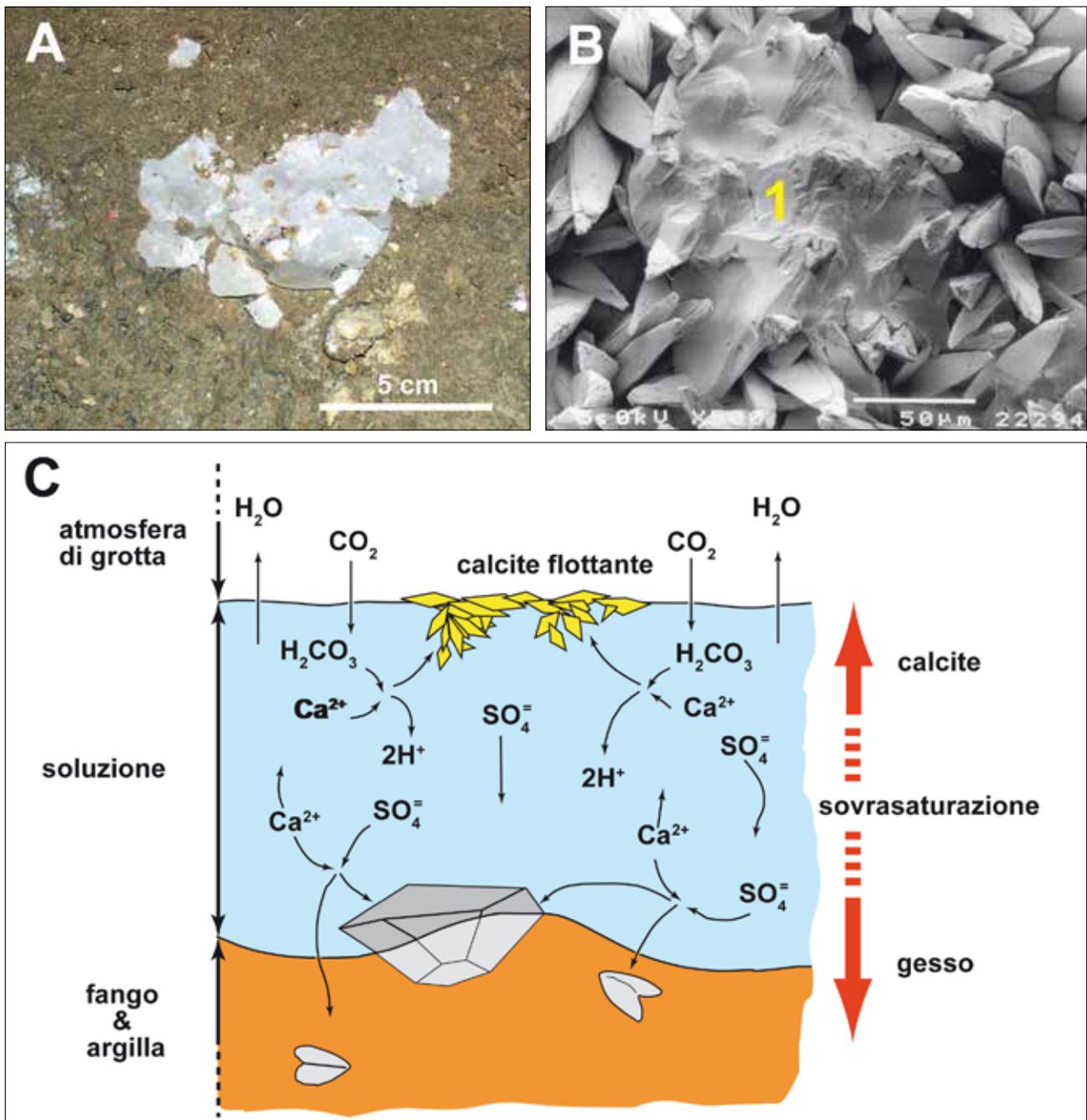


Fig. 20 – Grotta della Spipola, Salone del Fango (Gessi Bolognesi): A) grosso frammento di Calcite flottante al fondo di una vaschetta completamente prosciugata durante un lungo periodo di siccità (Foto: Paolo Forti); B) immagine al microscopio elettronico che evidenzia come la calcite flottante sia composta essenzialmente da cristalli scalenoedrici che, però, presentano piccoli e rari ammassi di gesso che li hanno parzialmente inglobati (1) (Foto: Paolo Ferrieri); C) reazioni chimiche che rendono possibile lo sviluppo di queste calciti flottanti che al loro interno ospitano anche piccoli depositi di gesso secondario, mentre il solfato di calcio, preferibilmente, si deposita all'interno del fango di fondo dove la concentrazione di CO_2 è minore (da FORTI, 2003, modificata).

Speleotemi biogenici

Molti organismi viventi basano il loro ciclo vitale sulle reazioni tra ossigeno e carbonio, con la produzione di volumi più o meno grandi di anidride carbonica e ovviamente, come anticipato nei paragrafi precedenti, questo può portare alla deposizione di calcite per il fenomeno della dissoluzione incongruente.

Attualmente si conoscono tre tipi di concrezioni che si possono sviluppare per questo meccanismo: il primo, e più diffuso nelle grotte delle aree temperate umide, sono le “rootsicles”, cioè un particolare tipo di pseudo-stalattiti che si sviluppa sopra le radici che fuoriescono dalla volta di una grotta. Il secondo è molto più raro, essendo stato segnalato solamente in una grotta

al mondo (Grave Gruppo in Calabria, FORTI & LOMBARDO, 1998), ed è invece una colata di totale origine organogena.

Il terzo, le cannule antigravitative, verrà trattato più avanti tra i minerali di grotta, dato che sono formate anche da aragonite.

- Le rootsicles (pseudo-stalattiti su radici)

Non esiste un nome italiano per questo tipo di concrezione che si sviluppa sugli apparati radicali che riescono a bucare il soffitto di una grotta, ricoprendosi di concrezione carbonatica.

In generale si può parlare di pseudo stalattiti (dato che non possiedono un canalicolo interno di alimentazione) e, nel caso si sviluppino su radichette ad andamento irregolare, possono somigliare a eccentriche (Fig. 21).

Potrebbe sembrare strano, ma questo speleotema di calcite si rinviene più facilmente nelle grotte gessose piuttosto che in quelle calcaree e questo perché in ambiente gessoso l'attività biologica svolta dalle radici, producendo anidride carbonica, contribuisce, attraverso la dissoluzione incongruente, alle fasi iniziali del loro sviluppo. In ambito carbonatico, invece, l'effetto è esattamente opposto, dato che l'aumento della CO_2 nella soluzione diminuisce l'eventuale sovrasaturazione rispetto al carbonato di calcio: questo fenomeno

è ovviamente massimo al contatto con la superficie esterna delle radici medesime, dove dovrebbe proprio iniziare a depositarsi la calcite.

Il clima influisce in modo determinante sulla possibilità di sviluppo delle rootsicles, dato che controlla la presenza di una flora rigogliosa, che deve comprendere anche alberi di alto fusto. In pratica, quindi, questi speleotemi hanno il loro maggiore sviluppo nelle grotte in gesso dei climi temperati umidi (Gessi dell'Emilia-Romagna) e tropicali (Gessi di Cuba).

Tuttavia nelle regioni caratterizzate da un clima temperato secco, come quello di Sorbas in Spagna, le rootsicles (Fig. 21C) hanno la possibilità di svilupparsi in modo peculiare e più complesso di quello che si verifica nelle grotte dei climi temperati umidi o tropicali.

A Sorbas, infatti, la quantità di calcite che può depositarsi direttamente sopra le radici è molto minore, a causa della scarsità del suolo pedologico che, praticamente, limita la quantità di CO_2 in contatto con l'acqua che percola sulle radici quasi esclusivamente a quella che esse producono.

Questo fa sì che lo strato di calcite rimanga molto sottile perché cessa la sua crescita quando la radice sottostante non può più "respirare". A questo punto, però, si innesca un altro processo, indotto dalla forte evaporazione che caratterizza quelle grotte, a causa del-

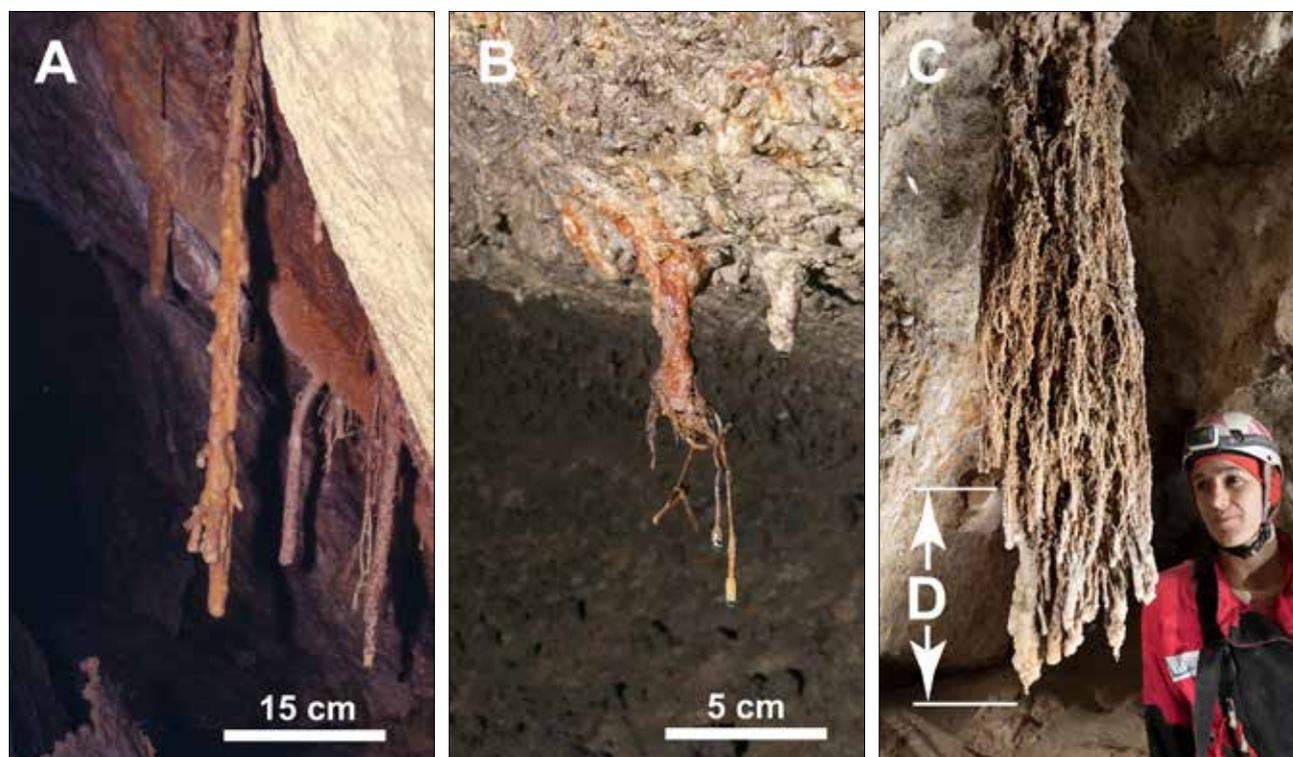


Fig. 21 – A) Grotta degli Occhiali (Gessi Bolognesi): gruppo di rootsicles sia sotto forma di pseudo stalattiti che di pseudo-eccentriche (Foto: Paolo Forti); B) Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): piccola rootsicles su radichette (Arch. RNI Grotta di Santa Ninfa, foto: Marco Vattano); C) Sima del Cumpleaños II (Spagna): una grande rootsicles in cui le radici sono ricoperte da uno strato di calcite molto sottile mentre nell'area apicale (D) è presente una spessa crosta di gesso (Foto: Paco Hoyos).

la loro elevata temperatura e scarsa umidità relativa. Quest'ultima caratteristica è la conseguenza diretta del regime delle precipitazioni meteoriche, che sono concentrate in una o due grandi piogge, mentre per il resto dell'anno sono quasi del tutto assenti.

In queste condizioni, infatti, subito dopo l'evento piovoso l'abbondante acqua, che si trova trattenuta dall'intrico di radichette ormai intrappolate nella "corteccia" di calcite, raggiunge per capillarità l'apice delle stesse e, in minor quantità, le aree dello speleotema più esposte a correnti d'aria, dove evaporando deposita il gesso.

Il processo di accrescimento del deposito di solfato di calcio è progressivamente velocizzato dal fatto che la struttura fibrosa, e/o macrocristallina, degli aggregati di gesso che si vanno formando, favorisce la ritenzione idrica e quindi, progressivamente, aumenta il volume d'acqua disponibile per l'evaporazione e conseguente deposizione del gesso.

In questo modo, al limite, le rootsicles possono anche trasformarsi in pseudo stalattiti apparentemente costituite da solo gesso.

- La colata biogenica

Come accennato, la colata organogena si trova nella stessa grotta e a pochi metri a monte del luogo in cui sono state osservate le mezze-bolle.

Si tratta di un crostone stalagmitico spesso circa 50 cm e largo 50 che si è sviluppato alla sommità di una piccola cascatella. In alcuni punti lo speleotema era fratturato, probabilmente a causa di una piena (Fig. 22), e permetteva quindi di vedere la sua struttura che è costituita da un aggregato di tubi il cui diametro interno è pressoché costante (0,3-0,5 cm) come anche quello esterno costituito da una concrezione di carbonato di calcio laminata il cui spessore non supera il millimetro (Fig. 22-1).

La struttura dei tubi, equidimensionali e sempre allungati nella direzione della corrente, indica chiaramente la loro origine biogenica, ascrivibile all'abbondanza delle larve di un insetto troglofilo (*Trichoptera wormaldia*) (POLUZZI & MINGUZZI, 1998), che vivono sopra le masse di scarti della lavorazione delle olive scaricate dei contadini all'interno di Grave Grubbo. Il meccanismo che ha permesso lo sviluppo di questa

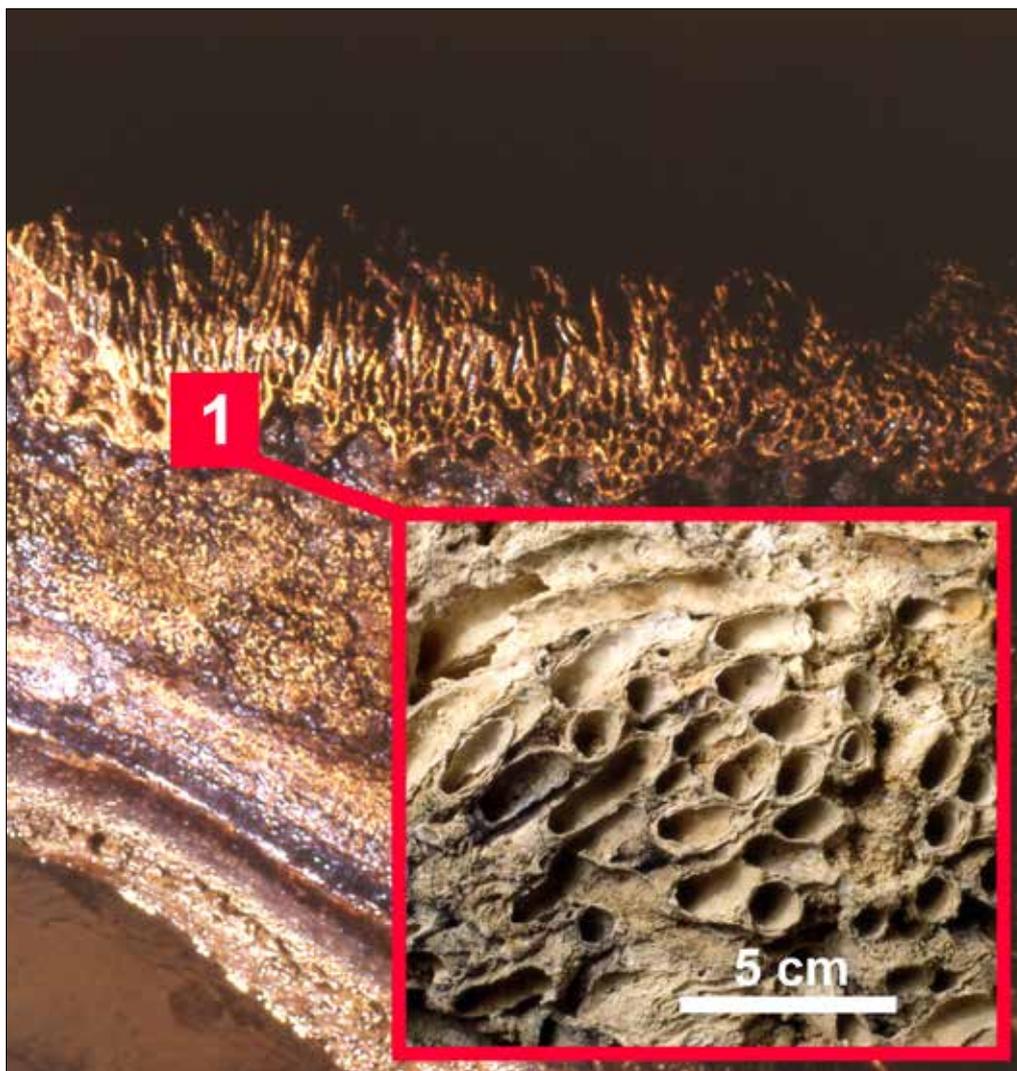


Fig. 22 – Grave Grubbo (Calabria): la concrezione organogena sviluppatasi pochi metri a monte delle semi-bolle di calcite; 1- particolare per evidenziare la struttura a tubi della concrezione stessa (Foto: Paolo Forti).

particolarissima concrezione è molto simile a quello delle semi-bolle, ma in questo caso la sorgente della CO₂ non è dovuta all'ossidazione del materiale organico che si trova a monte, ma è invece la conseguenza diretta dell'attività biologica delle larve. La deposizione della calcite è avvenuta infatti esattamente sul corpo delle larve ed è stata causata dalla sovrassaturazione rispetto all'anidride carbonica indotta localmente in una soluzione satura di gesso. Questo processo spiega anche come mai tutti i tubi hanno lo stesso diametro, che corrisponde esattamente a quello delle larve. Il fatto poi che essi abbiano un involucro esterno circa dello stesso spessore e che costantemente questo corrisponda a 3-5 bande di accrescimento della calcite si giustifica con il fatto che l'attività biologica delle larve viene progressivamente diminuita dall'aumentare dello spessore del carbonato di calcio che le ricopre e diviene tale da impedirne del tutto la respirazione. Quel valore critico sembra essere raggiunto attorno al millimetro (FORTI & LOMBARDO, 1998).

Gli aggregati cristallini criogenici

Aggregati di calcite criogenica sono stati segnalati in alcune grotte calcaree che si sviluppano nelle aree in cui la temperatura scende sufficientemente al disotto dello zero, fino a causare la formazione di ghiaccio perenne o anche solo stagionale. Sono quindi stati considerati un tipo di concrezione assolutamente particolare, essendo dovuta alla segregazione a seguito del congelamento dell'acqua (ZAK *et al.*, 2008). In generale si tratta di piccoli aggregati cristallini depositatisi al di sopra della massa ghiacciata, ma recentemente, sempre in ambiente carbonatico, sono stati descritti anche calciti criogeniche sviluppatasi all'interno della massa stessa del ghiaccio (BARTOLOMÉ *et al.*, 2015).

La presenza di cristalli di calcite criogenica in ambiente gessoso (Fig. 23), invece, non era assolutamente scontata, dato che la soluzione da cui avrebbe dovuto formarsi la calcite era sicuramente satura di gesso che precipitando sottraeva gli ioni calcio necessari alla formazione della calcite criogenica.

Pur esistendo una relativamente vasta bibliografia sulle finissime "polveri di gesso" criogeniche (essenzialmente formate da solfato di calcio ma contenenti anche molti altri minerali, di cui si discuterà più avanti) sino a pochi anni addietro (ANDREYCHOUK *et al.*, 2017) non era stata segnalata all'interno di queste polveri la presenza anche di calcite.

Si tratta sempre di piccoli o piccolissimi aggregati cristallini (dai 5-6 ai 30 micron di dimensione massima), spesso con elementi euedrali di calcite purissima.

Tutti i minerali presenti nelle polveri si formano a causa della cristallizzazione frazionata del ghiaccio che, solidificando, esclude dal suo reticolo cristalli-

no tutte le impurezze, che quindi, progressivamente, vanno ad aumentare la concentrazione della soluzione residuale.

Il motivo per cui da una soluzione satura di gesso una piccola quantità di calcite riesce a precipitare è dato dal fatto che all'interno dell'acqua ancora liquida, grazie alla bassa temperatura, si scioglie l'anidride carbonica dell'atmosfera, che conseguentemente, per effetto dello ione comune, causa la precipitazione di una piccola quantità di carbonato di calcio.

Considerato che però i volumi di acqua con cui si ha a che fare sono molto piccoli, ecco spiegata la dimensione minuscola delle calciti criogeniche, mentre la perfezione dei cristalli è una conseguenza diretta della lentezza del processo di formazione.

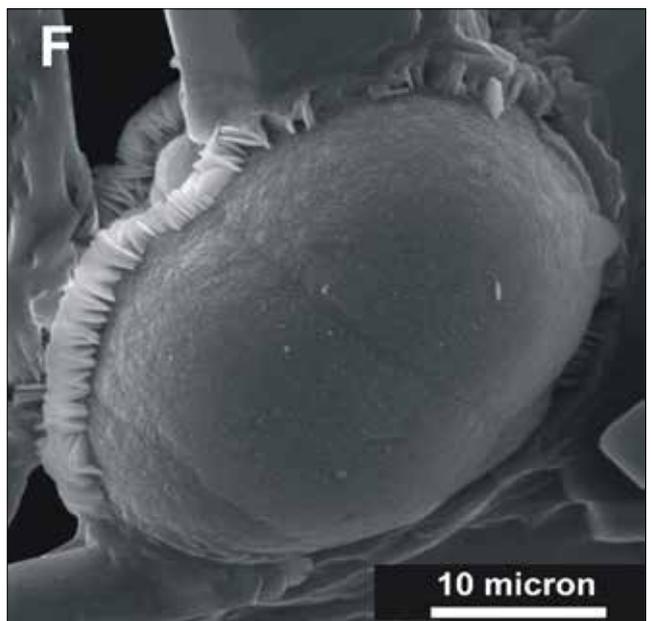
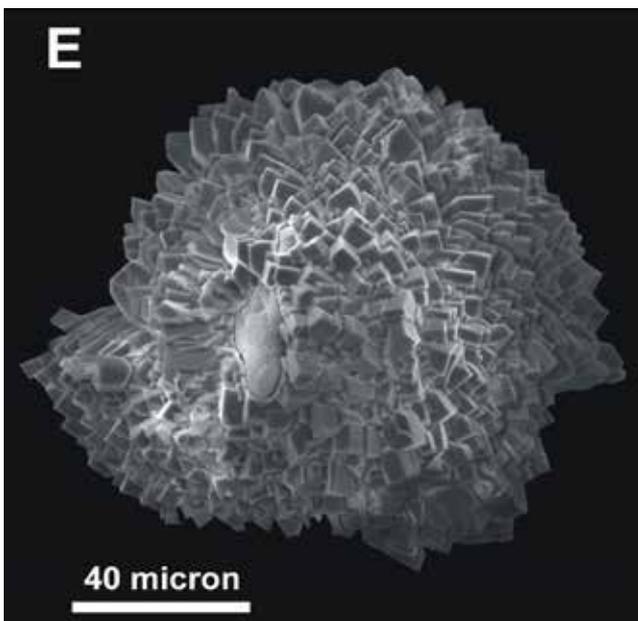
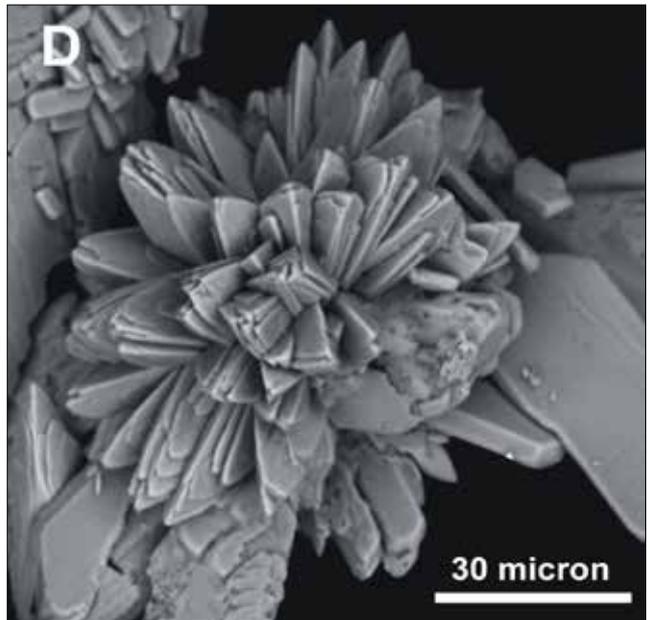
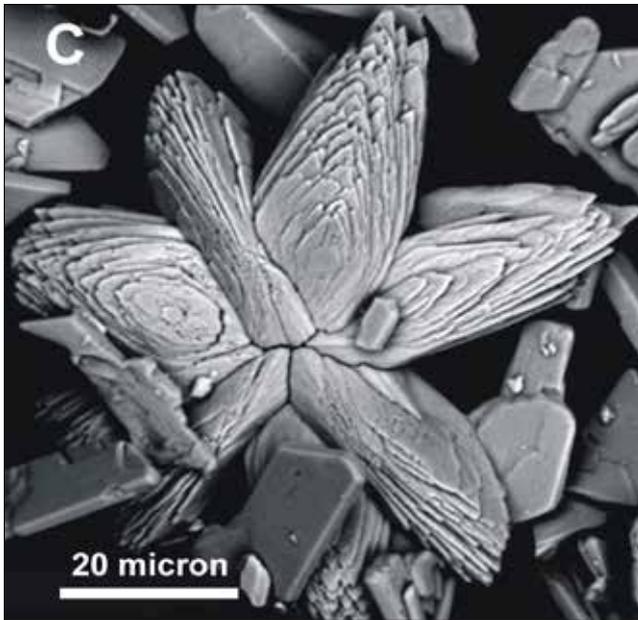
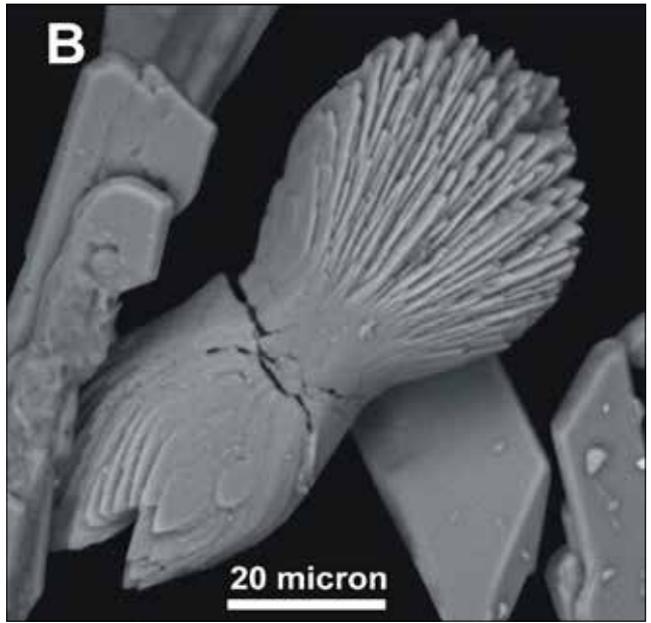
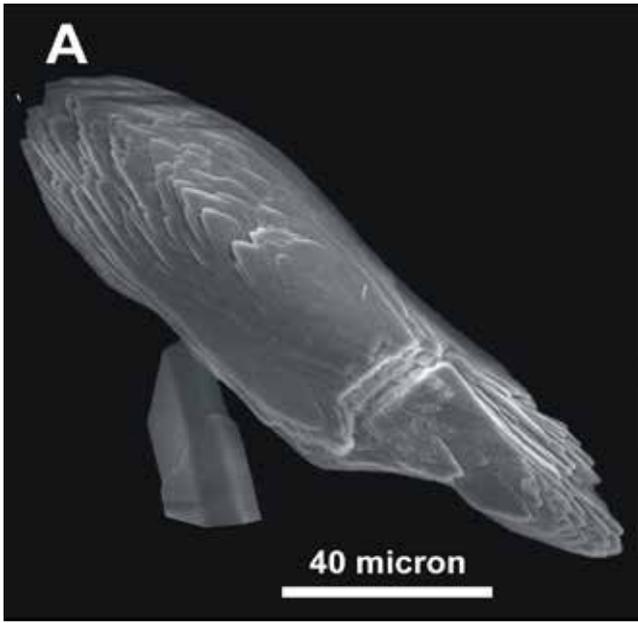
Speleotemi di gesso

Gli speleotemi di gesso sono molto comuni nelle grotte che si aprono in questo litotipo, va detto però che presentano notevoli differenze morfologiche rispetto alle omologhe concrezioni in calcite, e questo perché il meccanismo genetico che è alla base del loro sviluppo è del tutto differente (trattandosi in questo caso di evaporazione invece che di dissoluzione incongruente, o aumento/diminuzione della concentrazione di CO₂ nella soluzione).

Le stalattiti di gesso, infatti sono normalmente molto più contorte, spesso risultando botroidali e a volte anche ramificate (Fig. 24A). Il loro sviluppo dipende essenzialmente, se non totalmente, dall'evaporazione del film d'acqua che scorre sulla loro superficie esterna, mentre l'apporto del canalicolo interno è sempre abbastanza scarso tanto che è spesso parzialmente, o addirittura, totalmente occluso da cristalli di gesso di neoformazione. In alcuni casi, poi, il canalicolo centrale manca del tutto, e pertanto quelle stalattiti di gesso dovrebbero essere più correttamente considerate delle vele pseudo-stalattitiche (HILL & FORTI, 1997).

Le stalattiti di gesso, soprattutto nei climi temperati umidi, sono spesso macrocristalline (Fig. 24B) e a volte anche addirittura monocristalline (Fig. 24C). Mentre questo non accade nei climi più aridi e caldi dove le concrezioni microcristalline progressivamente prevalgono, in quanto la sovrassaturazione dovuta ai processi evaporativi è maggiore passando dalle aree temperate umide a quelle arido-calde, e quindi la nuova nucleazione è favorita rispetto alla crescita epitassiale o alla competizione selettiva tra i germi cristallini.

Un'altra fondamentale differenza tra le stalattiti di calcite e quelle di gesso è data dal fatto che, in presenza di correnti d'aria permanenti, la deflessione avviene in direzione opposta rispetto al flusso (Fig. 25): questo perché la diffusione, a differenza dell'evaporazione, non è assolutamente influenzata dalla presenza o



meno di correnti d'aria (FORTI, 1996).

In rari casi, però, in alcune grotte di Sorbas si possono osservare stalattiti di gesso curvate nella direzione del vento (CALAFORRA, comunicazione personale): questo avviene solamente quando la stalattite è intimamente associata a una rim (Fig. 7) e quest'ultima ha una velocità di sviluppo analoga o lievemente superiore alla stalattite. In questo modo la curvatura a favore di vento della rim causa progressivamente lo spostamento del punto apicale di gocciolamento e/o evaporazione della stalattite.

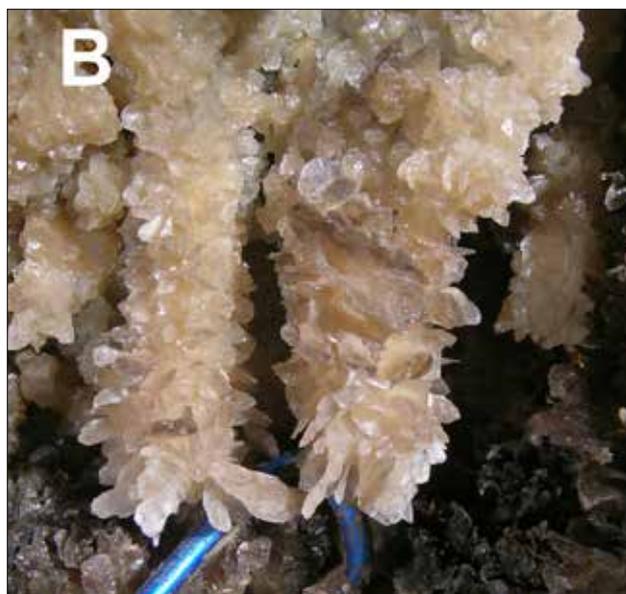
Il clima è poi responsabile del fatto che nelle aree gessose italiane le stalagmiti siano quasi totalmente assenti, mentre nei gessi di Sorbas (Spagna) (Fig. 26) e anche del Nuovo Messico (Stati Uniti) queste concrezioni sono comuni quasi quanto le stalattiti (CALAFORRA *et al.*, 1992).

Nelle grotte delle aree temperate umide, come innanzitutto quelle italiane ma anche, in parte, quelle dell'Ucraina, il clima delle cavità è sufficientemente umido per tutto l'anno così da consentire un notevole sviluppo di coralloidi macrocristallini, che ricoprono ampie parti delle pareti e del pavimento delle grotte. Il fatto che l'evaporazione sia di gran lunga il processo che genera le concrezioni di gesso spiega come mai alcune di esse, comuni se costituite da calcite, siano estremamente rare, o del tutto assenti, in gesso: un esempio lampante è fornito dalle pisoliti, che, di calcite sono molto comuni, ma di gesso risultano del tutto inesistenti.

E ancora: eccentriche di gesso (cioè con un canale interno) (Fig. 27A) sono state segnalate solo una volta al mondo in una grotta della Sicilia (FORTI, 1987). In realtà, però, queste concrezioni con ogni probabilità non sono delle vere eccentriche, ma devono essere considerate delle pseudo-eccentriche di

Fig. 23 (nella pagina accanto) – Grotta di Kungur (Russia): immagini al microscopio elettronico di cristalli di calcite criogenica formatisi all'interno delle polveri di gesso: A) sviluppo piano-parallelo di cristalli tabulari; B) geminato a coccarda; C) aggregato stellato; D) aggregato sferoidale di geminati piano-paralleli su cristalli di gesso; E) aggregato sferoidale isolato; F) aggregato ovoidale di nano-cristalli con successi crescita lungo il bordo di piccoli cristalli tabulari (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2017).

Fig. 24 (a destra) – A) Rocking Chair cave (Stati Uniti): complesso di stalattiti botroidali e contorte di gesso microcristallino (Foto: Paolo Forti); B) Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): due stalattiti costituite da aggregati macrocristallini di gesso (Arch. RNI Grotta di Santa Ninfa, foto: Marco Vattano); C) Grotta di Baena (Spagna): stalattiti monocristalline (Foto: José Antonio Mora Luque).



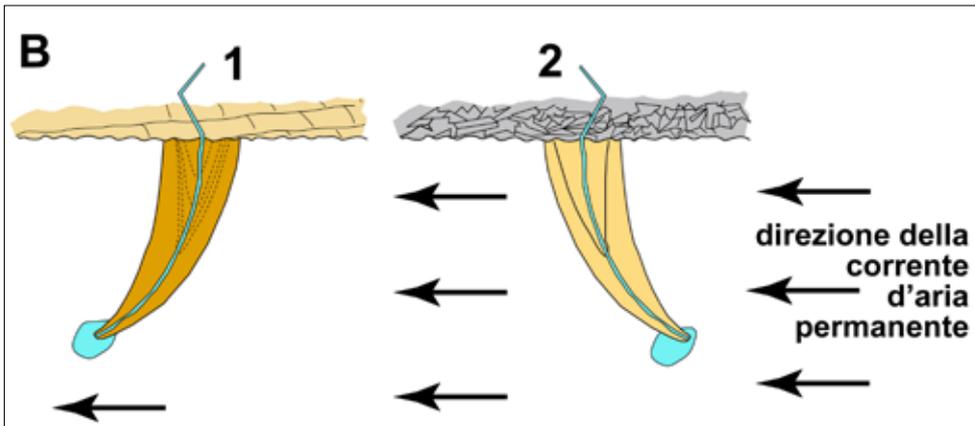


Fig. 25 – A: Grotta Calindri (Gessi Bolognesi) gruppo di stalattiti curvate dalla corrente d'aria (Foto: Paolo Forti); B) effetto delle correnti d'aria permanenti sulle stalattiti di calcare (1) e di gesso (2) (da FORTI & ROSSI, 2003, modificata).



Fig. 26 – Grotta SO21, Sorbas (Spagna): un gruppo di normali stalagmiti di gesso (Foto: Espeleo-Club Almería).

origine organogena.

L'area in cui sono state osservate infatti è ricca di tele di ragno e di ife fungine, il cui diametro è assolutamente compatibile con la dimensione del canalicolo rinvenuto all'interno delle eccentriche.

Inoltre, bisogna considerare il fatto che anche i canalicoli ben più grandi che alimentano le normali stalattiti di gesso vengono spesso occlusi, trasformandole così in vele pseudo-stalattitiche, dove l'alimentazione è garantita esclusivamente dall'apporto sulla superficie esterna dello speleotema.

Per quanto appena detto è oggettivamente difficile pensare che un meato capillare possa sopravvivere, anche perché il regime delle piogge in Sicilia è tale che, durante il relativamente lungo periodo di assenza di precipitazioni, l'evaporazione totale della soluzione all'interno del meato dovrebbe sicuramente causarne la completa occlusione.

È pertanto verosimile l'ipotesi che le cosiddette eccentriche di gesso siciliane altro non siano che una concrezione di origine organogena, dove le tele di ragno e/o le ife fungine hanno fornito il supporto fisico su cui la soluzione satura di gesso è risalita per capillarità e, depositando per evaporazione i cristallini di gesso, ha consentito lo sviluppo di queste rare concrezioni.

Antoditi elicoidali (senza canalicolo interno) sono state osservate in alcune grotte dell'Emilia-Romagna

e della Sicilia (Fig. 27B).

Infine, sempre per la stessa ragione, le concrezioni di gesso controllate dalle correnti d'aria, come i "rim" e le tray sono ovviamente più comuni nelle grotte in gesso rispetto a quelle in calcare (CHIESI & FORTI, 1992; CALAFORRA & FORTI, 1994).

Speleotemi peculiari di gesso

Oltre alle normali concrezioni, le grotte in gesso ne ospitano alcune particolari (Tab. 3) che, almeno sino ad oggi, sembrano essere confinate in questo tipo di

cavità e devono, quasi sempre, la loro genesi a processi di solubilizzazione/evaporazione in particolari condizioni climatiche locali.

- Gli alberi di Natale

La Rocking Chair Cave nel New Mexico (CALAFORRA & FORTI, 1994) è particolarmente ricca in trays (particolare tipo di stalattiti deflesse, HILL & FORTI, 1997), il cui sviluppo è controllato dalle forti correnti d'aria che caratterizzano alcuni punti di quella grotta. Una di queste tray, assieme alla stalagmite sottostante, for-

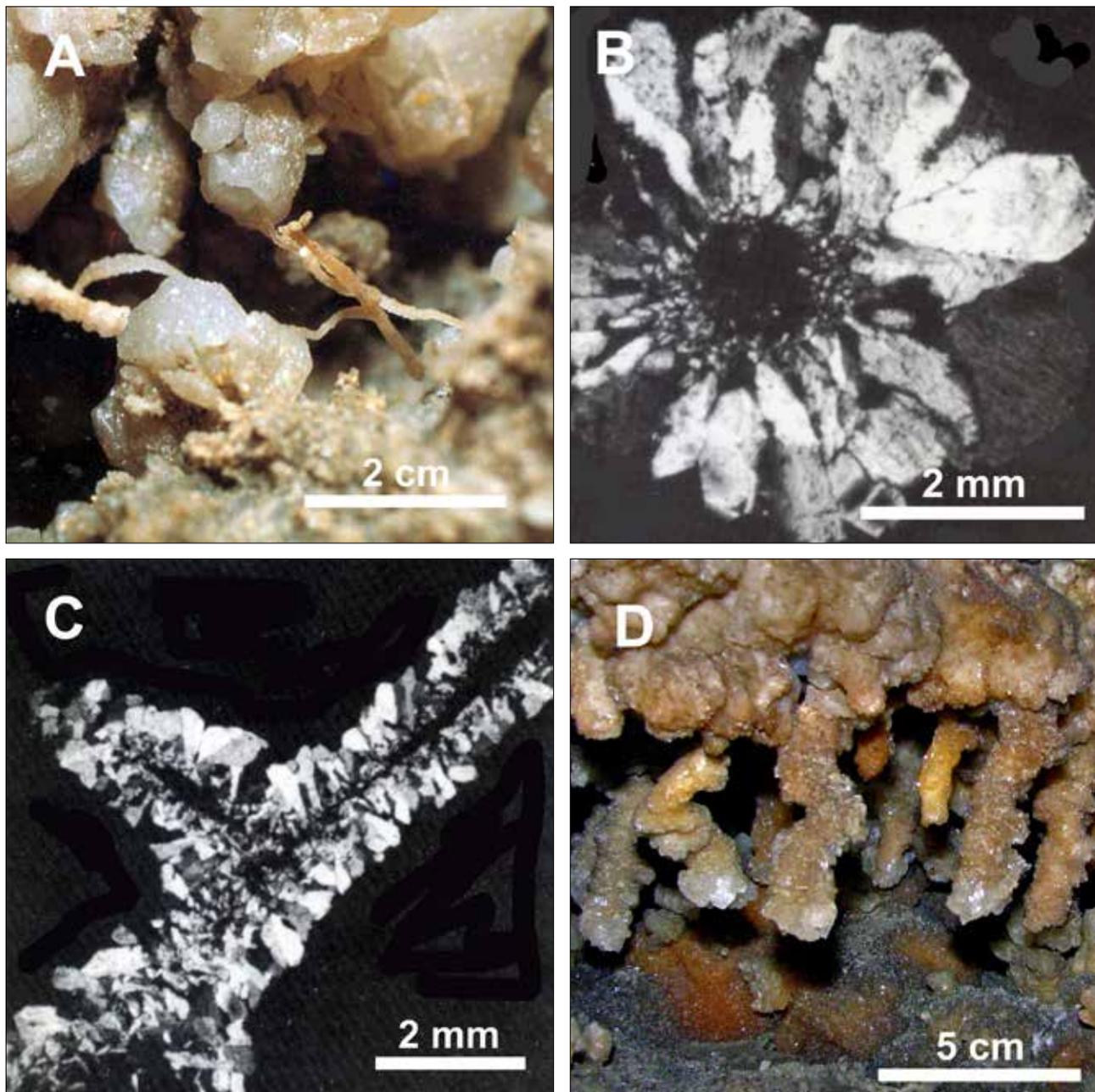


Fig. 27 – A) Grotta delle eccentriche (Santa Ninfa, Sicilia): le pseudo-eccentriche di gesso con canalicolo centrale (Foto: Paolo Forti); B) sezione sottile trasversale alla pseudo eccentrica che evidenzia il foro centrale su cui si sono sviluppati i cristalli di gesso (Foto: Paolo Ferrieri); C) sezione longitudinale che mette in evidenza la presenza del canalicolo per tutto lo sviluppo della pseudo-eccentrica (Foto: Paolo Ferrieri); D) Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): eccentriche elicoidali (antoditi) prive di canalicolo interno di alimentazione (Foto: Piero Lucci).

Nome	Meccanismo genetico	Prima citazione
Albero di Natale	Risalita capillare ed evaporazione contemporanea a soluzione per condensazione	CALAFORRA & FORTI, 1994
Palle di gesso	Flussi capillari ed evaporazione	CALAFORRA & FORTI, 1993
Stalagmiti cave	Cicli di dissoluzione ed evaporazione assieme all'effetto comune	CALAFORRA & FORTI, 1993
Polvere di gesso	1) segregazione da congelamento	FEDOROV, 1883
	2) risalita capillare e rapida evaporazione	CALAFORRA & FORTI, 1994
	3) mineralizzazione del guano	FORTI, 1988
	4) idratazione	CHIESI <i>et al.</i> , 1992

Tab. 3 – Concrezioni peculiari di gesso e loro meccanismi genetici.

ma un insieme che somiglia moltissimo ad un albero di Natale (Fig. 28A).

La tray in questione ha infatti una forma conica, quasi perfettamente simmetrica, così da renderla molto somigliante alla chioma di un abete, mentre la stalagmite sottostante sembra essere il suo tronco, anche perché l'impressione è che la stalagmite sia collegata direttamente, ma in realtà non lo è, alla porzione inferiore della tray.

La particolarità di questo connubio fra stalattite e stalagmite, a prescindere dalla forma davvero particolare, è data dal fatto che, a differenza di tutti gli altri analoghi connubi, non si fonderà mai a formare un'unica colonna (Fig. 28B): questo perché, mentre la stalagmite aumenta progressivamente la sua altezza, la parte centrale della superficie inferiore della tray simultaneamente si scioglie.

Pertanto, lo spazio libero tra la cima della stalagmite e il fondo della stalattite si mantiene nel tempo abbastanza costante, a seguito dei due processi, opposti ma concomitanti, (evaporazione e condensazione), che determinano sia la forma sia lo sviluppo di entrambe le concrezioni.

La risalita capillare e l'evaporazione sulla sommità della stalagmite fanno crescere in altezza questo speleotema, ma nello stesso tempo l'aria umida intrappolata al di sotto della tray è costretta a condensare sulla sua superficie. Ma l'acqua che condensa è praticamente priva di solfato di calcio in soluzione, e pertanto causa la dissoluzione della superficie inferiore della tray: in pratica induce l'evoluzione di una concavità campaniforme. Lo stillicidio conseguente, essendo costituito da acqua satura di gesso, quando raggiunge la stalagmite, la risale per capillarità ed evaporando la fa crescere verso l'alto.

Comunque la condizione permanente di sottosaturazione, che caratterizza le acque che condensano alla sommità della concavità campaniforme, rende impossibile alla stalagmite di raggiungere la stalattite e di fondersi con lei a formare una colonna.

- Le palle di gesso

Le palle di gesso (Fig. 29A) sono concrezioni sferoidali laminate che possono raggiungere i 10 cm di diametro e al cui interno i cristalli di gesso molto allungati hanno un arrangiamento radiale. Sino ad oggi sono state segnalate solamente nelle grotte più profonde dell'area carsica di Sorbas in Spagna (CALAFORRA & FORTI, 1993).

Le palle di gesso si sviluppano esclusivamente in zone in cui la percolazione e la saturazione rispetto al gesso rimangono costanti per tutto l'anno. Esse si formano lungo le pareti verticali o subverticali e sempre a livello degli interstrati argillosi limosi. In queste grotte la disposizione sub-orizzontale dei banconi di gesso, intervallati da un sottile interstrato di materiale poco permeabile, favorisce il trasferimento capillare di soluzioni leggermente sovrature di CaSO_4 verso punti preferenziali della parete di gesso della grotta, dove può avvenire l'evaporazione e la conseguente precipitazione, permettendo così l'evoluzione delle palle di gesso (Fig. 29B, 1-3).

Normalmente questi speleotemi sono compatti e formati da un insieme di fibre di gesso allungate radialmente. Una possibile loro evoluzione senile può portare allo sviluppo di un canalicolo di drenaggio interno, a partire dall'interstrato argilloso-limoso. In questo modo condizioni di leggera sottosaturazione possono instaurarsi anche all'interno delle palle stesse, che quindi danno l'avvio ad un processo di ridissoluzione nella loro parte inferiore. In questo modo si possono formare cavità che, espandendosi, sono anche in grado di portare alla loro completa distruzione (Fig. 29B, 4-5) (CALAFORRA, 1998).

- Le stalagmiti cave

Le stalagmiti che presentano un foro verticale nel punto di impatto della goccia che le alimenta, o le aveva alimentate un tempo, sono abbastanza comuni nelle grotte in calcare e il loro sviluppo è sempre

dovuto al drastico cambio di caratteristiche chimiche dell'acqua che le alimenta. Il foro centrale inizia infatti a svilupparsi quando l'acqua di alimentazione smette di essere concrezionante e diviene più o meno improvvisamente sottosatura rispetto al carbonato di calcio (HILL & FORTI, 1997).

Nei gessi questo passaggio è praticamente impossibile dato che il meccanismo di deposizione delle stalagmiti di gesso si basa, come detto precedentemente, solo sull'evaporazione di un'acqua sovrasatura.

Le prime stalagmiti di gesso cave in ambiente solfatico sono state descritte nella grotta Covadura, a Sorbas, in Spagna (CALAFORRA & FORTI, 1993) (Fig. 30.1), anche se erano state osservate qualche anno prima nella Jansill cave nel New Mexico, Stati Uniti (PEERMAN & BELSKI, 1991), e tutte hanno comunque una forma che si discosta da quelle dalle stalagmiti normali.

Sono infatti molto affusolate (con un diametro che non supera mai i 4-5 cm) tanto da somigliare di più a stalattiti capovolte. Raggiungono altezze anche superiori ai 150 cm, inoltre, quasi sempre, lo scavo interno raggiunge la base della stalagmite stessa. Il tubo interno poi non è conico, come avviene per le normali stalagmiti cave, ma è cilindrico e con un diametro che oscilla regolarmente tra 2 e 3 cm. Infine, la loro superficie esterna consiste di vari segmenti leggermente conici con la parte più larga in alto, e tutti sono quasi della stessa dimensione.

In tutte e due le grotte, in cui sono state osservate, le stalagmiti cave di gesso si sviluppano molto vicino alla superficie esterna, per cui l'acqua di infiltrazione meteorica le raggiunge molto rapidamente.

Il fattore fondamentale per il loro sviluppo (CALA-

FORRA & FORTI, 1993) è che, anche durante i periodi di forte afflusso idrico, su di loro impatta sempre e solo una singola goccia. Questi speleotemi sono estremamente affusolati e soprattutto non presentano mai, sulla loro superficie esterna, strutture a palma e/o a piattelli, che invece sono indice di presenza di gocciolamento diffuso e conseguente formazione di gocce da splash nebulizzate.

Un altro fattore che contribuisce a rendere uniche queste stalagmiti cave è il fatto che si trovano a pochissima distanza della superficie esterna (nella Grotta Covadura si trovano a meno di 10 metri dall'esterno): quindi la volta da dove affiora l'acqua è in assoluto il primo punto in cui può diffondere l'anidride carbonica presente nelle acque di infiltrazione: lo dimostra il fatto che le piccole stalattiti attive, da cui cade la goccia di alimentazione, sono di calcite e non di gesso (Fig. 30.2A).

È evidente quindi che, a livello del soffitto, la soluzione viene impoverita di ioni Ca^{2+} , a seguito della precipitazione del carbonato di calcio, e pertanto la goccia che cade è necessariamente sottosatura rispetto al gesso. Quello che succede è che nei brevi, ma intensi, periodi di alimentazione l'acqua che raggiunge le stalagmiti scava il tubo centrale (Fig. 30.2, C e E).

Per tutto il resto del tempo l'acqua intrappolata dentro il tubo è trasportata per capillarità fino alla sommità della stalagmite stessa, dove evapora causando così lo sviluppo di una nuova porzione di stalagmite la cui sommità risulterà essere più larga (Fig. 30.1, B e D).

Una serie di alternanze di periodi umidi e di periodi secchi (Fig. 30.2, B-C) permette lo sviluppo delle stalagmiti cave fino al livello osservato (Fig. 30.2, F).

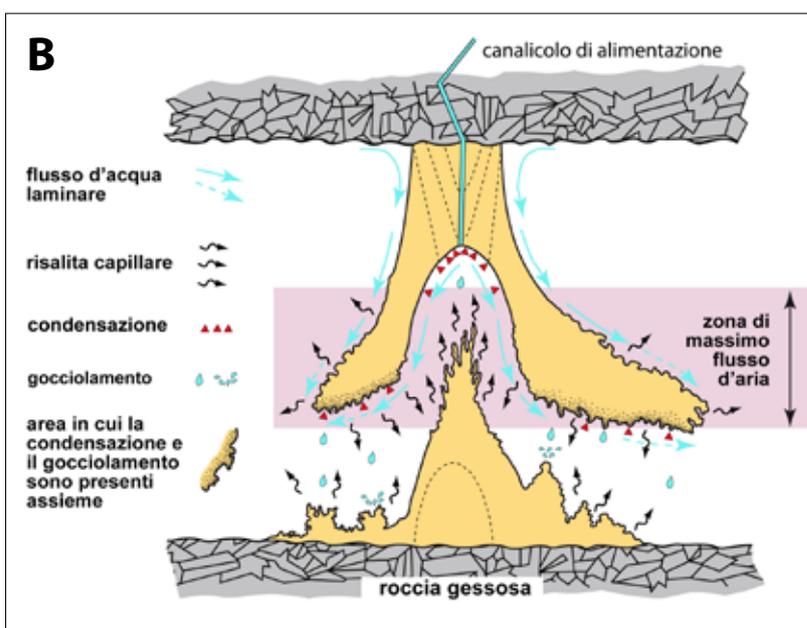


Fig. 28 – A) Grotta Rocking Chair cave (Nuovo Messico): complesso stalattitico-stalagmitico noto con il nome di “Albero di Natale” (Foto: Paolo Forti); B) schema evolutivo dell’albero di natale (da CALAFORRA & FORTI, 1994, modificata).

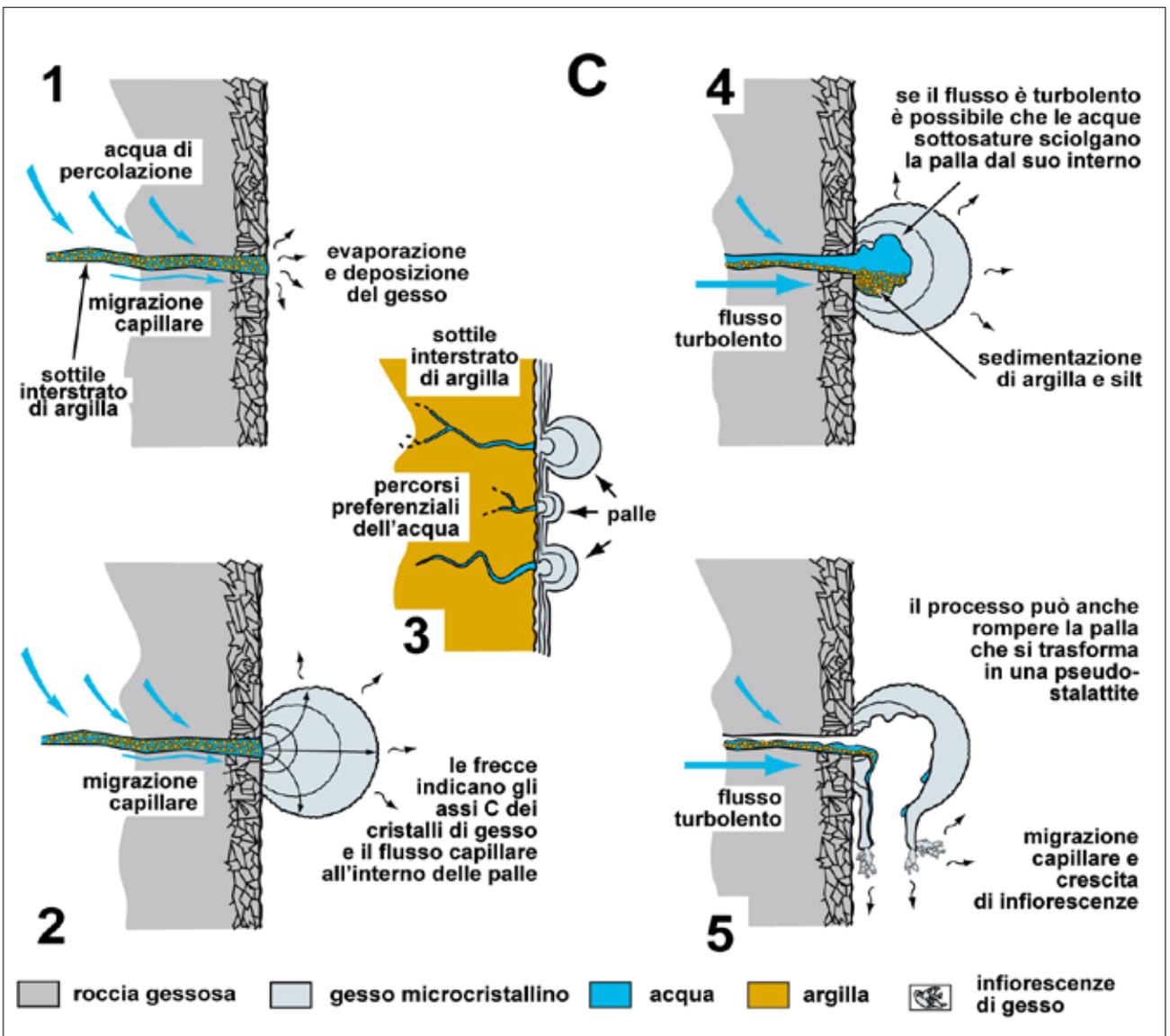
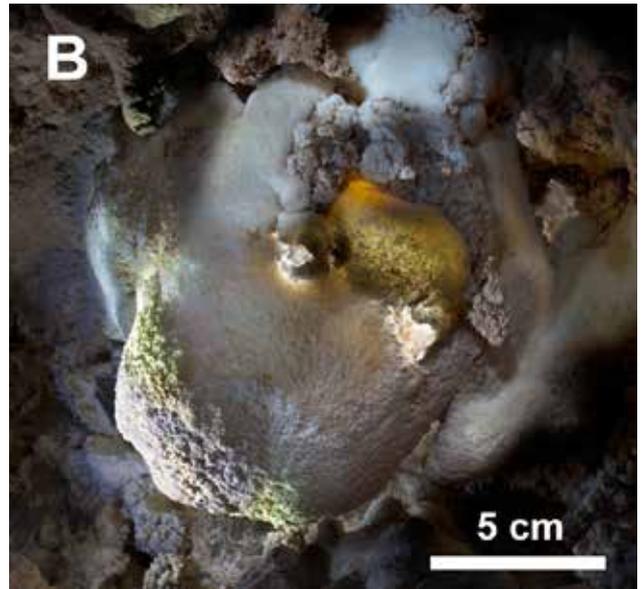
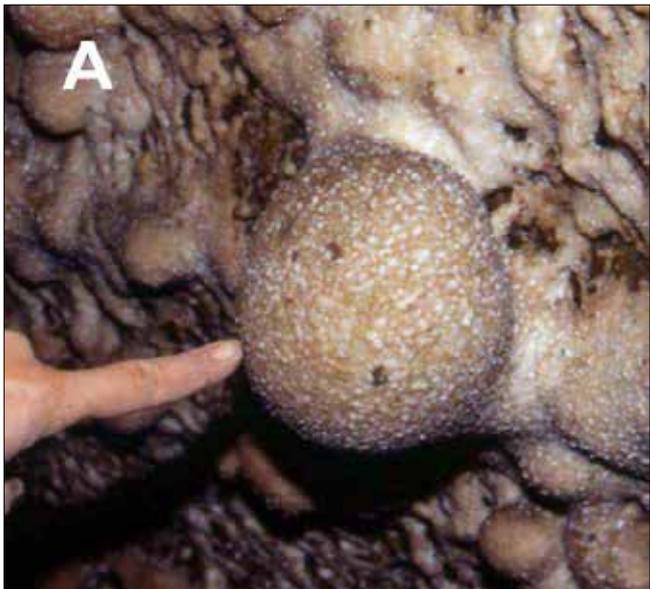


Fig. 29 – A) Cueva del Tesoro, Sorbas: una grande palla di gesso sviluppatasi lungo un interstrato argilloso (Foto: Paolo Forti); B) Sima V3-V4 a Sorbas: una palla di gesso senile, che si è trasformata in pseudo-stalattite illuminata dall'interno per evidenziarne la cavità (Foto: Paco Hoyos); C) stadi nell'evoluzione di una palla di gesso (da CALAFORRA & FORTI, 1993, modificata).

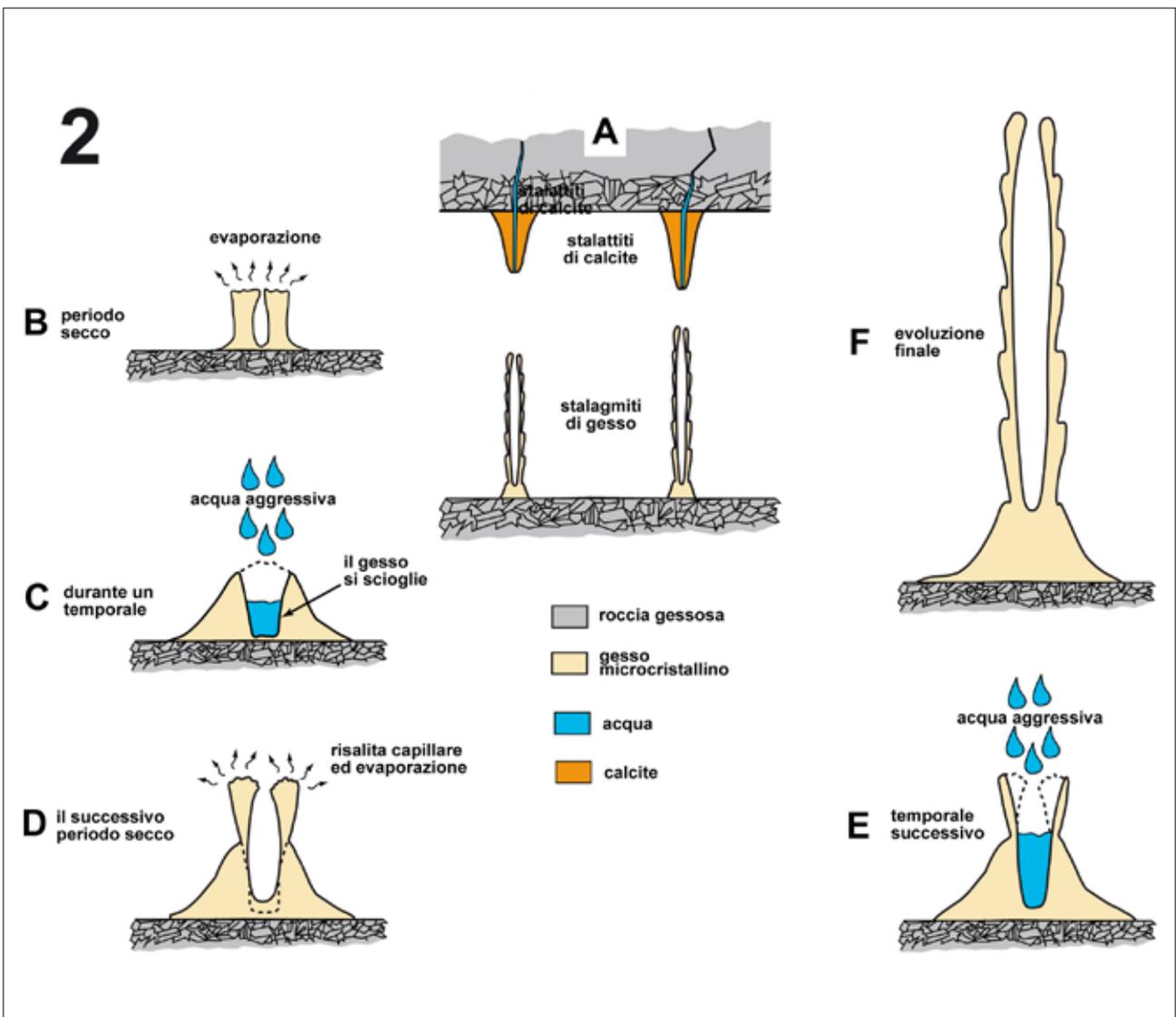
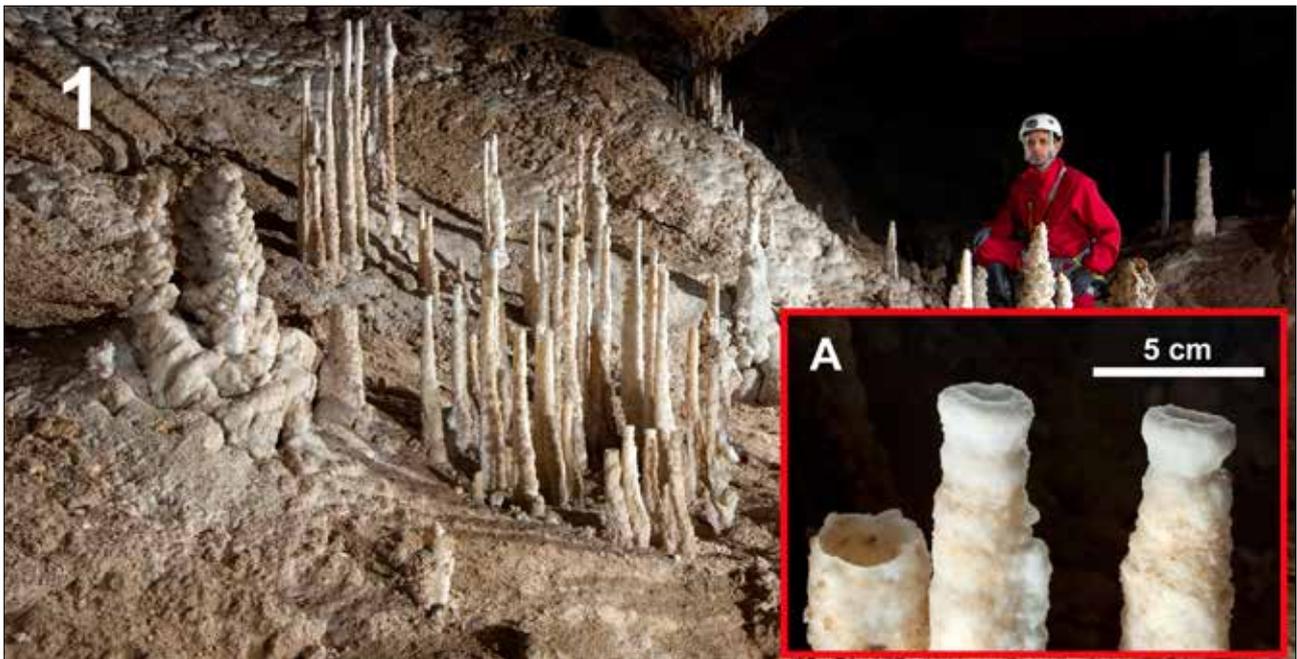


Fig. 30 – Grotta Covadura (Sorbas, Spagna): 1) visione generale delle stalagmiti cave: A) particolare per mostrare la forma della sommità delle stalagmiti, dove è evidente la colorazione più bianca indice di una deposizione più recente (Foto: Paco Hoyos); 2) stadi evolutivi delle stalagmiti cave (da CALAFORRA & FORTI, 1993, modificata).

- Le polveri di gesso

Le polveri di grotta sono depositi molto comuni, che possono essere incontrati in ogni tipo di cavità naturale: sono costituite da differenti minerali, che si presentano in forma di piccolissimi granuli cristallini (da 10 a 50 μm). Considerata la loro scarsa rilevanza dal punto di vista estetico, per molto tempo questi depositi sono stati trascurati dagli speleologi e dai ricercatori (HILL & FORTI, 1997). La prima polvere di grotta di cui si trova traccia in bibliografia è stata quella di gesso criogenico, descritta da FEDOROF (1883) nella Grotta di Kungur sugli Urali.

Più tardi, polveri di gesso sono state osservate in altre grotte gessose in aree climatiche molto diverse l'una dalle altre e, conseguentemente, la loro formazione è stata indotta da processi di volta in volta differenti. Attualmente sono stati descritti ben 4 meccanismi che possono dare origine a polveri di gesso:

- 1 - rapida evaporazione,
- 2 - congelamento,
- 3 - mineralizzazione del guano,
- 4 - idratazione della bassanite.

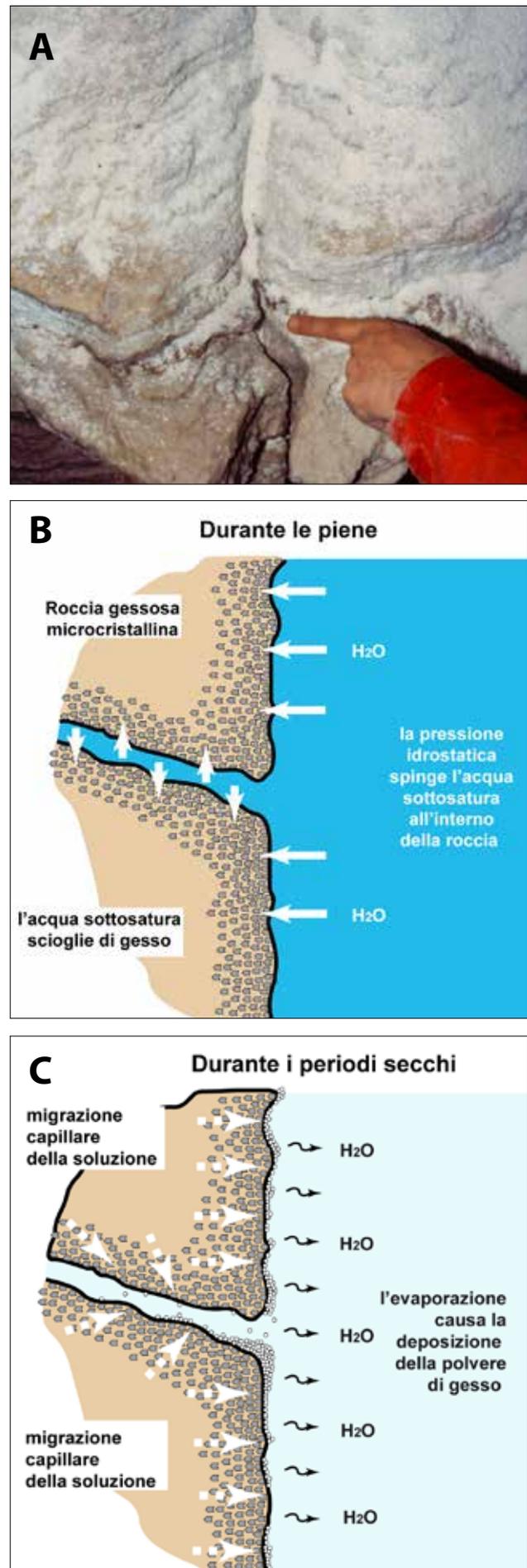
1 - Da rapida evaporazione

Le grotte situate in aree con clima caldo e arido, come quelle del Nuovo Messico (Stati Uniti), sono caratterizzate da un regime idrico fortemente condizionato dal clima esterno, caratterizzato da brevi ma intensi temporali, che, grazie ai grandi bacini di ricarica delle cavità allagano, a volte completamente, le loro gallerie sub-orizzontali. In queste grotte la polvere di gesso (Fig. 31) ricopre le pareti delle gallerie che sono di solito completamente asciutte, ma si allagano totalmente in breve tempo alla fine di una intensa, ma breve, precipitazione meteorica (CALAFORRA & FORTI, 1994).

Lo sviluppo della polvere è un fenomeno che ha inizio durante l'evento piovoso che causa l'allagamento totale della galleria ed innesca così, grazie alla pressione idrostatica, un processo di intrusione dell'acqua all'interno della struttura porosa delle pareti microcristalline della galleria. L'acqua così si satura rapidamente di gesso e, nel momento in cui la precipitazione meteorica finisce e la galleria si svuota completamente, riaffiora per capillarità formando minuscole gocce, che evaporano quasi istantaneamente, dando luogo ciascuna ad un minuscolo granello di gesso.

La polvere così formata rimane inalterata per il suc-

Fig. 31 – Ranch Park cave (Nuovo Messico): A) polvere di gesso appoggiata sulle pareti della grotta (Foto: Paolo Forti); B-C) stadi evolutivi per la formazione della polvere di gesso (da CALAFORRA & FORTI, 1994, modificata).



cessivo periodo secco, ma viene sempre completamente disciolta e/o fluitata via, non appena un altro forte temporale si manifesta nell'area di ricarica della grotta, dando inizio a un nuovo ciclo di formazione di polveri di gesso.

In un'area climatica molto diversa, come quella di Neuquen nella Patagonia argentina, sono stati osservati degli speleotemi particolari sviluppatasi a partire dalle polveri (FORTI *et al.*, 1993): i crostoni stalagmitici di polvere di gesso della Cueva del León (Fig. 32). Questi piccoli crostoni sono formati da un certo numero di livelli (spessi non più di 1-2 mm), ognuno dei quali è costituito da due parti: una superiore, cementata, e una inferiore di polvere solo parzialmente cementata o, a volte, del tutto disaggregata.

È pertanto evidente che all'interno di questa grotta gli eventi di piena non sono in grado di sciogliere o asportare completamente lo strato di polvere preesistente. La roccia gessosa in cui si è sviluppata la Cueva del León è molto porosa, come quella delle cavità del Nuovo Messico e, conseguentemente, è facile per l'acqua penetrare al suo interno. Questo però non avviene a causa di allagamenti e quindi con aumento della pressione idrostatica a livello delle pareti della cavità, ma è dovuto essenzialmente al fenomeno della condensazione e conseguente risalita capillare durante i periodi umidi che caratterizzano il clima più fred-

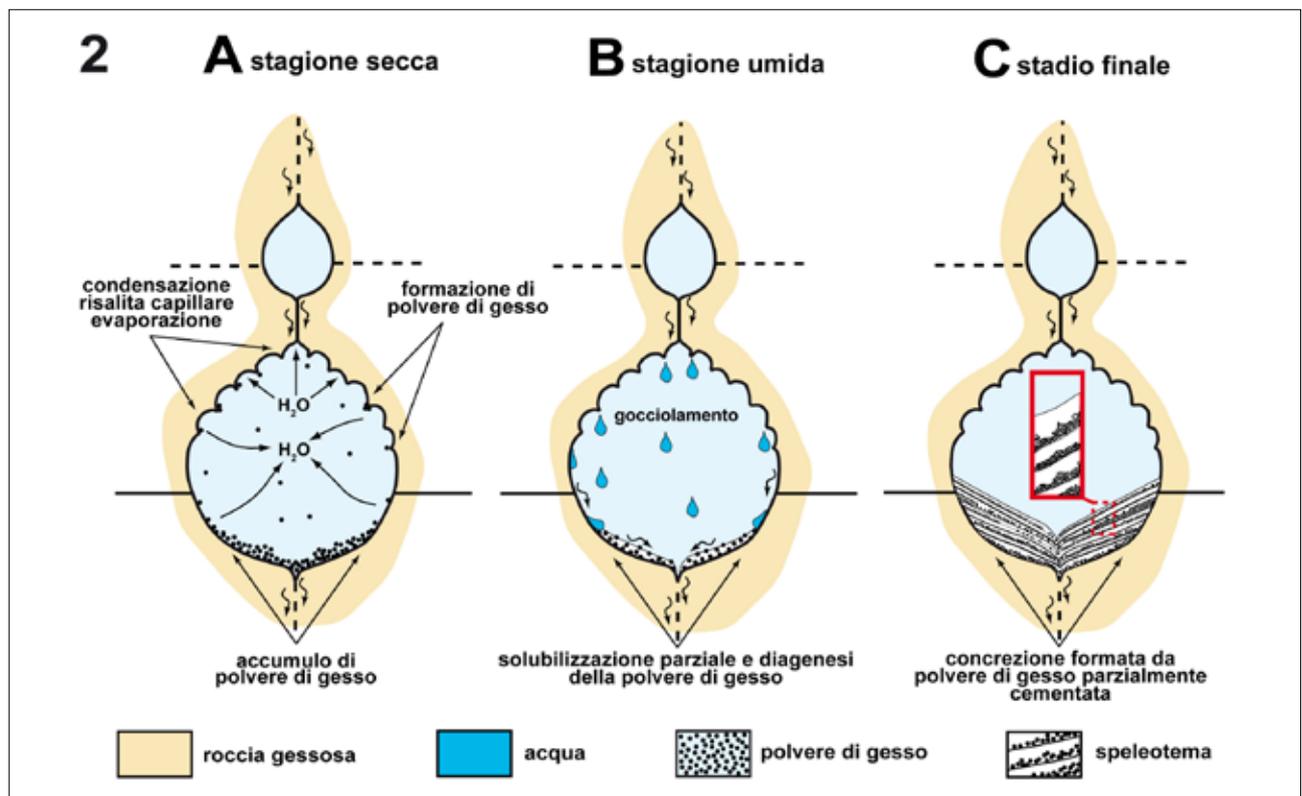
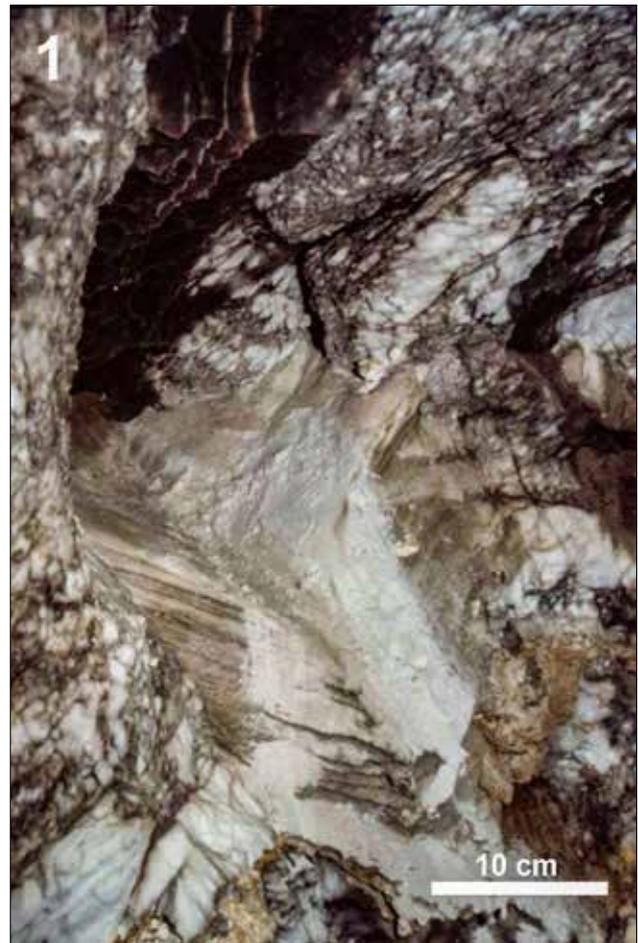


Fig. 32 – 1) Cueva del León (Neuquen, Argentina): polvere di gesso parzialmente cementata (Foto: Paolo Forti); 2) stadi evolutivi per lo sviluppo della concrezione formata dalla cementazione parziale della polvere di gesso (da FORTI *et al.*, 1993, modificata).



Fig. 33 – Grotta di Kungur (Russia): polvere di gesso formatasi durante il processo di congelamento di un'acqua di percolazione satura di gesso (Foto: Gaetano Boldrini).

do di Neuquen.

La formazione di questi speleotemi inizia durante un periodo secco (Fig. 32.2, A), quando la polvere di gesso si genera con lo stesso meccanismo appena descritto per le grotte del Nuovo Messico (Fig. 31).

Durante i periodi umidi, che sono molto più brevi di quelli secchi, non avviene alcuna piena, ma l'infiltrazione capillare, comunque presente assieme all'evaporazione, non riescono a bilanciare il gocciolamento e l'eventuale modesto flusso idrico sul pavimento.

Di conseguenza un modestissimo flusso laminare presente per periodi limitati al disopra dei depositi sul pavimento (Fig. 32.2,B) ne causa una parziale ridissoluzione e una, seppur minima, erosione. La stessa acqua poi gioca un ruolo fondamentale nella diagenesi che, attraverso l'evaporazione e la conseguente parziale cementazione del deposito all'inizio del nuovo periodo secco, porta alla formazione di una lamina di concrezione che ricopre la porzione non cementata delle polveri di gesso (Fig. 32.2, C).

2 - Da congelamento

Questa polvere di gesso (Fig. 33) è stata di gran lunga il primo tipo di questo particolare speleotema ad essere stato descritto, già alla fine del diciannovesimo secolo (FEDOROF, 1883), e, un secolo dopo, nelle grotte in gesso di Pinega nel Nord della Russia Bianca (KORSHUNOV & SHAVRINA, 1998).

Sia nelle grotte di Kungur che in quelle di Pinega queste polveri sono essenzialmente costituite da piccolissimi (0,05 mm o anche meno) cristalli, spesso eudrali, di gesso che si accumulano esattamente sopra la superficie del deposito di ghiaccio, o al suo piede, se è molto acclive. Adesso sappiamo che polveri di gesso sono relativamente comuni sulle superfici orizzontali, o comunque poco inclinate, degli speleotemi

di ghiaccio all'interno delle grotte che subiscono un congelamento stagionale, totale o parziale, delle loro acque interne.

Uno studio specifico (ADREYCHOUK *et al.*, 2013) ha infatti dimostrato che le caratteristiche morfologiche e mineralogiche di questi depositi sono differenti nelle varie aree della grotta, in stretta relazione con il microclima delle stesse (Fig. 34).

Il processo di cristallizzazione è indotto dal fenomeno di congelamento frazionato che, separando il ghiaccio puro dalla soluzione, fa sì che questa progressivamente diventi sempre più concentrata, fino a che il gesso è costretto a precipitare (Fig. 35). I piccoli cristalli di gesso che costituiscono la polvere sono originariamente intrappolati nel livello più superficiale del ghiaccio (l'ultimo ad essersi formato) (Fig. 35B). In estate, però, le correnti d'aria, più calde della massa di ghiaccio, cedono a quest'ultima dell'energia termica, sufficiente a far progressivamente evaporare l'acqua che costituisce la parte più esterna del deposito di ghiaccio solido, e il vapore acqueo così prodotto sale con moti convettivi e contribuisce poi allo sviluppo dei cristalli da sublimazione sulla volta della cavità. Per effetto dell'evaporazione dell'acqua, invece, i cristallini di gesso originariamente inglobati nel ghiaccio vengono progressivamente "liberati" (Fig. 35C) e, una volta senza alcun vincolo, tendono ad accumularsi per gravità al piede della massa di ghiaccio (Fig. 35D).

Nella zona più fredda le polveri di gesso possono accumularsi e conservarsi anche per lunghi periodi, dato che l'assenza di acqua liquida rende estremamente difficile, se non impossibile, la loro dissoluzione e /o diagenesi. La situazione muta nel caso di polveri che si formano nella zona più calda, dove risultano essere, essenzialmente, dei depositi stagionali. Infatti, all'arrivo della primavera, il ghiaccio inizia a sciogliersi e

le polveri vengono rapidamente solubilizzate in toto o in parte, permettendo così anche la formazione di cristalli più grandi.

Va comunque notato che tutte queste polveri non sono “pure” dal punto di vista mineralogico: infatti il processo di congelamento frazionato fa precipitare tutti gli ioni presenti, anche in tracce minime, in soluzione e quindi nelle polveri di gesso si trovano disperse anche piccole, o piccolissime quantità, di molti altri minerali (quasi un terzo di tutti quelli attualmente conosciuti come minerali secondari delle grotte in gesso).

La Grotta di Kungur è attualmente l'unica cavità al mondo dove un tale studio mineralogico è stato effettuato e i minerali riconosciuti come componenti minoritari delle polveri di gesso criogeniche sono: bloedite, calcite, calcite magnesifera, celestina, dolomite, gaylussite, inyoite, mirabilite, silice amorfa, salgemma, solfato di magnesio idrato, tenardite, ulexite (ADREYCHOUK *et al.*, 2013; TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015).

3 - Da mineralizzazione del guano

È ben noto che le complesse reazioni biologiche che hanno luogo nel guano, e che sono la causa della sua mineralizzazione, portano alla precipitazione di moltissimi minerali che, spesso, sono mescolati tra loro, proprio a causa della complessità delle reazioni che li hanno generati (FORTI & ONAC, 2016).

L'ambiente gessoso, però, fino ad oggi almeno, è risultato molto meno interessante da questo punto di vista, e in effetti attualmente i minerali riconosciuti come derivanti dal guano in ambiente gessoso si contano sulle dita di una mano (FORTI, 2017) e sono peraltro essenzialmente costituiti da apatiti, estremamente comuni in ogni ambiente di grotta.

Nonostante questo, però, anche nel campo dei depositi generati dalla mineralizzazione del guano le grotte in gesso hanno evidenziato una loro particolarità. Nella Grotta di Santa Ninfa (Sicilia), infatti, è stato osservato un grande deposito di guano ancora fresco (Fig. 36A), ricoperto da una polvere fine giallastra (Fig. 36B) che si è accertato essere formata da gesso

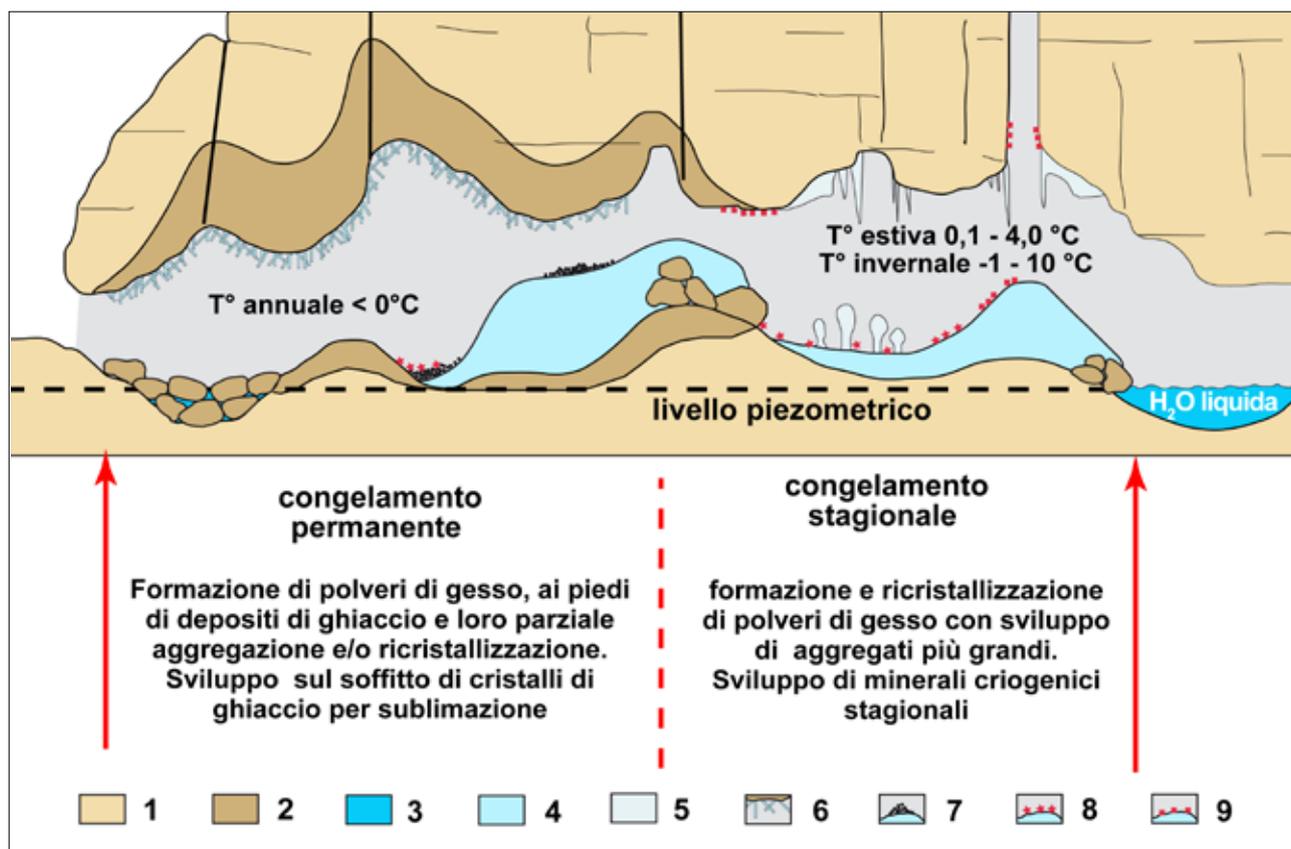


Fig. 34 – Rappresentazione schematica della parte più vicina all'esterno della Grotta di Kungur in cui sono evidenziate le due aree climatiche limitrofe, in cui è possibile lo sviluppo di polveri di gesso. Nella prima, dove la temperatura rimane costante al di sotto dei 0°C, oltre alle polveri si formano, per sublimazione, anche cristalli di ghiaccio. Nella seconda le polveri, che si formano stagionalmente, subiscono anche una diagenesi e ricristallizzazione parziale. Infine, in quest'ultima si depositano, sempre stagionalmente, anche altri minerali criogenici. 1) roccia gessosa; 2) roccia gessosa sempre ghiacciata; 3) acqua allo stato liquido; 4) ghiacciaio permanente sotterraneo; 5) concrezioni di ghiaccio; 6) cristalli di ghiaccio di sublimazione; 7) polveri di gesso; 8) aggregati diagenetici di gesso; 9) minerali criogenici stagionali (da ADREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata).

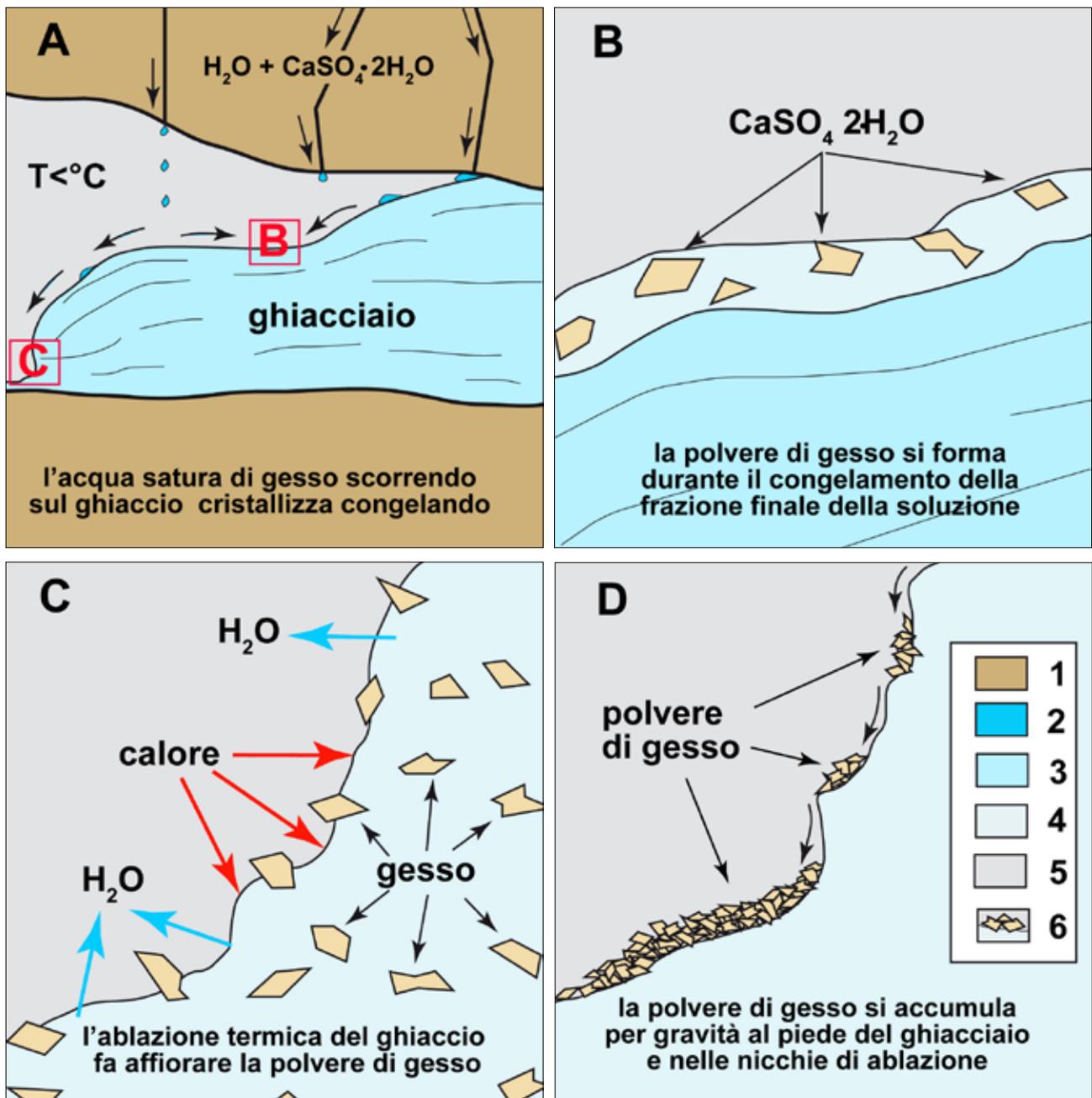


Fig. 35 – Stati di sviluppo delle polveri di gesso criogeniche: 1) roccia gessosa perennemente ghiacciata; 2) acqua; 3) ghiacciaio sotterraneo; 4) ultimo livello di acqua congelata; 5) atmosfera di grotta; 6) polvere di gesso (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata).

puro (FORTI, 1988).

La formazione di questa polvere, costituita solo da gesso e non intimamente mescolata ad altri minerali, come normalmente avviene nelle grotte in calcare, si spiega col fatto che il deposito di guano poggiava direttamente sulla roccia gessosa, come anche quella del soffitto, da cui proveniva lo stillicidio che impregnava il guano. In pratica la soluzione circolante all'interno del deposito era sicuramente satura di $CaSO_4$ e solo di questo minerale.

Pertanto, quando le reazioni di ossidazione organica

del guano hanno prodotto, tra le altre sostanze, anche l'acido solforico, immediatamente si è realizzata una sovrassaturazione rispetto al gesso, che è stato costretto a precipitare. Altri minerali non si sono formati data l'assenza in concentrazione sufficiente di altri cationi in soluzione.

4 - Da idratazione della bassanite

Nelle aree con clima molto caldo (come l'area carsica del diapiro gessoso di Punta Alegre a Cuba) le superfici del gesso affiorante esposte direttamente al sole

(CHIESI *et al.*, 1992). possono facilmente disidratarsi in parte, dando luogo a sottili depositi di bassanite, solfato di calcio emiidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$). Questo fenomeno è stato osservato anche all'interno di alcune piccole grotte, caratterizzate da ingressi molto ampi esposti a Sud, dove la formazione di bassanite era limitata alle aree in cui i raggi del sole riuscivano a penetrare direttamente all'interno delle cavità.

In questi casi la bassanite di neoformazione si presenta sotto forma di granuli molto piccoli e isolati che ricoprono parzialmente la roccia gessosa inalterata.

Questi depositi di bassanite, però, possono sopravvivere solo fino a quando non arriva la stagione delle piogge che, pur non potendo penetrare all'interno delle cavità, ne aumentano considerevolmente l'umidità relativa, che diviene quindi in grado di reidratare la bassanite, dando luogo ad un sottile strato di polvere di gesso. Dato che il solfato di calcio biidrato è molto più stabile della bassanite, l'umidità relativa, anche se in grado di produrre una leggera condensa, non riesce comunque a solubilizzare completamente la polvere di gesso che quindi, progressivamente, si accumula, dando luogo a depositi permanenti.

Le cristallizzazioni

I cristalli di gesso di neoformazione, con dimensioni medie che variano tra meno di un centimetro e 10 centimetri di lunghezza, sono senza alcun dubbio i depositi secondari più comuni delle grotte in gesso ad ogni latitudine, e in ogni tipo di clima, del nostro pianeta. Spesso si rinvengono come depositi sciolti all'interno di sedimenti fini, anche se più di frequente formano druse sulle pareti e sulle concrezioni di calcite (quando presenti).

I più grandi di questi cristalli (spesso lenticolari ge-

minati a ferro di lancia, o coda di rondine) possono a volte raggiungere dimensioni di 1-2 metri (Fig. 37A). La loro genesi e successivo sviluppo avvengono essenzialmente nei climi temperati umidi (come quelli dell'Italia, Spagna e Ucraina), dove all'interno degli interstrati sabbioso-argilloso-marnosi l'acqua satura di gesso si muove lentamente, per capillarità. La scarsa evaporazione causa quindi una sovrassaturazione molto bassa che favorisce l'accrescimento di pochi cristalli anziché la genesi di nuovi elementi.

Bisogna però ricordare che, nel mondo, esistono varie grotte in calcare (di solito grotte di miniera che si aprono in giacimenti di solfuri misti) che contengono cristalli di $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ di gran lunga più grandi di quelli descritti per le normali grotte in gesso (CALAFORRA *et al.*, 2021). Tali giganti (il più grande si trova nella Cueva de los Cristales a Naica (Messico) ed è lungo quasi 12 metri) si sono comunque formati per processi assolutamente differenti da quelli attivi nelle normali grotte in gesso: in condizioni di freaticità e in presenza di acque termali.

In Sicilia, però, si sa da tempo (LA PORTA, 1991) che esistono alcune grotte in gesso (le Garbere della Miniera di Cozzo Disi) che contengono di gran lunga i più grandi cristalli di gesso al mondo (Fig. 37B). Purtroppo la Miniera di zolfo di Cozzo Disi è ormai chiusa da decenni e nessuno ha ancora potuto raggiungere la zona delle "Garbere", dato che le gallerie minerarie sono state chiuse o sono franate. L'esistenza di queste grotte, e dei giganteschi cristalli che contengono, non è comunque in discussione in quanto il rilievo delle Garbere e dei suoi cristalli è stato realizzato da La Porta, proprio nella sua qualità di topografo della miniera.

È interessante quindi descrivere brevemente il

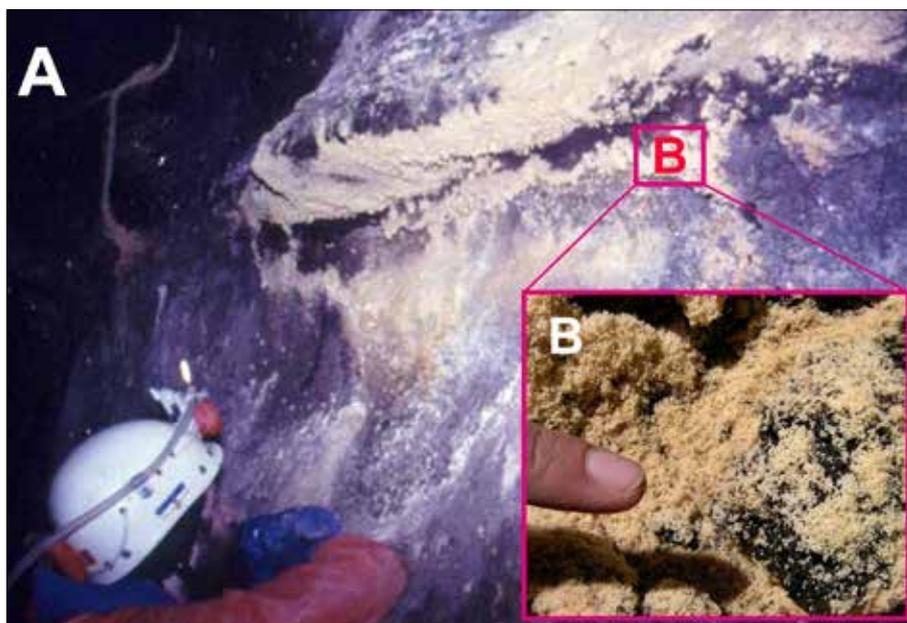


Fig. 36 – Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): A) grande accumulo di guano sulla cui superficie si è sviluppata per evaporazione una polvere di gesso molto pura (B) (Arch. RNI Grotta di Santa Ninfa, foto: Marco Vattano).

meccanismo genetico particolare, che ha permesso a quei cristalli di svilupparsi fino a raggiungere dimensioni gigantesche.

Le garbere, come si vede dal disegno di La Porta, sono cavità che si sono sviluppate al contatto tra gessi e calcari, esattamente dove si è poi formato il potente deposito di zolfo. Al tempo dello sviluppo del giacimento e anche successivamente, fino a che i lavori minerari non hanno intercettato le grotte, queste ultime erano totalmente invase dall'acqua.

Durante la deposizione dello zolfo, che comportava contestualmente la solubilizzazione della roccia gessosa, si sono iniziate a formare le Garbere, il cui sviluppo è continuato anche dopo la fine della messa in loco delle masse di zolfo a causa delle persistenti condizioni anossiche dell'acquifero, che non hanno cessato di trasformare lo ione solfato in ione solfuro (Fig. 38A).

Ad un certo punto però l'acquifero ha cominciato ad essere interessato dall'ingressione, per percolazione, di acque meteoriche ossidanti, che ne hanno cambiato le condizioni (Fig. 38B). La lenta miscela tra le acque di percolazione meteorica, ricche di ossigeno,

con quelle profonde, che invece erano anossiche, con contenuto elevato in H_2S e saturate rispetto al solfato di calcio, ha attivato l'ossidazione dello ione solfuro a ione solfato, reazione che ha dato inizio alla formazione dei cristalli di gesso. Si è creata così una leggerissima sovrassaturazione rispetto al gesso, che però si è mantenuta costante per un tempo estremamente lungo. In quelle condizioni, ovviamente, il gesso ha avuto la possibilità di depositarsi, ma con una energia di cristallizzazione talmente bassa, che solo pochissimi germi hanno potuto svilupparsi, dando luogo, in un tempo sicuramente molto lungo, ai giganteschi cristalli euedrali che, a loro volta, hanno smesso di accrescersi solo quando l'attività mineraria ha svuotato completamente le Garbere dalle acque che le sommergevano (Fig. 38C).

Ma torniamo ad occuparci dei cristalli che possono essere incontrati nelle grotte meteoriche in gesso: è stato sperimentalmente provato che la forma cristallina del gesso di neoformazione (lenticolare o prismatico) e il fatto che sia un cristallo singolo o un geminato sono variazioni determinate esclusivamente dall'energia di cristallizzazione, che dipende direttamente

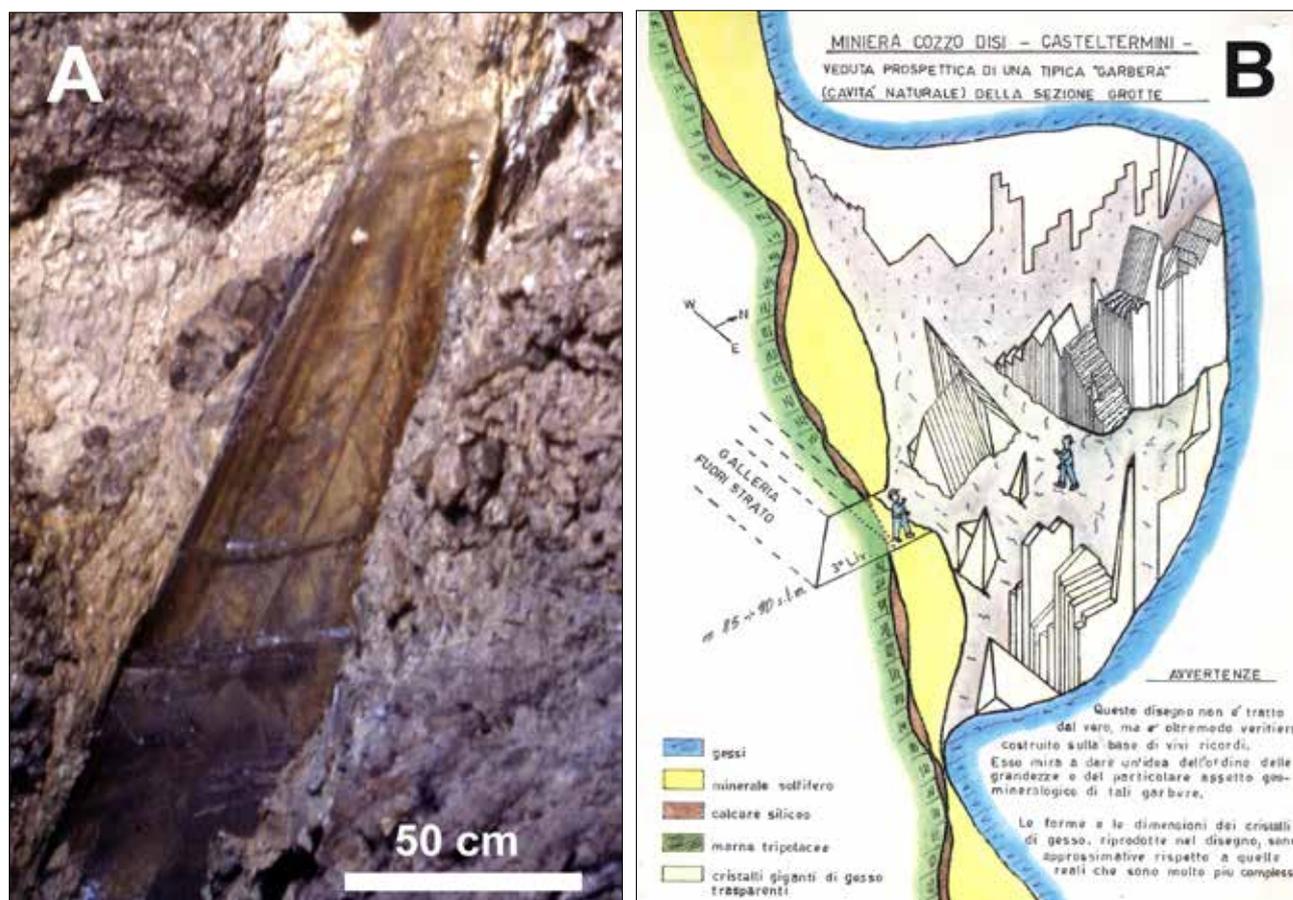


Fig. 37 – A) Sistema carsico del Tempio (Gessi Bolognesi): un grande lenticolare di gesso ancora all'interno di una frattura riempita di argilla (Foto: Paolo Forti); B) Garbere della miniera di Cozzo Disi (Sicilia) in cui si vedono riportati i giganteschi cristalli di gesso la cui dimensione si ricava da quella dei minatori stilizzati (Disegno originale di La Porta, 1991).

dal grado di sovrasaturazione della soluzione madre (Russo, 1981) (Fig. 39A).

Quando la sovrasaturazione è estremamente bassa, si sviluppano solo cristalli tabulari (Fig. 38B), ma se quest'ultima aumenta, cresce anche l'energia di cristallizzazione, e quindi si possono formare i lenticolari, spesso geminati a ferro di lancia, o a coda di rondine (Fig. 38D), e infine, un ulteriore incremento della sovrasaturazione porta alla deposizione di cristalli prismatici (Fig. 38C).

Data la loro straordinaria variabilità di forme, dimensioni e anche di purezza, non è possibile in questa sede descrivere in dettaglio tutti i tipi e le forme che i cristalli di gesso possono assumere in grotta.

I loro meccanismi evolutivi possono essere differenti, anche se quello di gran lunga più comune è la sovrasaturazione indotta dall'evaporazione. Comunque gli interessati ad approfondire questi temi possono riferirsi ad alcuni lavori specifici, quali: CASALI & FORTI (1969), HILL & FORTI (1997), FORTI (1986, 1988), ANDREYCHOUK *et al.* (2013).

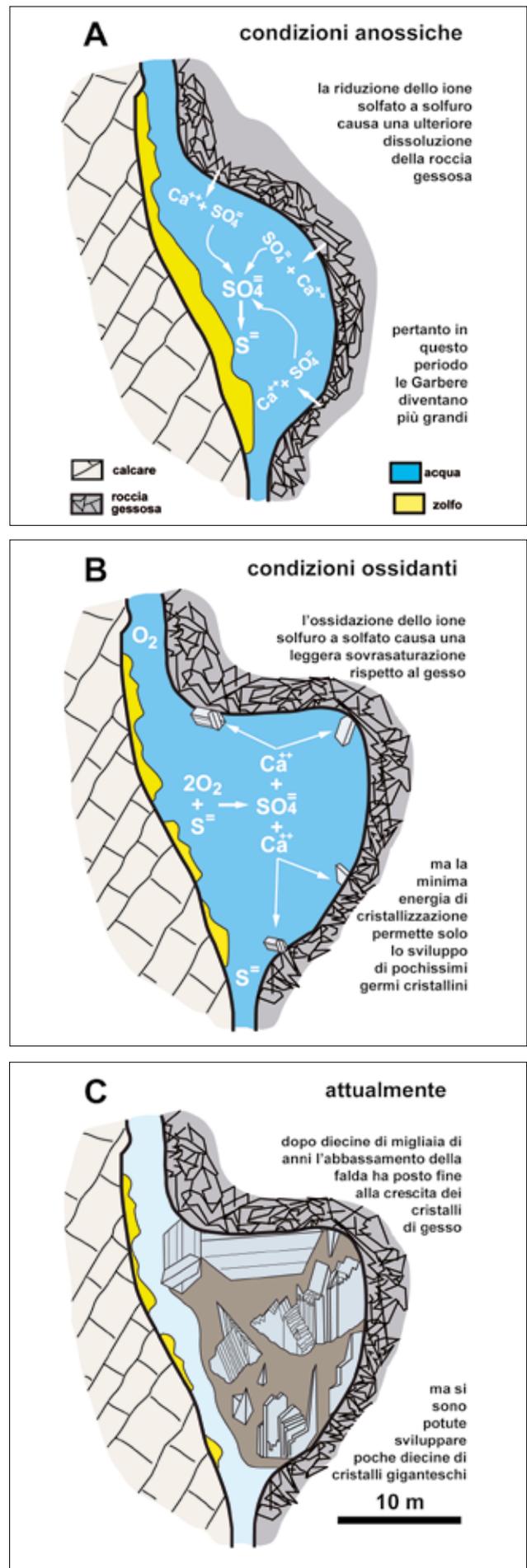
La sericolite

Accenneremo qui, solo brevemente, ad un tipo di gesso del tutto particolare (la sericolite) sia perché è la varietà meno nota e, storicamente, è stata anche l'ultima ad essere segnalata, anche se, invece, è abbastanza comune all'interno delle grotte dei Gessi Bolognesi, in particolare nella Grotta Gortani a Zola Predosa (Fig. 40A).

La sericolite è una varietà di gesso fibroso, caratterizzata da fasci di cristalli aciculari molto sottili (1 mm o anche meno) ed estremamente allungati (fino ad oltre 50 cm), che conferiscono al minerale un aspetto traslucido, perlaceo, tanto che, ai primi dell'800, la sericolite veniva soprattutto utilizzata per realizzare collane o altri monili (Fig. 40B), dove sostituiva le perle naturali troppo costose (SANTAGATA, 1836).

Nelle grotte calcaree, soprattutto in presenza di acido solfidrico, la sericolite può svilupparsi a partire da un substrato poroso, dando luogo a caratteristici speleotemi, di cui i più comuni sono le infiorescenze, con i caratteristici fasci di fibre ricurve, a causa della differente velocità di crescita variabile dei singoli cristalli che le compongono, o i lunghi fasci di fibre sottilissime (0,1 mm o anche meno di spessore) sarsamen-

Fig. 38 – Stadi nell'evoluzione dei cristalli di gesso delle Garbere di Cozzo Disi: A) la deposizione dello zolfo in ambiente freatico anossico ha permesso alla Garbere di svilupparsi; B) la miscela con acqua meteorica ossigenata ha dato inizio alla deposizione di pochissimi germi cristallini che hanno avuto un tempo lunghissimo per svilupparsi fino a diventare giganteschi (C).



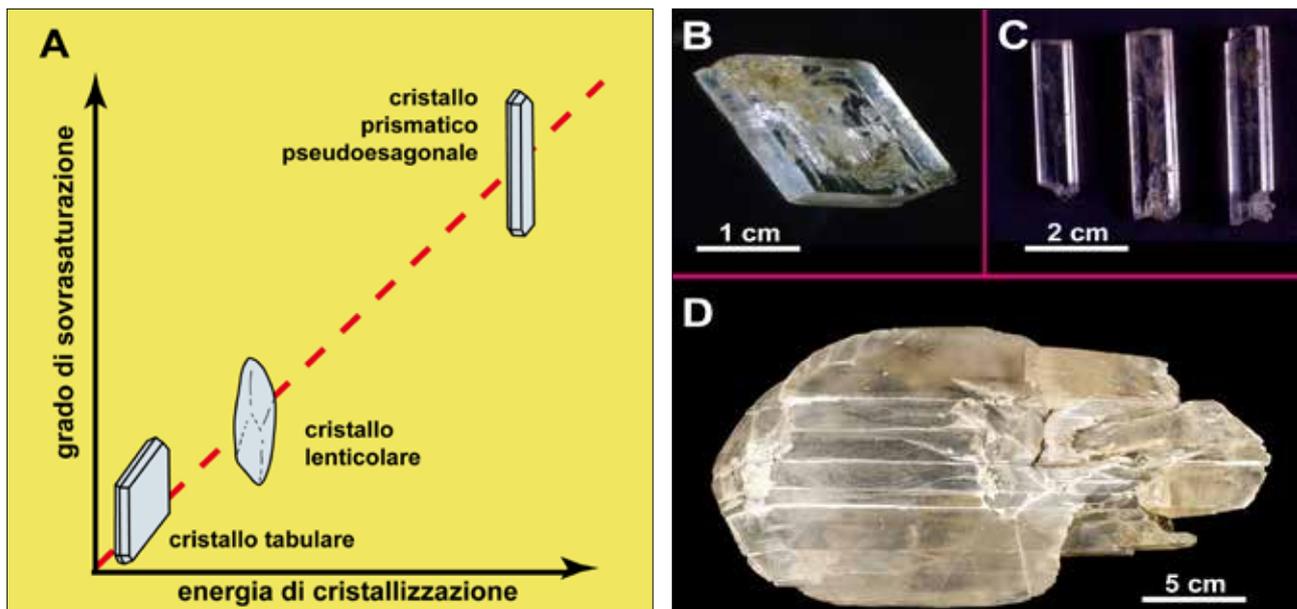


Fig. 39 – A) energia di cristallizzazione e cristalli di gesso risultanti (da FORTI & LUCCI, 2016, modificata); B) Grotta del Tempio (Gessi Bolognesi) monocristallo tabulare; C) Grotta Novella (Gessi Bolognesi): cristalli prismatici; D) Grotta del Tempio (Gessi Bolognesi): cristallo lenticolare geminato a coda di rondine (Foto: Paolo Forti).

te vincolate le une alle altre, che sono chiamate dagli speleologi “corde di grotta” (HILL & FORTI, 1997).

Queste speleotemi però sono del tutto assenti nelle grotte in gesso, dove la sericolite si sviluppa esclusivamente all’interno di fratture o interstrati della roccia gessosa, quando i due lembi a contatto sono interessate da un movimento relativo (tettonico o gravitativo) l’una rispetto all’altra, spesso facilitato da piccoli interstrati argillosi che fungono da lubrificante.

È tuttavia necessario che all’interno di queste discontinuità circoli acqua (Fig. 40C, 1) che, dopo aver solubilizzato la roccia, deposita il gesso secondario per evaporazione (Fig. 40C, 2). Per questo motivo l’asse di allungamento dei cristalli fibrosi della sericolite (lunghi anche parecchi centimetri, ma spessi solo meno di un millimetro) è sempre parallelo al movimento relativo dei due lembi della frattura entro cui si sta depositando (Fig. 40C, 3 e D).

Le infiorescenze gessose

La forma di aggregato di gesso di gran lunga più comune nelle grotte in gesso di tutto il mondo è rappresentata dalle infiorescenze gessose (aggregati di cristalli di gesso, spesso lenticolari, con dimensioni che variano da 1-2 mm a dieci volte maggiori). Questi aggregati sono l’analogo dei coralloidi di calcite in ambiente carbonatico.

Il loro sviluppo è generalmente molto veloce e la loro genesi è dovuta all’evaporazione di sottili film d’acqua che vengono lentamente spinti dalla capillarità in punti prominenti, sia delle pareti di roccia che degli

speleotemi.

Le infiorescenze gessose sono molto sensibili alle correnti d’aria, che possono influenzare il movimento capillare delle acque che le alimentano. In generale, infatti le infiorescenze si sviluppano controvento, dato che in quella direzione è massima l’evaporazione. Esistono però alcune condizioni particolari per cui i cristalli di gesso sono allungati esattamente nella direzione opposta (quindi a favore di vento) (Fig. 41). Questo avviene soprattutto in presenza di forti correnti ascensionali che, con la loro azione, rendono più rapido il flusso capillare verso l’alto. Un esempio classico di questo fenomeno è presente nell’area carsica di Neuquen, in Argentina, dove, all’interno di piccole e relativamente brevi condotte verticali (chiamate “ciminiera di grotta”), che collegano i vasti ambienti sotterranei con l’esterno, sono presenti infiorescenze gessose molto allungate verso l’alto (Fig. 41B2).

A causa del clima locale, che comporta un marcato abbassamento di temperatura durante la notte, all’interno delle ciminiere si sviluppano forti correnti d’aria calda e umida che, per condensazione sulla superficie più fredda delle pareti, sciogliendole si saturano di gesso e, trascinate dal violento flusso d’aria, risalgono le pareti stesse evaporando, e quindi permettendo lo sviluppo di infiorescenze gessose orientate verso l’alto (FORTI *et al.*, 1993).

Un altro tipo del tutto particolare di infiorescenze gessose (limitato alle sole grotte attive in ambiente temperato umido e tropicale) è quello che permette lo

sviluppo di aggregati cristallini di gesso direttamente sopra le concrezioni attive di carbonato di calcio (Fig. 42.2) e questo avviene ad opera della stessa acqua di alimentazione (FORTI & MARSIGLI, 1978).

La cosa interessante è che, in questo caso, le infiorescenze gessose si formano anche se l'acqua di alimentazione viene contestualmente impoverita di Ca^{2+} a causa della concomitante precipitazione del carbonato di calcio, cosa che avrebbe, almeno in teoria, dovuto impedire alla soluzione di diventare sovrassatura rispetto al gesso.

La spiegazione di questo fenomeno (illustrato in Fig. 42.1) è fornita dalla diversità della composizione chi-

mica delle soluzioni, che alimentano rispettivamente le concrezioni di calcite e le infiorescenze di gesso. La prima, infatti, scorre rapidamente, mentre solo una sua minima parte è continuamente trasportata dalla capillarità su punti prominenti dove evapora, diventando così sovrassatura rispetto al gesso (Fig. 42.1, B1). Lo studio di queste infiorescenze che si sviluppano sopra le concrezioni attive di carbonato di calcio, ed in particolare il fatto che i processi che portano alla deposizione simultanea dei due minerali sono differenti (dissoluzione incongrua per il carbonato di calcio ed evaporazione per il gesso), hanno reso possibile l'effettuazione di studi paleoclimatici e paleoam-

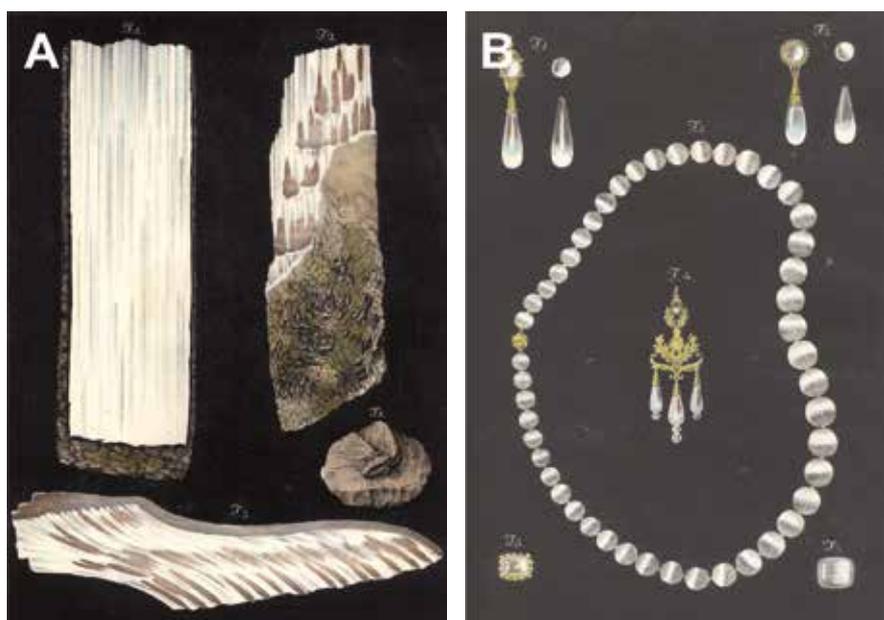


Fig. 40 – A) tavola raffigurante campioni di sericolite provenienti dalle cavità naturali di Monte Rocca (Zola Predosa, Bologna) (da SANTAGATA, 1836); B) differenti gioielli realizzati con la sericolite di Monte Rocca (da SANTAGATA, 1836); C) meccanismo di formazione della sericolite: l'acqua che scorre all'interno della frattura (1) solubilizza il gesso e quindi, per lenta evaporazione, deposita il gesso sotto forma di sottili fibre, perpendicolari ai due lembi di roccia, che il progressivo lento scivolamento di un lembo rispetto all'altro (2) fa sì che si allungino e tendano progressivamente a divenire parallele alla direzione del movimento stesso (3); D) Grotta di Entella (Sicilia): sericolite che si è sviluppata all'interno di un piano di faglia e quindi è stata messa in evidenza dalla caduta della porzione di roccia a destra (Foto: Marco Vattano).

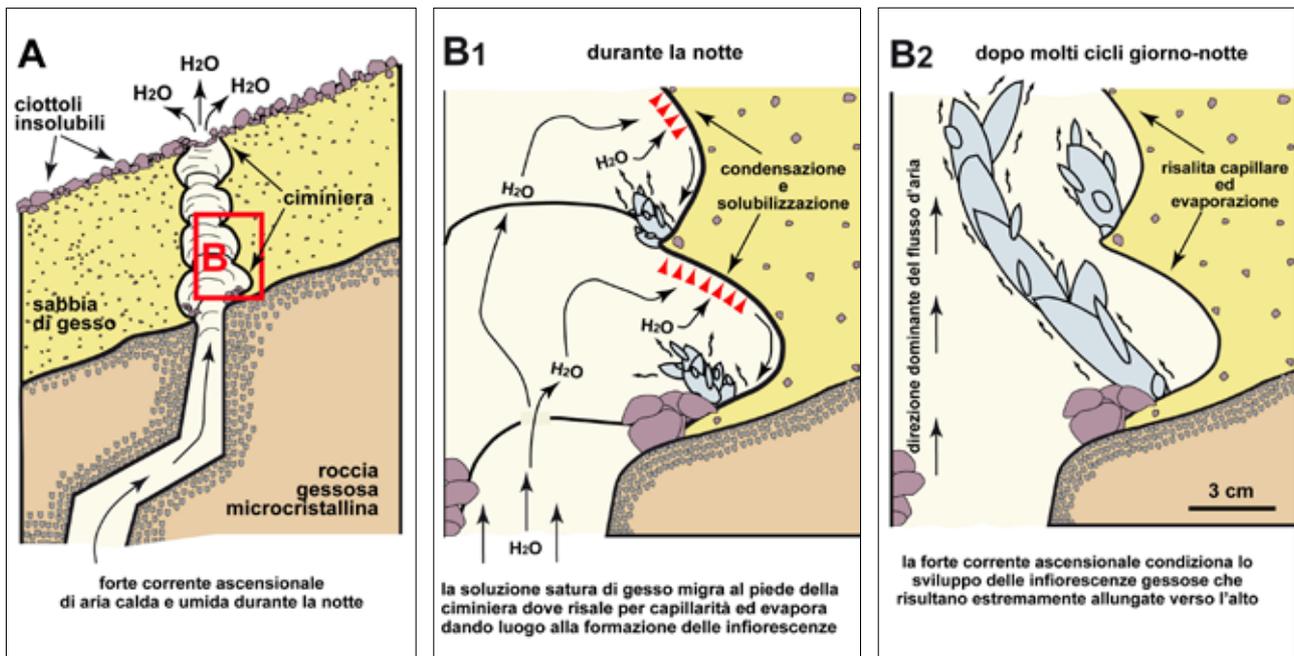


Fig. 41 – Cueva del Leon, Neuquen, Argentina: A) la ciminiera che si è formata all'interno della sabbia di gesso, che ricopre la formazione in cui si è sviluppata la grotta, per l'effetto della dissoluzione operata dall'aria calda umida che risale dalla grotta stessa (da FORTI *et al.*, 1993); B1) durante la notte la corrente ascensionale fa condensare l'acqua che scioglie leggermente le pareti della ciminiera e la soluzione satura di gesso che si forma è trascinata dal flusso d'aria verso l'alto dove evapora depositando il gesso; B2) i coralloidi che si formano sono fortemente condizionati dalla corrente ascensionale e si sviluppano verso l'alto.

bientali a partire dall'analisi dell'abbondanza relativa di questi due minerali nelle grotte di una determinata area geografica (CALAFORRA & FORTI, 1999; CALAFORRA *et al.*, 2008).

I cristalli di gesso peculiari

Nella grande varietà di cristalli che si sviluppano al loro interno, le grotte in gesso ne ospitano alcuni assolutamente peculiari (spesso anche dal punto di vista genetico) (Tab. 4).

I cristalli criogenici

Data la relativa elevata solubilità del solfato di calcio, le acque di infiltrazione meteorica, che congelano all'interno delle grotte in gesso, vi sviluppano depositi peculiari (le polveri di gesso), costituiti da aggregati di piccolissimi cristalli di molti minerali, di cui però la stragrande maggioranza è gesso puro, sotto forma di cristalli singoli o geminati, euedrali o subeuedrali, normalmente molto simili, anche se estremamente più piccoli, di quelli che si formano all'interno degli interstrati marnoso-argillosi delle grotte in gesso delle aree temperate umide (Fig. 43A, B, C).

In alcuni casi, però la forma interna, e a volte anche esterna, è condizionata dalla concomitante precipitazione del ghiaccio che impedisce lo sviluppo di cristalli euedrali: infatti il congelamento avviene all'in-

terno della loro struttura, da cui poi viene eliminato successivamente, lasciando vuoti più o meno grandi (Fig. 42 D), fino a causare lo sviluppo di cristalli scheletrici (Fig. 43E, F).

Nel caso poi che l'ammasso di ghiaccio si trovi in una zona della grotta che in estate ha temperature al di sopra dello zero, allora, a seguito di successivi cicli di parziale disgelo e rigelo (Fig. 44A, B), possono formarsi, per diagenesi dalle polveri, degli aggregati cristallini del tutto particolari, che presentano una struttura a cono rovesciato costituita da cristalli aciculari che, dal basso verso l'alto, tendono progressivamente ad aumentare di numero e quindi ad assumere una conformazione quasi fibroso-raggiata (Fig. 44D).

I porcospini criogenici

Nell'area di Pinega, nel nord della Russia, il clima è molto rigido, tanto che nelle numerose grotte in gesso dell'area il permafrost interessa i potenti depositi argillosi limosi presenti al loro interno.

Recentemente, all'interno dei depositi influenzati dal permafrost, sono stati trovati alcuni strani aggregati di sottili cristalli di gesso prismatici, che sono stati chiamati "porcospini" per la loro notevole somiglianza con questo piccolo mammifero (MALKOV & SHAVRINA, 1991; KORSHUNOV & SHAVRINA, 1998) (Fig. 45).

Qualora si siano sviluppati ben all'interno di un depo-

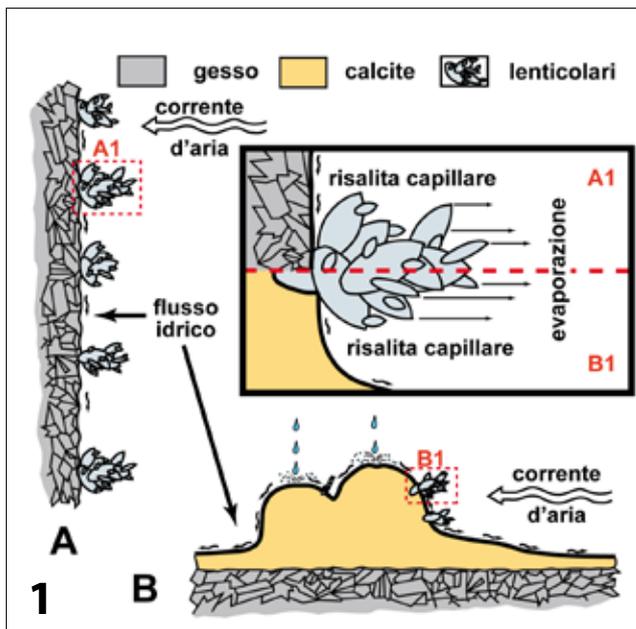


Fig. 42 – 1) lo sviluppo dei coralloidi è sempre indotto da risalita capillare ed evaporazione che permette alla soluzione, originariamente sottosatura rispetto al gesso, di diventarne invece progressivamente sovrasatura (da FORTI & RABBI 1981, modificata); 2) Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): infiorescenze su concrezione di calcite (Foto: Piero Lucci).



Tipo di cristalli	Meccanismo genetico	Prima citazione
Cristalli criogenici	Cristalli euedrali o sub-euedrali da segregazione per congelamento	ANDREYCHOUK <i>et al.</i> , 2013
Porcospini criogenici	Cicli di segregazione per il congelamento stagionale	KORSHUNOV & SHAVRINA, 1998
Cristalli tabulari epitassiali	Lenta ossidazione del H ₂ S in acque sature di gesso	FORTI, 1988
Aggregati microcristallini lungo i piani di sfaldamento	Condensazione accentuata all'interno di strette fessurazioni, quindi risalita capillare ed evaporazione	BADINO <i>et al.</i> , 2011
Cristalli prismatici su stalattiti di gesso	Ossidazione del H ₂ S dove non è possibile un tamponamento dell'acidità	FORTI & LUCCI, 2016
Abeti di gesso	Regime di alimentazione idrica	CALAFORRA & FORTI, 2021
Monete di <i>lapis specularis</i>	Lenta evaporazione ed impedimento sterico	LO CONTE <i>et al.</i> , 2020
Aggregati antropogenici	Condensazione accentuata all'interno di incisioni, quindi risalita capillare ed evaporazione	FORTI <i>et al.</i> , 2019

Tab. 4 – Cristalli di gesso peculiari e loro meccanismo genetico.

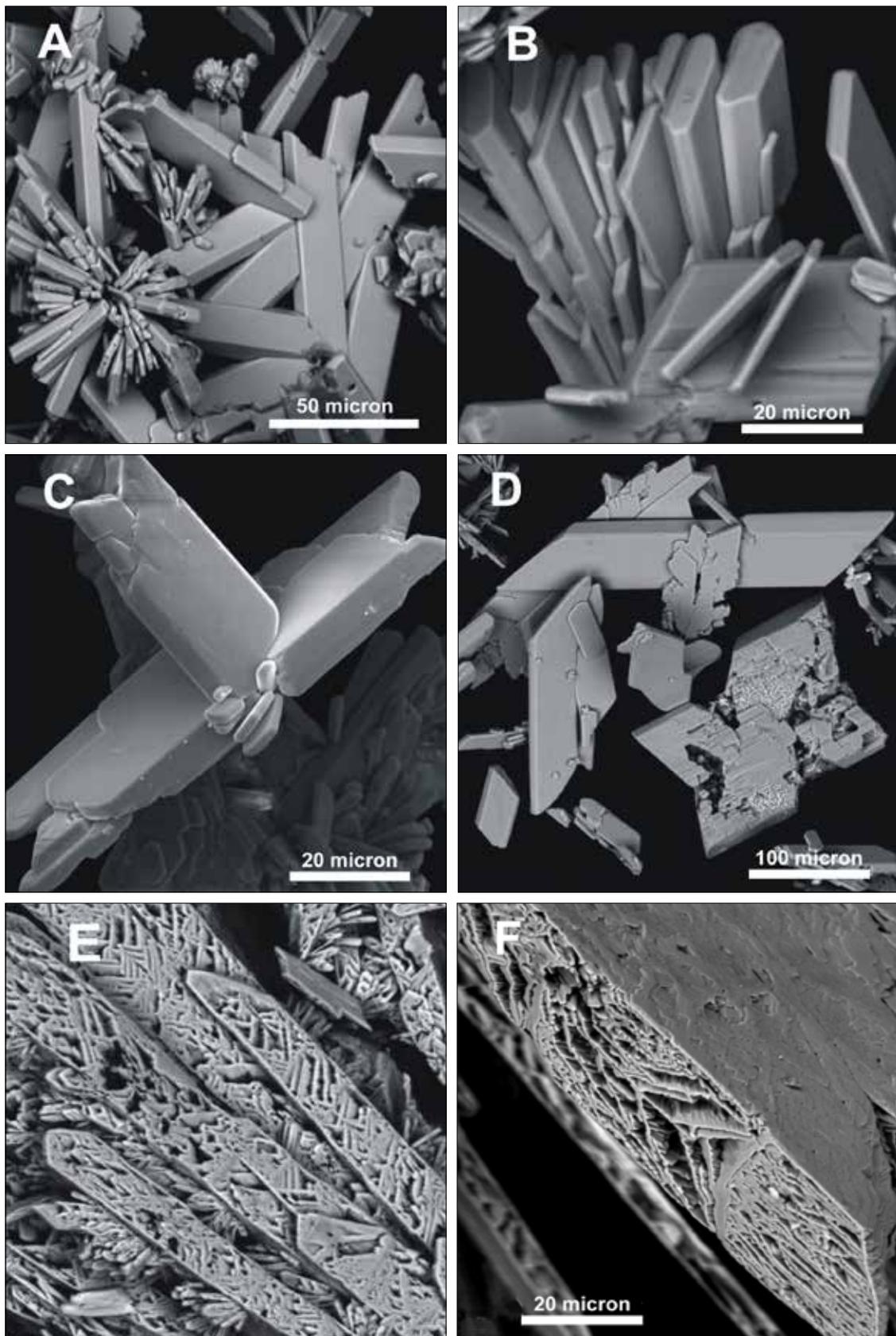


Fig. 43 – Immagini al microscopio elettronico di cristalli criogenici di gesso della Grotta di Kungur, Russia: A) cristalli tabulari e aggregati a “rosetta” di prismatici; B) cristalli tabulari ad accrescimento parallelo; C) geminati a ferro di lancia; D) in basso a sinistra un cristallo che presenta molte cariatore nella sua struttura; E) insieme di cristalli scheletrici co-precipitati con il ghiaccio, che si è sciolto successivamente; F) ingrandimento di uno di questi cristalli per evidenziare come i veli di gesso all’interno si siano depositi seguendo esattamente i piani cristallini del gesso (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata) (Foto: Olga Kadebskaya e Elena Chirkova).

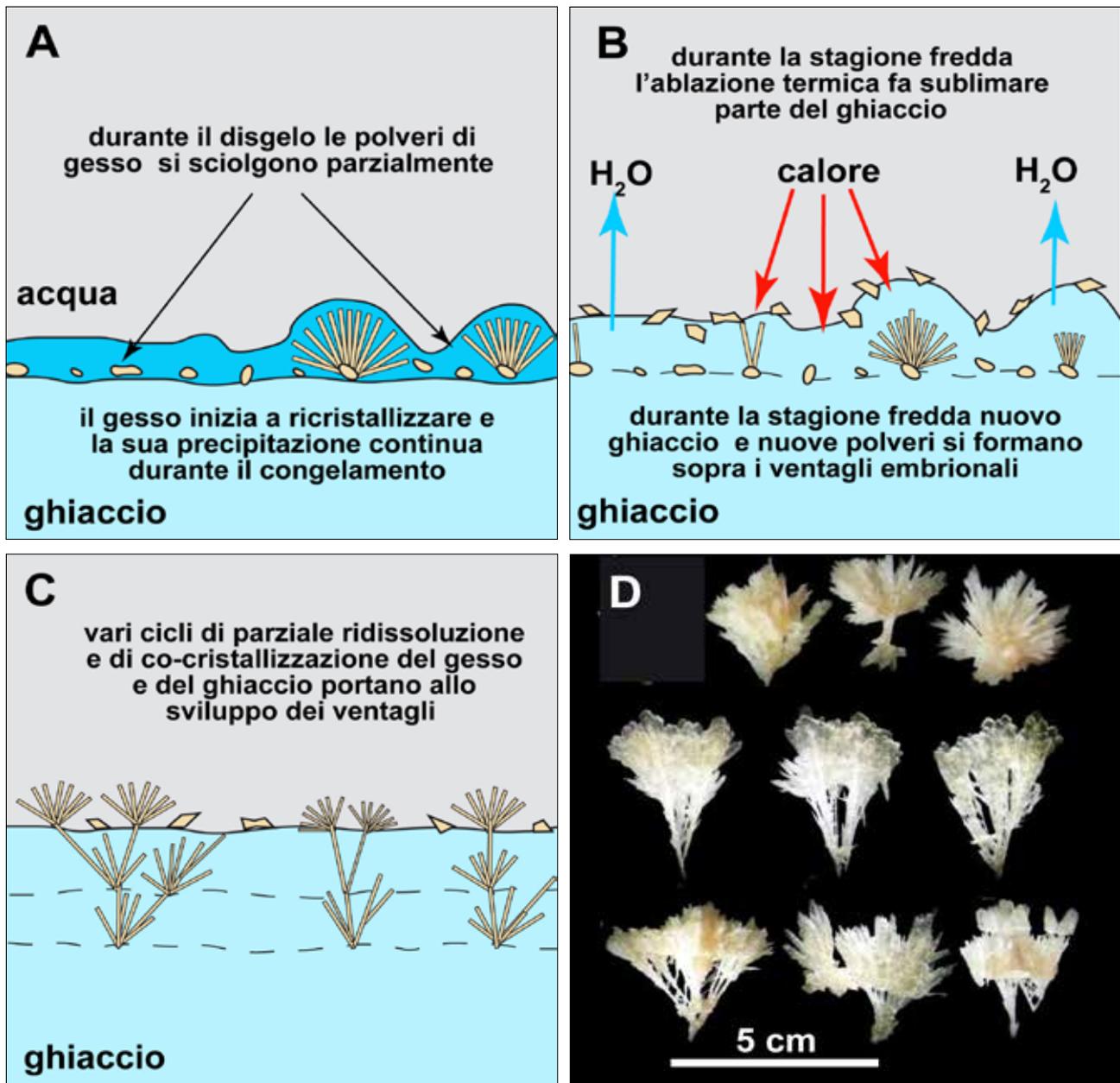


Fig. 44 – Stadi nello sviluppo dei ventagli di gesso che si formano all'interno dei ghiaccio in zone di parziale fusione stagionale: A) durante il disgelo si ha una parziale solubilizzazione delle polveri di gesso a cui segue la formazione dei cristalli aciculari; B) il congelamento totale causa la formazione di ulteriore polvere di gesso che l'ablazione termica porta in superficie; C) vari cicli di gelo-disgelo portano allo sviluppo dei ventagli (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata); D) ventagli estratti dal ghiaccio della Grotta di Kungur (Foto: Ivan Chajkowskij).

sito argilloso abbastanza potente, i porcospini di gesso risultano sferoidali, mentre se lo sviluppo avviene al contatto tra l'argilla e la roccia gessosa allora l'aggregato assume la forma emisferica. Infine, se lo strato di argilla è relativamente sottile, i porcospini assumono una forma lenticolare, anche molto schiacciata. Il diametro di queste formazioni va dai pochi centimetri, fino a raggiungere anche i 30 cm, e la loro superficie esterna è formata da cristalli lenticolari, che risultano essere più o meno geminati a ferro di lancia (o a coda di rondine) in funzione del grado di sovrassaturazio-

ne raggiunto dalle soluzioni che li hanno generati nel tempo (Russo, 1981). Il loro colore può essere trasparente o bianco, se la cristallizzazione è avvenuta senza inglobare impurezze, altrimenti può variare dal giallo pallido al bruno, in funzione della quantità di argilla che è stata intrappolata all'interno dei cristalli. In generale, più lento è stato il congelamento della soluzione, e più puri, quindi più trasparenti, sono i cristalli che si sono formati: questo è confermato dal fatto che i campioni di "porcospini" più puri sono stati sempre rinvenuti lontano dall'ingresso delle grotte e molto in

profondità, in luoghi quindi in cui le variazioni stagionali di temperatura sono minori e più gradualmente.

Va osservato infine che praticamente tutti i “porcospini” hanno una cavità al loro interno (da 1-2 fino a 15 mm di diametro), che spesso contiene un piccolo sassolino, tanto che, se il porcospino viene scosso, si sente il rumore causato dal suo sbattere sulle pareti del vacuo (KORSHUNOV & SHAVRINA, 1998).

Questo tipo di speleotema si può sviluppare esclusivamente in aree caratterizzate dalla presenza del congelamento invernale ed è controllata dal progressivo congelamento dell’acqua intrappolata nel sedimento argilloso; la crescita del porcospino, infine, sembra iniziare attorno ad una piccola cavità riempita d’acqua nel periodo estivo.

La cavità stessa, poi, deve la sua origine a successivi cicli di gelo e disgelo, che interessano la porzione di argilla intrisa d’acqua attorno ad un sassolino, la cui superficie esterna rende più facile la formazione del ghiaccio, fungendo da supporto per i germi cristallini (Fig.45A).

A causa dell’incremento di volume del ghiaccio rispetto all’acqua da cui è generato, la cavità originale, anno dopo anno, aumenta di volume finché non diventa grande abbastanza da permettere l’inizio dello sviluppo di un porcospino.

Quando inizia a formarsi il porcospino, la direzione di crescita dei cristalli di gesso avviene esattamente nel verso opposto al fronte di congelamento, seguendo il gradiente di sovrassaturazione e creando quindi una struttura sferica (Fig. 45B). Il sottile strato di gesso depositato durante l’inverno non viene sciolto in primavera quando l’argilla che lo contiene viene ri-imbibita d’acqua: questo perché la soluzione rimane saturata rispetto al gesso per le prime 1-2 settimane (Fig. 45C). Contemporaneamente la cavità interna rimane aperta e piena d’acqua perché il gesso preferisce crescere nella direzione dell’aumento della temperatura (cioè lungo l’interfaccia gesso/argilla). Infine, durante i periodi di congelamento invernali, l’acqua contenuta nel vacuo, grazie alla capillarità, migra in parte verso l’interfaccia gesso/argilla.

È evidente che ognuno dei periodi di congelamento, visto i piccoli volumi di soluzione coinvolta, può permettere solamente lo sviluppo di una crosticina di gesso molto sottile e pertanto lo sviluppo dei “porcospini” più grandi, vista la loro dimensione, ha sicuramente richiesto migliaia di cicli di gelo e disgelo (Fig. 45D). È stato fatto un calcolo approssimato del tempo necessario per sviluppare i più grandi di questi aggregati, che sembra si siano sviluppati negli ultimi 8000 anni (KORSHUNOV & SHAVRINA, 1998).

Un altro tipo di “porcospino”, più piccolo di quelli appena descritti, è stato ritrovato esclusivamente all’in-

terno della grotta Ledyanaya Volna sempre nell’area carsica di Pinega: si era formato all’interno di una grande massa di ghiaccio (praticamente un piccolo ghiacciaio sotterraneo) e consisteva di una massa sferoidale di 6-8 centimetri di diametro costituita da un aggregato di cristalli aciculari di gesso (spessi non più di 1-2 mm e lunghi fino a 4 cm).

Un’altra peculiarità di questo particolare “porcospino” era la totale mancanza della cavità centrale al suo interno.

KORSHUNOV & SHAVRINA (1998) hanno supposto che in questo caso il meccanismo genetico sia stato differente da quello di tutti gli altri porcospini e fosse dovuto a processi diagenetici di ricristallizzazione. In pratica, durante i periodi di fusione parziale del ghiaccio, l’acqua trasforma la polvere di gesso dell’inverno precedente in moomilk che quindi, per lenta evaporazione, viene riprecipitato sotto forma di cristalli aciculari di gesso. Anche in questo caso centinaia, se non migliaia, di cicli di gelo-disgelo sono stati necessari per far raggiungere le dimensioni attuali a questo porcospino.

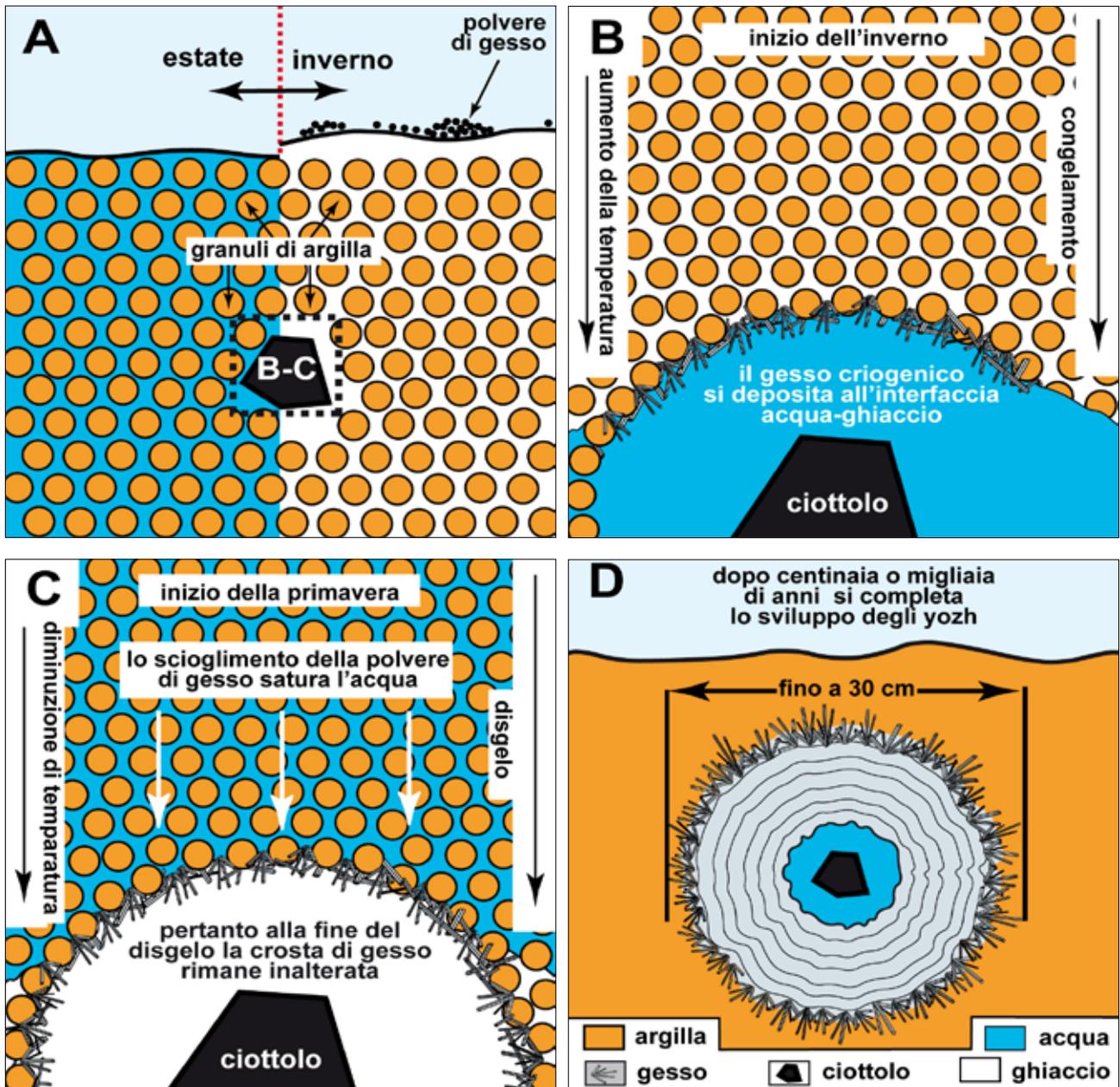
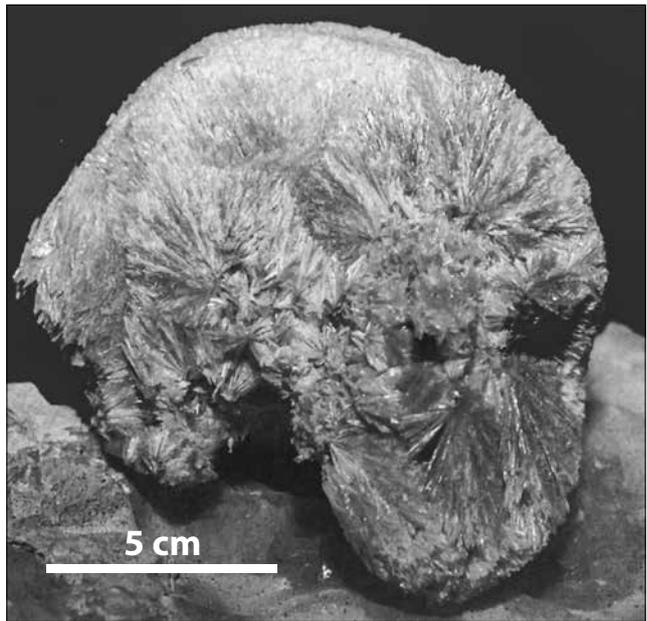
I cristalli tabulari epitassiali

Nelle grotte in calcare, soprattutto nelle aree caratterizzate da forti precipitazioni concentrate alternate a periodi di siccità prolungata è abbastanza comune osservare delle “scintilliti”, cioè delle concrezioni (essenzialmente colate, stalattiti, stalagmiti) di carbonato di calcio che, se illuminate con una luce diretta, brillano in maniera evidente (HILL & FORTI, 1997). Il fenomeno è causato dalla presenza di macro-cristalli tabulari di calcite che si sono formati per epitassia sulla superficie di queste concrezioni alla fine di un periodo umido, e si sono poi progressivamente accresciuti sempre alla fine dei successivi periodi umidi (CALAFORRA & FORTI, 2019). Questi grandi cristalli espongono pertanto una superficie perfettamente piana che, come uno specchio, riflette i raggi luminosi che vi impattano, con un angolo esattamente uguale a quello di incidenza.

In nessuna delle grotte in gesso attualmente note al mondo si sono mai osservate scintilliti. Solamente nella grotta di Santa Ninfa, in Sicilia, è stato segnalato un fenomeno simile anche se riferito, non a una concrezione, ma ad una parete di roccia gessosa.

Nella zona più profonda di questa cavità, in un ramo in cui sgorga una sorgente solfurea, la parete subverticale di gesso, situata nelle immediate vicinanze della sorgente, è ricoperta da una sottile (3-4 mm) superficie liscia e perfettamente trasparente, formata da pochi cristalli di gesso che evidentemente stanno ancora accrescendosi. Sulla superficie dei cristalli scorre con moto laminare un film d’acqua saturato in gesso, ma

Fig. 45 – Un “porcospino di gesso” di una grotta nel permafrost di Pinega (Russia del Nord) (da KORSHUNOF & SHAVRINA, 1998) e suoi stadi evolutivi, che sono controllati dall’alternanza annuale del gelo e disgelo dello strato superficiale del permafrost (da FORTI, 2017, modificata).



l'evaporazione non lo può interessare, perché l'umidità relativa in quella zona della grotta è costantemente attorno al 100%. Pertanto, quest'unico esempio di scintilliti in ambito gessoso non può essere certo indotto dallo stesso meccanismo attivo in quelle in carbonato di calcio (Fig. 46).

L'analisi delle caratteristiche microclimatiche e geochemiche dell'area in cui i cristalli epitassiali di gesso si andavano formando, ha evidenziato che la loro deposizione era la conseguenza diretta della sovrasaturazione estremamente bassa indotta dalla diffusione dell'acido solfidrico, presente nell'atmosfera e proveniente dalle acque solfuree appena affiorate nell'ambiente aerato, nelle acque sature di gesso che percolano sulla parete (FORTI, 1989).

Le acque di percolazione sono infatti ricche di ossigeno e pertanto l'acido solfidrico viene rapidamente ossidato ad acido solforico, aumentando così la concentrazione di ioni solfato nella soluzione, con conseguente lieve sovrasaturazione rispetto al gesso che è quindi costretto a precipitare. Evidentemente però, la sovrasaturazione così ottenuta non è sufficiente a consentire la formazione di nuovi germi cristallini (che richiede lo sviluppo di una struttura tridimensionale), pertanto è possibile solo l'accrescimento per epitassia (processo bidimensionale che necessita di minore energia di cristallizzazione) (Russo, 1981). La complessità delle condizioni al contorno necessarie per lo sviluppo di scintilliti di gesso spiega come mai, sino ad oggi, tali formazioni siano state osservate esclusivamente in una sola grotta al mondo.

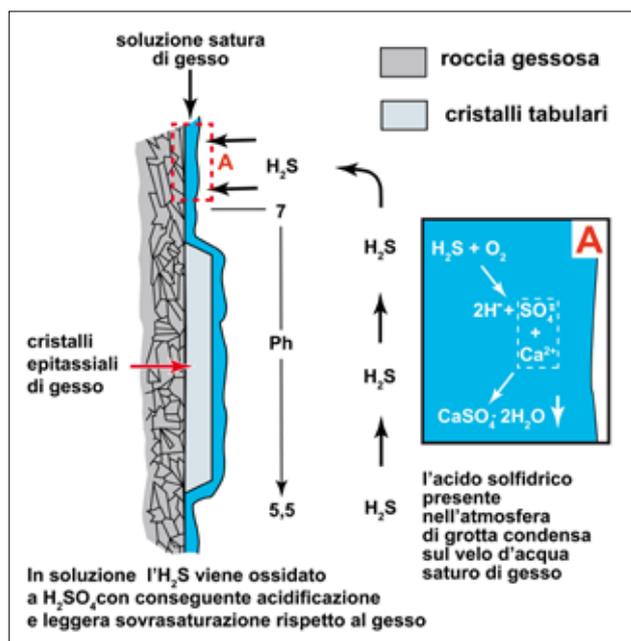


Fig. 46 – Meccanismo genetico che ha permesso l'evoluzione di cristalli di gesso tabulari all'interno della grotta di Santa Ninfa (Sicilia) (da FORTI, 2017 modificata).

Gli aggregati microcristallini lungo i piani di sfaldamento principali

Molto spesso, quando in grotta sono esposti aggregati di grandi cristalli di gesso, questi presentano degli aggregati microcristallini secondari di colore bianco candido (Fig. 47A), che si sviluppano esattamente lungo i piani di sfaldamento principali (010) leggermente divaricati, come conseguenza di piccoli stress tettonici locali.

Questi aggregati microcristallini si evolvono perché durante i periodi umidi la condensazione avviene più facilmente all'interno delle strette fessure formatesi lungo i piani di sfaldamento (Fig. 47B-D) piuttosto che sulla superficie esterna del cristallo, che è praticamente piatta (BADINO *et al.*, 2011). In parte questo avviene perché la superficie cristallina, estremamente liscia e del tutto priva di porosità, rende minimo lo strato limite e nulla la turbolenza in caso di condensazione e quindi la solubilizzazione del gesso è praticamente inibita. La spiegazione del motivo per cui tale solubilizzazione avvenga all'interno delle strette fratture è riportata nel paragrafo relativo agli aggregati cristallini antropogenici e nello schema di Fig. 56.2.

Le forze capillari, poi, portano all'interno di dette fessure anche l'eventuale condensa formatesi sulla superficie esterna del cristallo. L'acqua che così si trova ad intimo contatto con il gesso, lo solubilizza e diviene, in breve tempo, satura rispetto al solfato di calcio.

Quando, alla fine delle precipitazioni meteoriche, l'umidità relativa dell'atmosfera di grotta diminuisce, comincia ad evaporare l'acqua che si trova sull'orifizio della fessura, con conseguente richiamo di altra acqua per capillarità dalle zone più profonde della fessura stessa.

Questo processo fa sì che il gesso microcristallino, sotto forma di fibre allungate verso l'esterno, si depositi esclusivamente all'imbocco delle fessure, dando così luogo ad aggregati di gesso fibroso disposti esattamente lungo il piano di sfaldamento e con la superficie esterna emisferica (Fig. 47C-D).

In realtà la formazione degli aggregati microcristallini appena descritti non è limitata solo ai piani di sfaldamento principali dei grandi cristalli di gesso, ma è diffusa anche sulle pareti di roccia su cui sono esposti cristalli di taglia media (5-10 cm) e, più raramente, anche piccola (2-5 cm). In questo caso, però, non sono i piani di sfaldamento le discontinuità lungo le quali gli aggregati si sviluppano, ma i piani di contatto tra i differenti cristalli che compongono la roccia, soprattutto quando al loro interno vi sono sottili veli di argilla che possono favorire l'accumulo di acqua di condensazione e/o di flusso superficiale. Il meccanismo genetico è assolutamente identico a quello appena descritto per i piani di sfaldamento ma il risultato

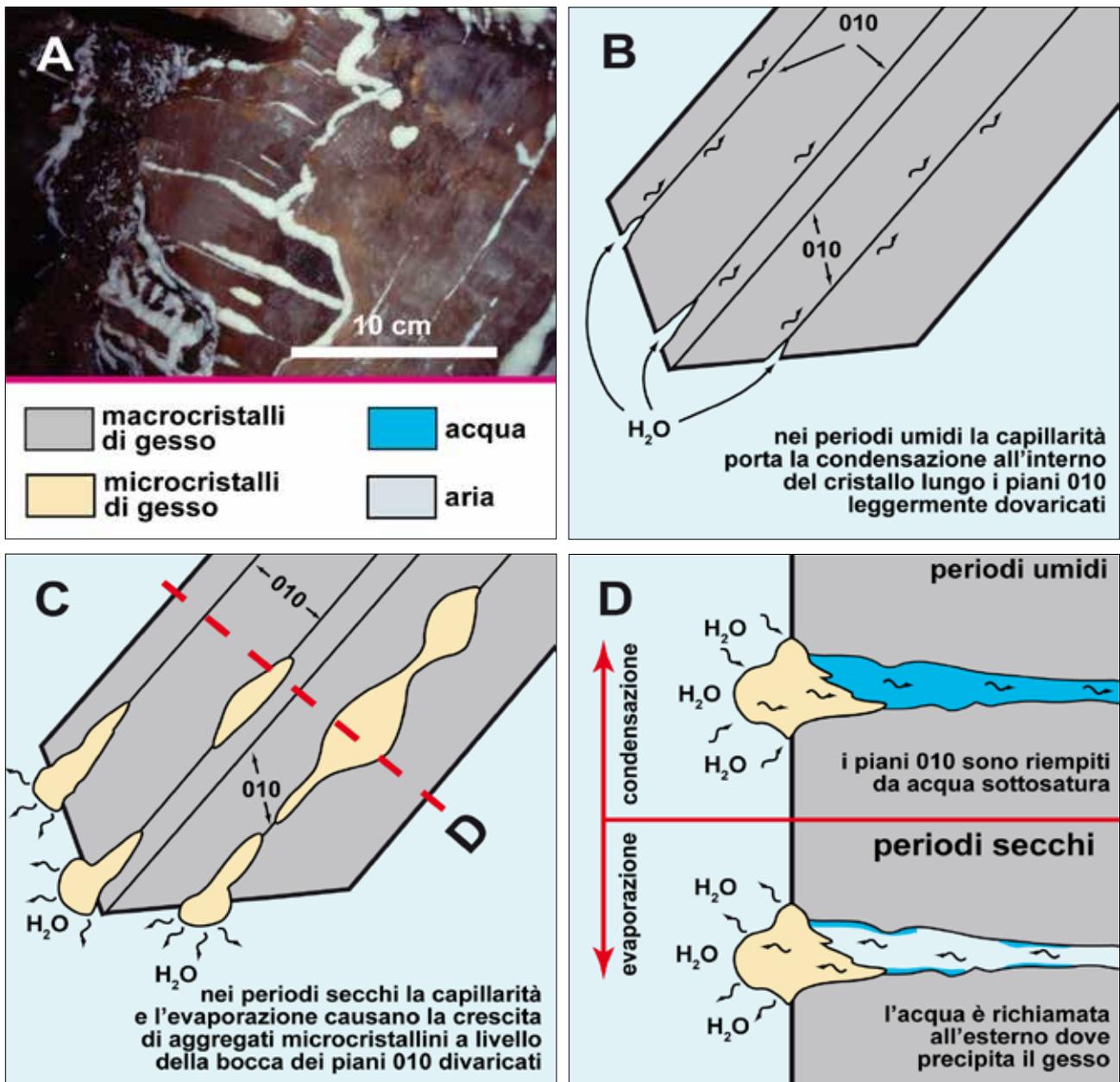


Fig. 47 – A) Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): grandi cristalli di gesso con candidi aggregati microcristallini che si sono sviluppati lungo i piani di sfaldamento 010 e quelli di contatto intercristallini (Foto: Piero Lucci); B-C-D) movimenti dell'acqua controllati dai processi di condensazione-capillarità ed evaporazione e la conseguente evoluzione degli aggregati. (da BADINO *et al.*, 2011, modificata).

finale è spesso la formazione di “cordoli” di dimensioni e spessore maggiori (Fig. 48A). In effetti, in alcuni casi favorevoli, l'evoluzione dei cordoli porta ad una loro coalescenza tanto da trasformarli, al limite, in una vera e propria colata parietale in cui non è quasi più possibile distinguere i singoli elementi di partenza (Fig. 48C). Infine, forme assolutamente simili ai cordoli microcristallini si formano anche sulle superfici suborizzontali dei ghiacciai sotterranei della Grotta di Kungur (ADREYCHOUK *et al.*, 2013) che si trovano nella zona soggetta a variazioni climatiche stagionali (Fig. 49).

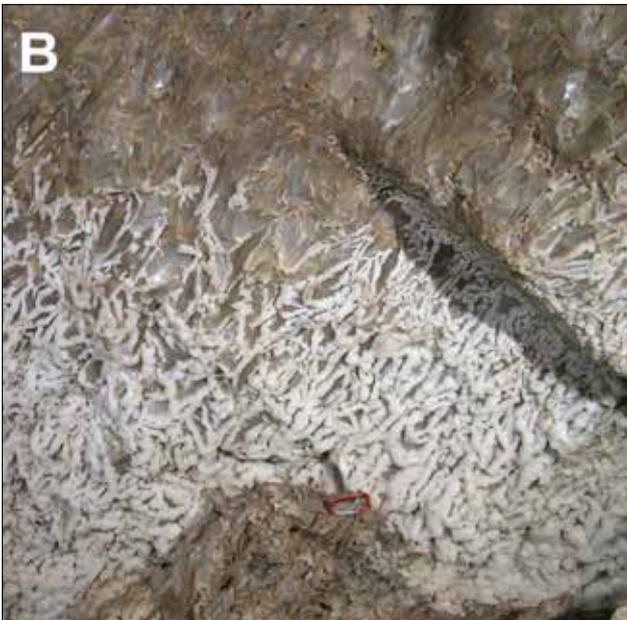
In quelle condizioni di variabilità stagionale della

temperatura, infatti, la polvere di gesso può subire una progressiva diagenesi, dando luogo a strutture del tutto particolari, quali appunto i bordi poligonali.

Si tratta di aggregati microcristallini dovuti alla cristallizzazione frazionata delle polveri di gesso, molto simili morfologicamente ai boxwork (HILL & FORTI, 1997), che si sviluppano a livello dei piani di contatto tra i vari cristalli di ghiaccio.

Il meccanismo che governa la loro evoluzione, però, è totalmente differente, essendo governato dall'alternanza di periodi di congelamento totale seguiti da altri di scioglimento parziale.

Durante l'inverno, il congelamento dell'acqua, cau-



sando la cristallizzazione frazionata del ghiaccio, tende a concentrare lungo i piani intercrystallini i singoli granelli della polvere di gesso (Fig. 49A): questo avviene perché, come già accennato, la cristallizzazione frazionata ha la propensione ad espellere dalla struttura del cristallo ogni tipo di impurezza.

Durante il periodo di parziale fusione, poi, sia per il passaggio ad acqua liquida, che per la progressiva perdita di volume che questo passaggio comporta, i piani di contatto tra i cristalli di ghiaccio si divaricano leggermente, permettendo quindi all'acqua di entrarvi e trascinarvi i singoli granelli di polvere (Fig. 49B). Contemporaneamente, l'acqua di fusione, essendo praticamente pura, solubilizza in parte i granuli di polvere, processo che si inverte appena ricomincia la stagione fredda, quando l'acqua, congelando, rideposita tutto il gesso solubilizzato che va a cementare tra loro i granuli residui delle polveri. Il processo di concentrazione lungo i piani intercrystallini riprende quindi anche grazie ai processi di ablazione termica, che tendono a far emergere al di sopra della superficie del ghiaccio le particelle solide precedentemente inglobate nella sua massa.

Alla fine di numerosi cicli di gelo-disgelo, il risultato di questi processi, in parte antagonisti, è la formazione di strutture poligonali, sopraelevate anche di vari millimetri (Fig. 49C).

Queste strutture poligonali sono costituite da aggregati microcrystallini di gesso al cui interno possono ancora trovarsi dei residui delle polveri originali, cementati da microcrystalli di neoformazione.

Generalmente questi cordoli poligonali di gesso fuoriescono dalla superficie del ghiaccio, assolutamente liscia e levigata, a causa dei processi di ablazione che ne hanno provocato non solo la levigazione, ma anche e soprattutto l'abbassamento relativo (Fig. 49D).

I cristalli prismatici sopra le stalattiti di gesso

Come già precedentemente accennato, lo sviluppo delle infiorescenze di gesso, sia sulle pareti di roccia gessosa sia sulle concrezioni di carbonato di calcio, è abbastanza comune nelle grotte delle aree caratterizzate da un clima temperato umido. Tuttavia, fino a poco tempo addietro, non vi erano state segnalazio-

Fig. 48 – Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): A) cordoli di aggregati microcrystallini lungo i piani di contatto tra i vari cristalli di gesso che costituiscono la roccia; B) parete in cui lo sviluppo di questi aggregati ha quasi completamente obliterato la struttura originaria della roccia; C) particolare di B in cui il processo di copertura della roccia di gesso è quasi ultimato (Arch. RNI Grotta di Santa Ninfa, foto: Marco Vattano).

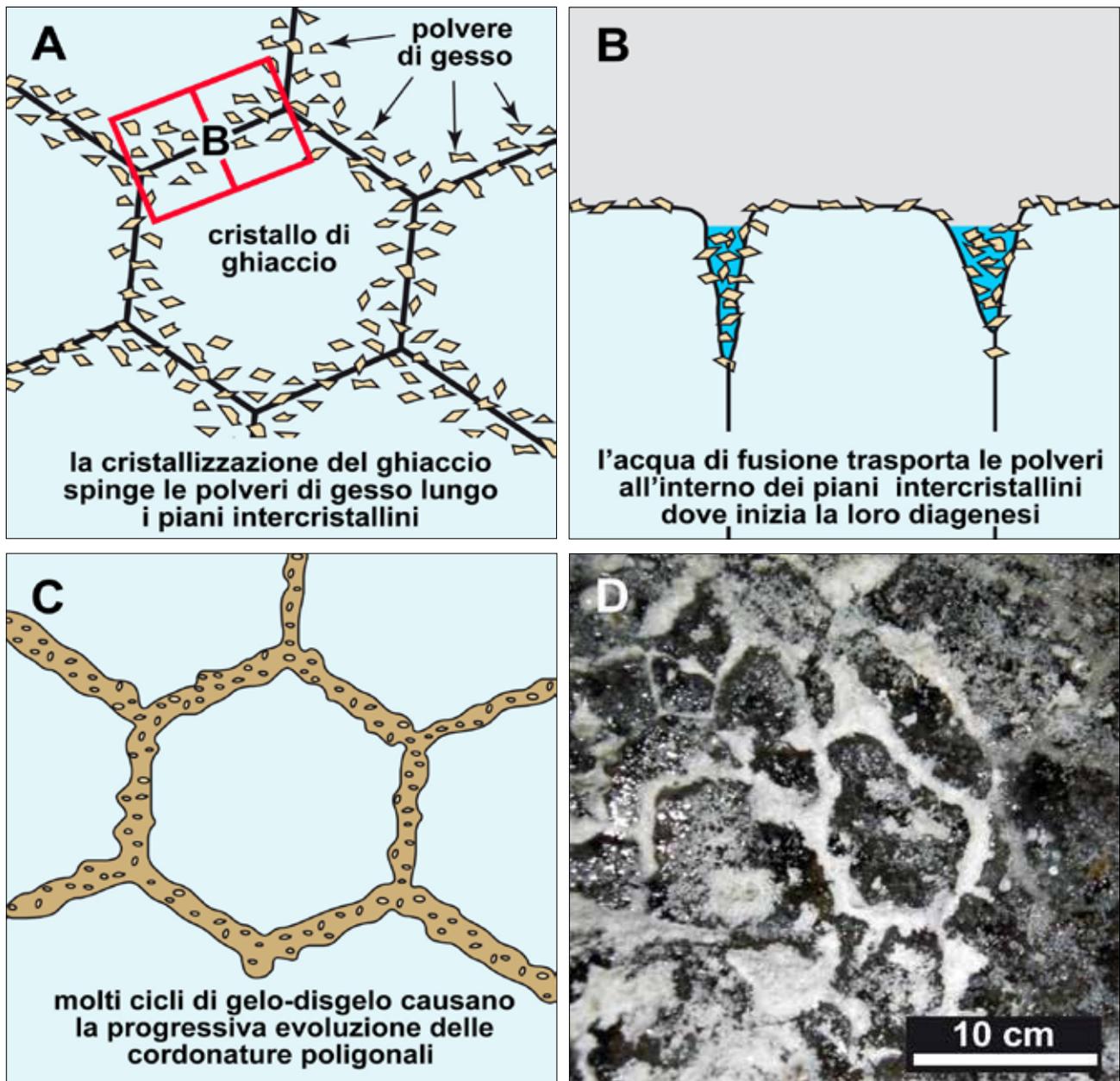


Fig. 49 – Stadi che portano alla formazione di cordoli poligonali di gesso lungo i piani intra-cristallini del ghiaccio nelle aree termovariabili della Grotta di Kungur in Russia: A) durante il congelamento i granuli della polvere che si formano per cristallizzazione frazionata vengono sospinti verso i piani intercrystallini; B) durante il disgelo la diminuzione di volume porta allo scollamento dei piani intercrystallini dove l'acqua trascina i granuli della polvere, parzialmente solubilizzandola; C) molti cicli di gelo e disgelo portano allo sviluppo delle cordonature poligonali (D) (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata).

ni di cristalli di gesso euedrali cresciuti su stalattiti di gesso. Recentemente, però, geminati pseudo-esagonali allungati (comunemente chiamati dagli speleologi “prismatici”) sono stati documentati in due grotte dell’Emilia-Romagna: Grotta della Befana (Vena del Gesso romagnola) (Fig. 50A) e Grotta del Bules (Gessi della Romagna orientale), (RONDA SPELEOLOGICA IMOLESE, 2011; FORTI & LUCCI, 2016). Visto che (Fig. 39A) i cristalli prismatici, per potersi sviluppare, richiedono una energia di cristallizzazio-

ne più alta di quella necessaria ai lenticolari (Russo, 1981), è evidente che il meccanismo che sovrintende lo sviluppo di questi cristalli deve essere differente da quello che permette la formazione delle normali infiorescenze, costituite appunto da lenticolari (Fig. 42). Ambedue le grotte, in cui sono stati osservati i prismatici, ospitano al loro interno piccole scaturigini di acqua solfurea anche se le stalattiti, che si trovano molto vicine alla superficie esterna, vengono alimentate esclusivamente, e per periodi di tempo limitati agli

eventi piovosi, da acqua di infiltrazione meteorica. Ed è proprio la combinazione dell'alimentazione salinaria delle stalattiti con la presenza costante di acqua solfurea, che scorre sotto di loro, ad aver permesso lo sviluppo dei cristalli prismatici (Fig. 50B).

Durante i periodi secchi, che sono relativamente lunghi, la condensazione di acqua e H_2S sulla superficie delle stalattiti di gesso innesca, infatti, l'ossidazione dello stesso ad acido solforico, senza che possa intervenire una sua rapida diluizione, o addirittura dilavamento ad opera di un flusso di alimentazione meteorica attivo sulla superficie esterna delle stalattiti. Pertanto l'evaporazione, anche se scarsa, non fa altro che aumentare la concentrazione dell' H_2SO_4 e pertanto si realizza una condizione di sovrassaturazione più alta del solito, con conseguente formazione di cristalli prismatici invece che di normali lenticolari.

Gli abeti di gesso

Gli abeti di gesso sono particolari aggregati di infiorescenze di gesso, spesso microcristalline, ma anche in parte macrocristalline, che si sviluppano al posto delle stalagmiti normali in alcune grotte di Sorbas (Sima de los Pinos, SO-21, C-3, El Laminador, Sima Fe, etc.) (CALAFORRA & FORTI, 2021). Hanno una struttura quasi perfettamente conica e le infiorescenze, crescendo, tendono ad allargarsi verso l'esterno, per cui l'impressione è quella di trovarsi dinanzi ad un abete pietrificato (Fig. 51C).

Abeti di calcite non sono attualmente noti mentre, almeno in un caso, è stato osservato nella Lechuguilla

Cave (HILL & FORTI, 1997) un cono formato da infiorescenze di aragonite, che però hanno assunto una forma molto più acuminata delle omologhe forme in gesso, tanto da non discostarsi molto da quella di una normale stalagmite.

La genesi degli abeti di gesso è controllata dal clima di Sorbas che è caratterizzato da temperature mediamente elevate e da rare, ma forti, precipitazioni seguite da lunghi periodi di siccità. Infatti le zone in cui i coni si formano è sempre sede di uno stillicidio molto violento per brevi periodi, subito dopo un importante evento piovoso, seguiti poi da una quasi totale assenza di gocciolamento per tutto il resto del tempo.

A differenza delle normali stalagmiti lo sviluppo dei coni (CALAFORRA & FORTI, 2021) non dipende per nulla dall'alimentazione diretta dovuta all'acqua che cade dal soffitto e scorre, per gravità, sulla superficie esterna della stalagmite, mentre è invece da ascrivere totalmente ad un processo di risalita capillare e di evaporazione (Fig. 51D).

La velocità di flusso durante i periodi di alimentazione attiva è, per quanto detto, prima necessariamente molto rapida e pertanto il tempo per l'eventuale evaporazione, necessaria per consentire l'instaurarsi di una sovrassaturazione rispetto al gesso, è molto scarso. Inoltre, nei brevi periodi di attività idrica, gli ambienti di grotta ove crescono i coni di infiorescenze diventano sicuramente saturi di umidità relativa in brevissimo tempo, anche per la formazione di un elevato numero di goccioline da splash. In queste condizioni quindi, solo un flusso gravitativo estremamente lento potrebbe garantire una seppur minima sovrassatu-

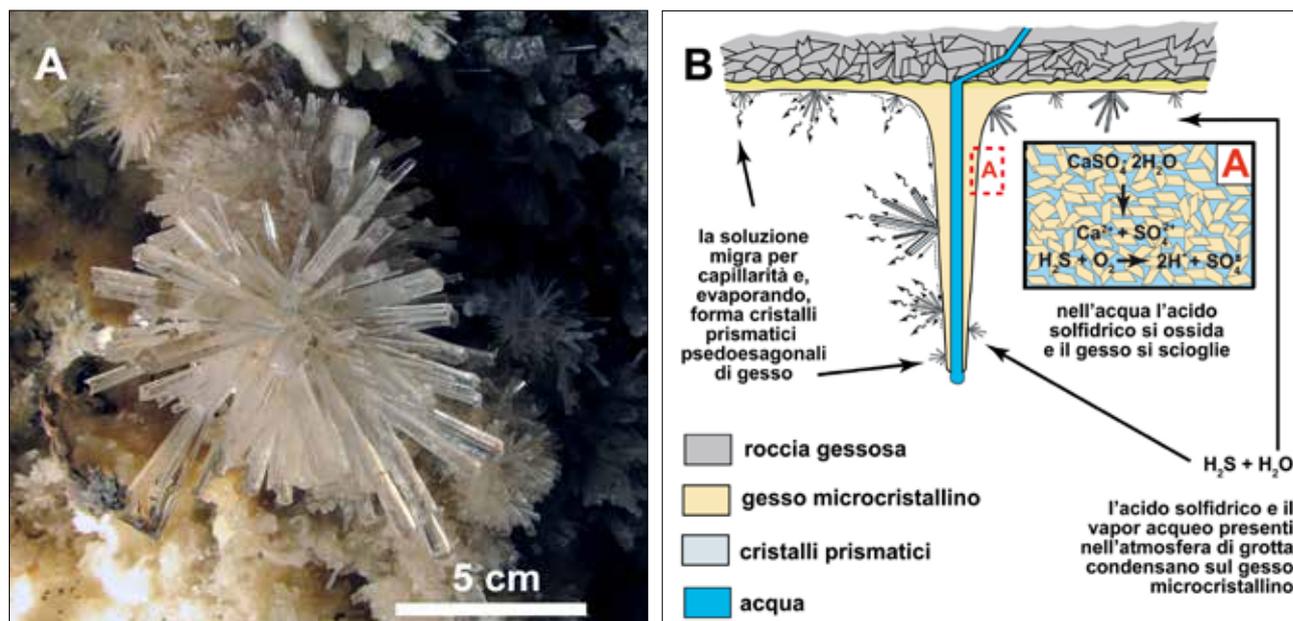


Fig. 50 – A) Grotta della Befana (Vena del Gesso romagnola): particolare dei prismatici di gesso cresciuti su una stalattite sempre di gesso (Foto: Piero Lucci); B) meccanismo che ha permesso la formazione dei cristalli prismatici (da FORTI & LUCCI, 2016, modificata).

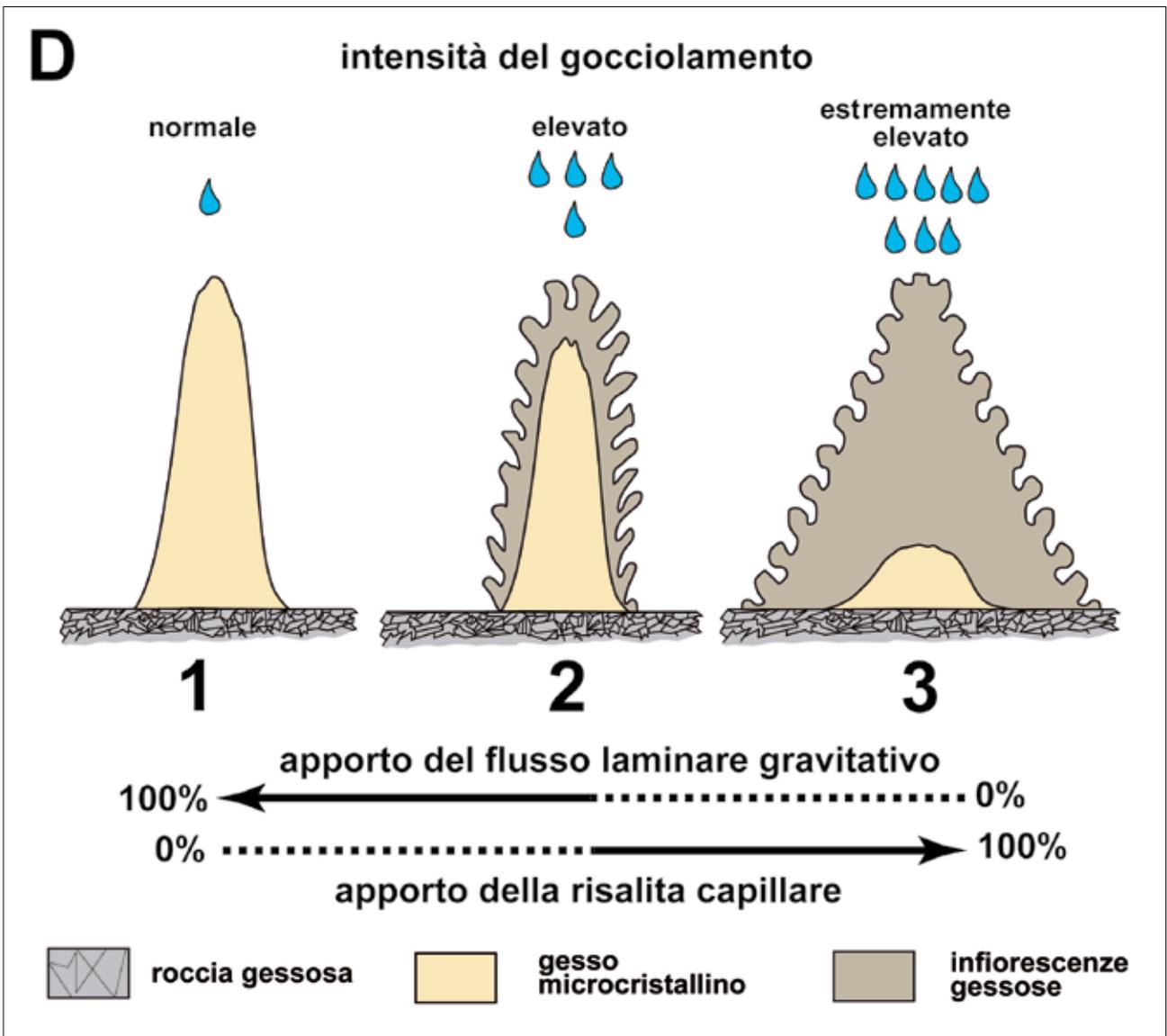
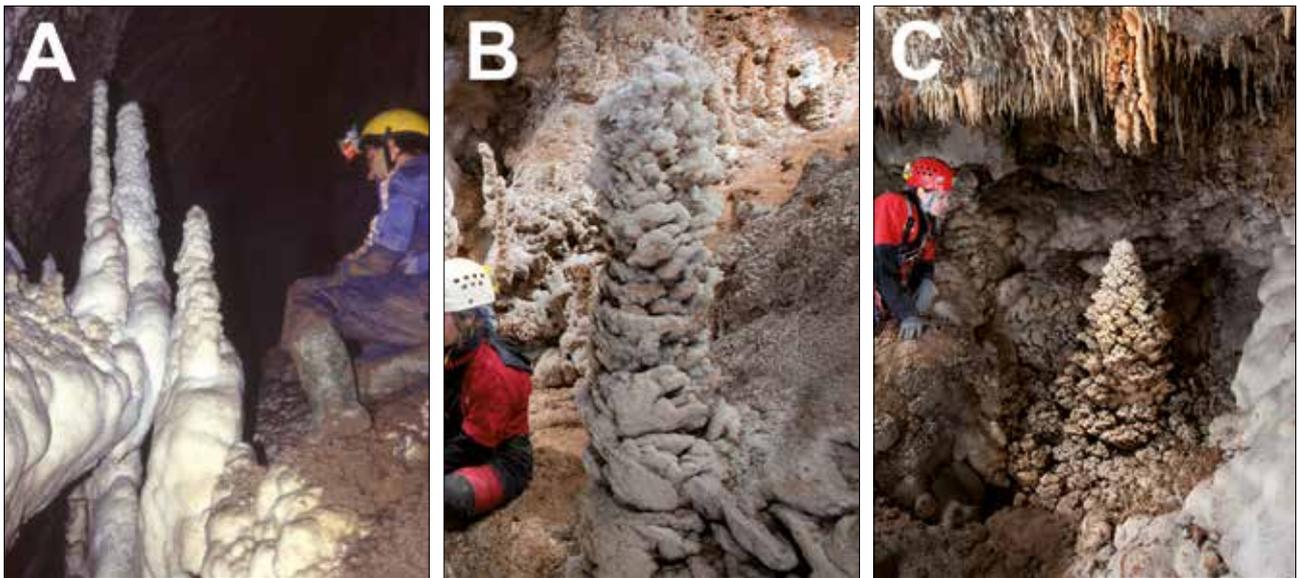


Fig. 51 – A) Grotta SO-21, Sorbas (Spagna): un gruppo di normali stalagmiti di gesso (Foto: Espeleo-Club Almería); B) Grotta El Laminador Sorbas (Spagna): stalagmite con escrescenze di infiorescenze a “palma” (Foto: Paco Hoyos); C) Grotta Sima Fe, Sorbas (Spagna): abete di gesso (Foto: Paco Hoyos); D) i due fattori che concorrono allo sviluppo degli abeti di gesso sono l’intensità di gocciolamento e la deposizione del gesso, che deve avvenire esclusivamente per risalita capillare (da CALAFORRA & FORTI, 2021).

razione, tale da permettere lo sviluppo di stalagmiti “normali”, formate da “palizzate” di cristalli di gesso orientati con l’asse c perpendicolare alla superficie della concrezione (Fig. 51A e D1). È evidente però che la caratteristica di flusso richiesto è in contrasto insanabile con l’alimentazione postulata. Si può quindi dire con certezza che il velo d’acqua, che normalmente scorre per gravità sulle stalagmiti in queste condizioni, non possa contribuire, se non in maniera del tutto trascurabile, alla deposizione del gesso. Al massimo, se la quantità d’acqua che alimenta la concrezione è sì elevata, ma comunque non eccessiva (Fig. 51B), si potranno formare delle stalagmiti a “palma” o a “piattelli”. Questo tipo di concrezioni di calcite è abbastanza comune nelle grotte in calcare (HILL & FORTI, 1997), ma in quel caso si tratta sempre di speleotemi di calcite e pertanto la diffusione della CO_2 può attivarsi anche nel breve lasso di tempo in cui è attivo il flusso

gravitativo. Circostanza questa che inibisce l’evaporazione che necessariamente deve creare la sovrasaturazione rispetto al gesso. Pertanto, stalagmiti di gesso a palma possono svilupparsi solo in presenza di una alimentazione, certo limitata nel tempo, ma non eccessiva, per permettere appunto al flusso gravitativo di depositare il materiale, mentre contemporaneamente si attivano la risalita capillare e l’evaporazione a formare i coralloidi di gesso tutto attorno alla stalagmite. Tali coralloidi saranno caratterizzati da cristalli, non più a palizzata ma che tenderanno a deflettersi, per creare strutture botroidali sempre più allungate verso l’alto (Fig. 51D2).

La struttura a cono si svilupperà invece quando il contributo alla crescita del flusso gravitativo sarà nullo e tutta la concrezione risulterà depositata per risalita capillare ed evaporazione (Fig. 51C, D3). Nei con, poi, la struttura delle singole infiorescenze tenderà, con il

tempo, a diventare sempre più verticale, e inoltre, sulla sommità delle infiorescenze più elevate, inizieranno a svilupparsi non più cristalli di gesso fibroso ma sub-euedrale, dato che la velocità di alimentazione, e quindi la sovrasaturazione, tenderanno a diminuire.

La struttura degli abeti di gesso dipende anche strettamente dal clima dell’area in cui si apre la grotta. Infatti in Sicilia, che è caratterizzata da un clima un poco più umido di quello di Sorbas, nella Grotta delle Serre di Ciminnna si trova una concrezione con caratteristiche molto simili a quelle degli abeti spagnoli, ma che presenta, sulla sua porzione apicale, e solo lì, coralloidi di calcite invece di infiorescenze gessose (Fig. 52).

Lo sviluppo dei coralloidi di carbonato di calcio dipende dal fatto che, al di sopra dell’abete, si trovano concrezioni di calcite, formatesi per dissoluzione incongruente e che, nei periodi umidi, forniscono all’area apicale dell’abete una soluzione ancora sovrasatura, rispetto al carbonato di calcio. La concrezione di calcite, poi, essendo meno porosa e più liscia delle infiorescenze di gesso, limita moltissimo la risalita capillare dell’acqua che imbebe l’abete, e quindi non viene ricoperta da infiorescenze gessose.

Rimane ancora da spiegare come sia possibile che all’interno della stessa grotta, e addirittura a volte nella stessa



Fig. 52 – Grotta delle Serre di Ciminnna (Sicilia): grande “abete di gesso” che sulla sommità presenta coralloidi di calcite; A) ingrandimento per evidenziare (perimetro bianco) l’area di sviluppo dei coralloidi di carbonato di calcio che si trovano quasi a contatto con le stalattiti, a loro volta formate da $CaCO_3$ (Foto: Marco Vattano).

sala, possano svilupparsi speleotemi molto differenti tra loro quali le stalagmiti normali, le stalagmiti a palma e/o a piattelli, gli abeti di gesso e le infiorescenze macrocristalline. Questo avviene in quanto vi è un altro fattore che, oltre ai due appena discussi, influenza la morfologia degli speleotemi di gesso che si formano a seguito dell'alimentazione da parte di gocce che cadono. Tale parametro è rappresentato dalla densità del gocciolamento, cioè la distribuzione spaziale dello stesso che, grazie al regime dell'alimentazione appena descritto, consente a concrezioni apparentemente molto differenti le une dalle altre di svilupparsi anche a poca distanza tra loro (Fig. 53).

In buona sostanza la diffusione areale del gocciolamento, nel caso delle stalagmiti cave, è nulla nel senso che anche in condizioni di massimo flusso idrico sulla stalagmite impatta una singola goccia: infatti, dato il suo diametro esterno di pochi centimetri e la presenza fino alla sua base del foro interno, la stalagmite verrebbe distrutta, se gocce sottosature impattassero direttamente sulla sua superficie esterna: questo spiega come mai questo tipo di speleotema sia estremamente raro. Nel caso delle stalagmiti normali, invece, l'assenza totale di evidenze di impatto e/o di scorrimento sottosaturato sulla superficie esterna può permettere che alcune gocce impattino sulla sommità della stessa, senza per questo che la sua morfologia si trasformi: rimane quindi solo il limite di netta prevalenza del flusso gravitativo, rispetto a quello capillare ascendente. Le stalagmiti più o meno marcatamente botroidali, a palma e/o a piattelli, sono le concrezioni di gesso più comuni, dato che il loro sviluppo può avvenire in un campo di variabilità abbastanza grande, sia per quanto riguarda la risalita capillare che la densità di gocciolamento.

Gli abeti di gesso, invece, come le stalagmiti cave, richiedono che la risalita capillare sia il processo esclusivo, o almeno di gran lunga dominante ai fini della deposizione, e che la dispersione del gocciolamento sia limitata ad un areale corrispondente grossomodo al suo diametro di base o poco maggiore di esso.

Le infiorescenze gessose classiche, per svilupparsi su di un pavimento orizzontale, richiedono infine una grande dispersione areale del gocciolamento e una deposizione esclusivamente per risalita capillare.

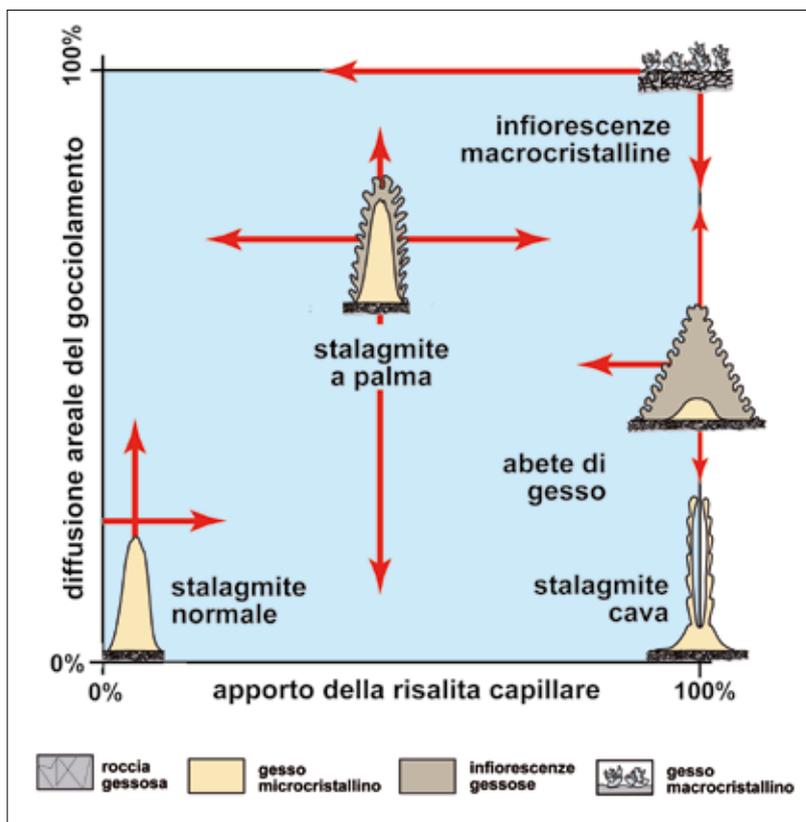


Fig. 53 – Effetto combinato della densità di gocciolamento e dell'apporto della risalita capillare sullo sviluppo dei differenti speleotemi di gesso: le frecce rosse indicano gli intervalli entro cui le varie concrezioni possono svilupparsi (da CALAFORRA & FORTI, 2021).

Le monete di *lapis*

È l'ultima scoperta effettuata all'interno delle grotte della Vena del Gesso romagnola, avvenuta nella Grotta del Re Tiberio e, almeno per ora, questi particolari cristalli di gesso sono esclusivi di tale cavità (LO CONTE *et al.*, 2021)

Nella galleria iniziale di questa cavità, ai piedi di una piccola frattura riempita di argilla, sono stati osservati dei particolari cristalli di gesso, a forma cilindrica fortemente schiacciata, tanto da ricordare la forma delle monete (Fig. 54.1).

Un'altra loro caratteristica comune è quella di avere inglobato, appena sotto la loro superficie superiore, un certo numero di granuli di impurezze (sabbia, silt??) che si concentrano quasi esclusivamente in una metà delle monete, mentre l'altra ne contiene molto meno, e solo nella sua parte esterna, come del resto la superficie inferiore, che ne è praticamente priva (Fig. 54.2). Le "monete di *lapis*" si sono chiaramente sviluppate all'interno dell'argilla presente nella frattura che risultava essere molto imbibita d'acqua e quindi assai plastica.

Prima di entrare nel merito della loro genesi, va innanzitutto notato che la forma perfettamente circola-

re della loro circonferenza, anche se non certo comune, è quella che teoricamente ci si deve aspettare per cristalli lenticolari cresciuti senza interferenze e condizionamenti da parte dell'ambiente esterno (CASALI & FORTI, 1969). Passando a considerare il meccanismo con cui si sono sviluppate, bisogna dire che i due fattori principali che ne hanno controllata la genesi, e lo sviluppo successivo, sono i seguenti:

- 1) bassa sovrasaturazione, dovuta alla lenta evaporazione dell'acqua intrappolata nel riempimento di argilla,
- 2) impedimento sterico, causato dalla geometria delle pareti della frattura.

La bassa sovrasaturazione, che ha caratterizzato tutto lo sviluppo delle "monete di lapis", è stata necessaria per rendere inizialmente possibile solo la formazione di pochissimi germi cristallini, che poi hanno potuto svilupparsi esclusivamente per epitassia.

Il loro minimo spessore invece è chiaramente condizionato dall'impedimento sterico, cioè dalla dimensione verticale della frattura entro cui si sono evolute. In pratica, una volta che il cristallo è giunto in contatto con il tetto e la base della stessa, non ha avuto più la possibilità di crescere in altezza, ma solo in larghezza. Durante questo processo, la moneta non ha potuto saldarsi alle pareti con cui era venuta in contatto, perché le nuove molecole di gesso avrebbero dovuto avere una diversa orientazione rispetto a quelle del cristallo stesso, ma questo non era compatibile con l'accrescimento per epitassia. Sempre l'impedimento sterico ha causato la lenta estrusione delle monete dalla fessura di mano in mano che aumentavano di diametro (Fig. 54.3A): in questo caso la lubrificazione favorita dalla presenza di argilla quasi liquefatta ha chiaramente facilitato il processo. Quando poi le monete erano fuoriuscite per oltre la metà dalla frattura in cui si erano sviluppate cadevano per gravità, impilandosi al piede della frattura (Fig. 54.3B).

Il meccanismo appena esposto, di lenta estrusione delle monete dalla frattura, giustifica anche la presenza di granuli di materiale diverso dal gesso, inglobati quasi esclusivamente in una metà della superficie superiore delle monete stesse. Infatti la loro deposizione e successivo inglobamento si sono realizzati solo dal momento in cui le monete hanno cominciato a fuo-

riuscire dalla fessura, grazie alle goccioline di splash che si generano durante i periodi di alto afflusso idrico (Fig. 54.4).

Considerate le numerose condizioni al contorno che sono state necessarie per permetterne lo sviluppo, si ritiene che ben difficilmente tali condizioni possano riprodursi tutte insieme in un'altra grotta e quindi, con ogni probabilità, le "monete di Lapis" della Tana del Re Tiberio rimarranno un *unicum* nel panorama di depositi chimici delle grotte in gesso.

Gli aggregati cristallini antropogenici

Contrariamente alle grotte in calcare, in quelle in gesso i graffiti, fatti dai visitatori poco rispettosi dell'integrità dell'ambiente sotterraneo, danno rapidamente luogo a un tipo del tutto particolare di aggregati cristallini: quelli antropogenici (Fig. 55).

Questo dipende dal fatto che, in un ambiente saturo di umidità, in cui, teoricamente, non potrebbero verificarsi processi di evaporazione e/o condensazione, se una superficie non è assolutamente piana, tali processi invece si attivano lo stesso ed esattamente: la condensazione nelle concavità, mentre sulle convessità agisce l'evaporazione (Fig. 56). Naturalmente il valore totale del vapore acqueo nell'atmosfera deve rimanere costante, pertanto i due processi avvengono simultaneamente e coinvolgono quantità identiche di acqua, in modo da bilanciarsi perfettamente.

Questo particolare fenomeno, pur essendo ovviamente presente e attivo anche in ambiente carbonatico, dato che la solubilità della calcite è estremamente modesta, praticamente non ha alcun effetto concreto. Al contrario in ambiente gessoso, le incisioni prodotte sono molto più profonde, essendo il gesso molto più tenero del calcare e inoltre, data l'elevata solubilità del solfato di calcio, la quantità di gesso che va in soluzione è maggiore. Pertanto, questo meccanismo (Fig. 56.3) nelle grotte in gesso è assai efficiente, tanto da permettere lo sviluppo di infiorescenze in un breve lasso tempo (pochi anni). Le incisioni prodotte da un oggetto acuminato su una parete liscia di gesso creano, infatti, un ambiente ideale per lo sviluppo di una sottile, ma profonda (qualche decimo di mm) solcatura in cui si attiva la condensazione quando l'atmosfera di grotta è satura di umidità. L'acqua che così si forma

Fig. 54 – Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): 1) le "monete di *lapis specularis*" appena estratte dal piede della fenditura in cui si erano sviluppate (Foto: Massimo Ercolani); 2) dettaglio delle tre monete (A: Φ 16,5-18 mm; B: Φ 16x17 mm; C: Φ 14x14 mm) che evidenziano come la metà della loro superficie superiore sia parzialmente costituita da molti piccoli granuli di impurezze, mentre l'altra metà ne evidenzia molto meno (Foto: Massimo Ercolani); 3) rappresentazione schematica della migrazione delle "monete di lapis" all'interno della frattura (A) e del loro successivo accumulo fuori dalla frattura (B) a seguito delle spinte dovute all'impedimento sterico; 4) le piccole gocce, che si formano per l'impatto dello stillicidio al suolo, raggiungono la superficie della moneta esposta fuori dalla frattura in cui si era sviluppata (da LO CONTE *et al.*, 2020, modificata).

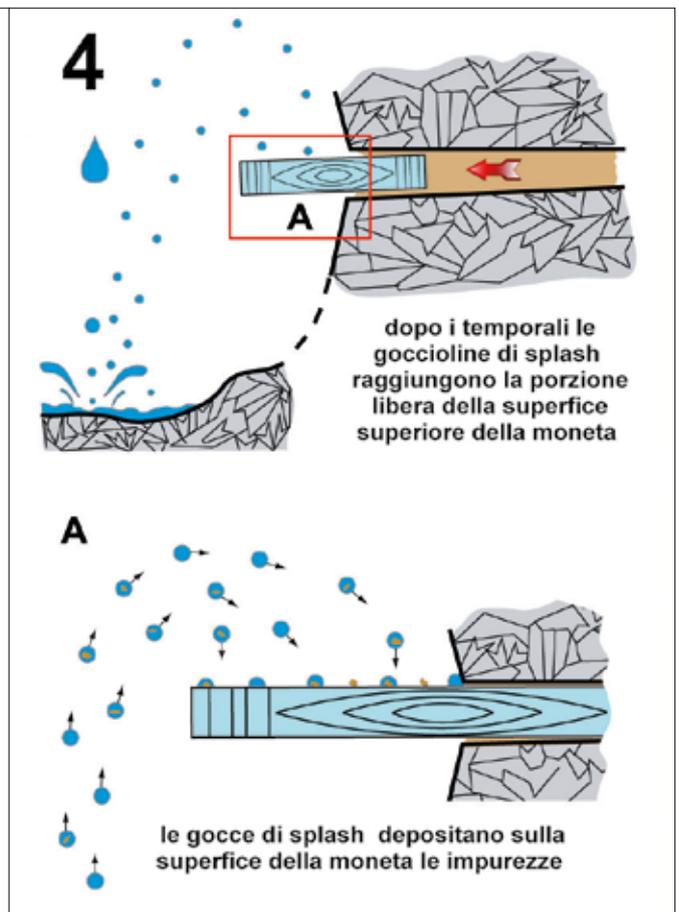
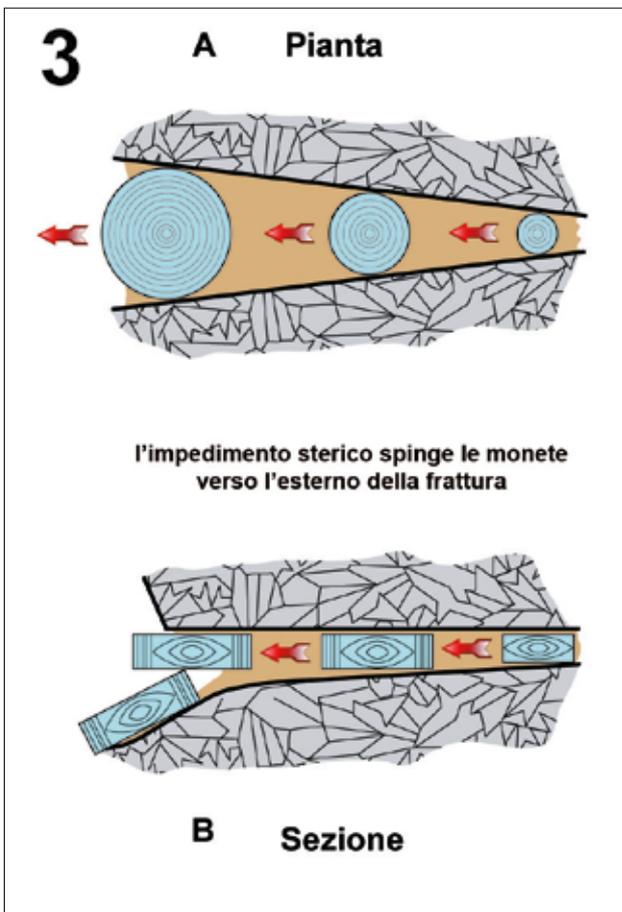
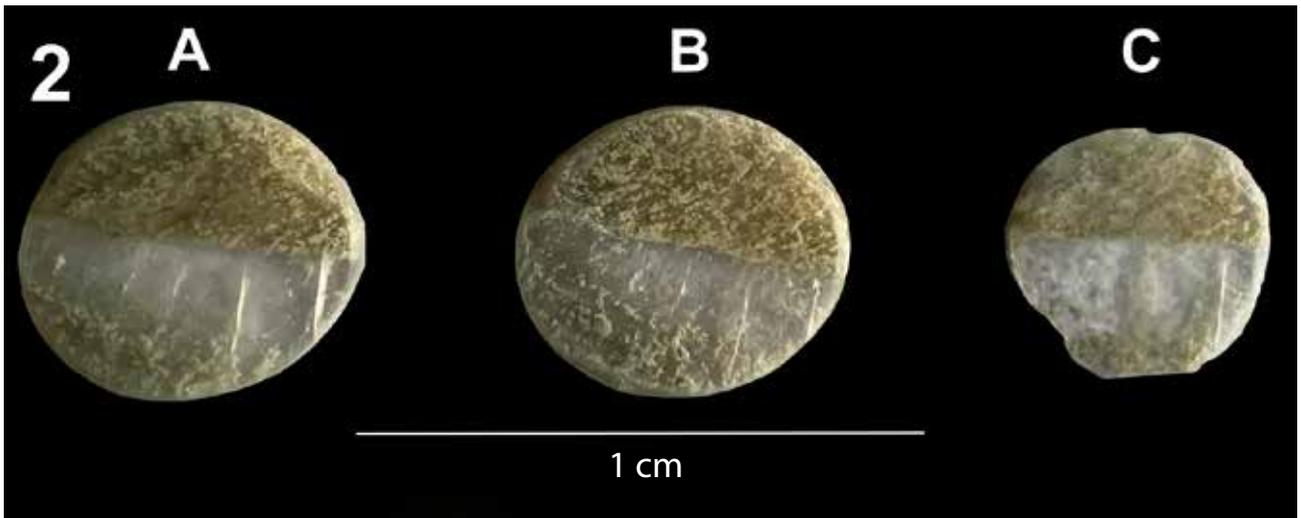




Fig. 55 – Sicilia, Grotta di Santa Ninfa: mensola aggettante su cui i visitatori hanno sfogato la loro grafomania incidendo la roccia con una punta probabilmente di ferro: il solco creato nel gesso si è presto riempito di cristallini di neoformazione che, nel tempo, hanno creato una escrescenza al di sopra del solco stesso (arch. RNI Grotta di Santa Ninfa, foto: Marco Vattano).

è trascinata per gravità al fondo della fessura stessa, dove solubilizza il gesso, approfondendo così il solco (Fig. 56.3A).

La soluzione arricchita di solfato di calcio, poi risale per capillarità verso il bordo superiore dell'incisione, dove evapora, formando un deposito prominente rispetto alla superficie planare della parete di gesso. In questo modo, si innesca un processo autocatalitico che in breve tempo porta alla formazione di due depositi lineari lungo i bordi dell'incisione (Fig. 56.3B), che però presto si saldano tra loro, formando un'unica infiorescenza che sigilla l'incisione stessa.

Come accennato prima, il fenomeno della condensazione/evaporazione in condizioni di saturazione rispetto al vapore acqueo, è tanto maggiore quanto più strette sono le incisioni della roccia, ma è comunque attivo anche se esse sono abbastanza ampie (fino a qualche cm) (Fig. 57A).

Questo fatto è ben dimostrato all'interno delle grotte in gesso che sono state oggetto di estrazione del *lapis specularis* al tempo dei romani (FORTI *et al.*, 2019): nel caso della Grotta presso Ca' Toresina, nella Vena del Gesso romagnola, le profonde incisioni sulle pareti di

gesso, causate dai picconi utilizzati per l'estrazione dei grandi cristalli, nell'arco di quasi due millenni, sono state completamente ricoperte da una spesso strato di infiorescenze che ne ha quasi obliterato gli avvallamenti (Fig. 57B).

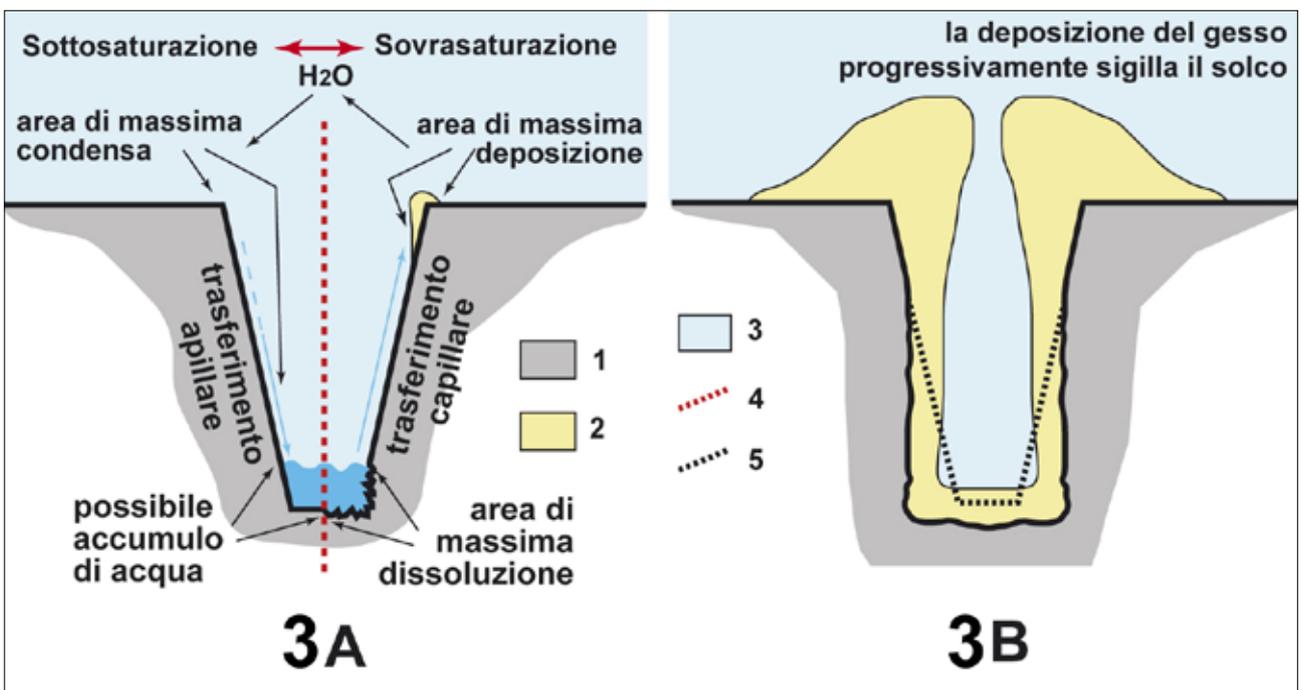
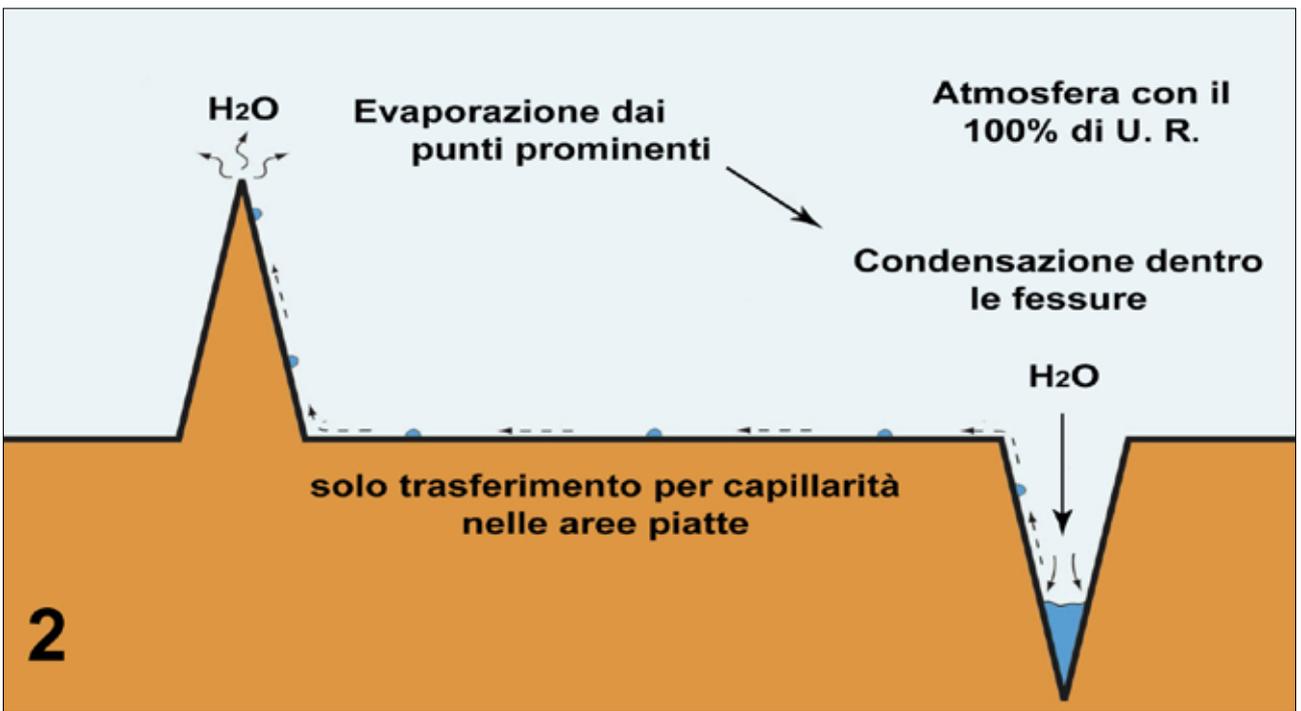
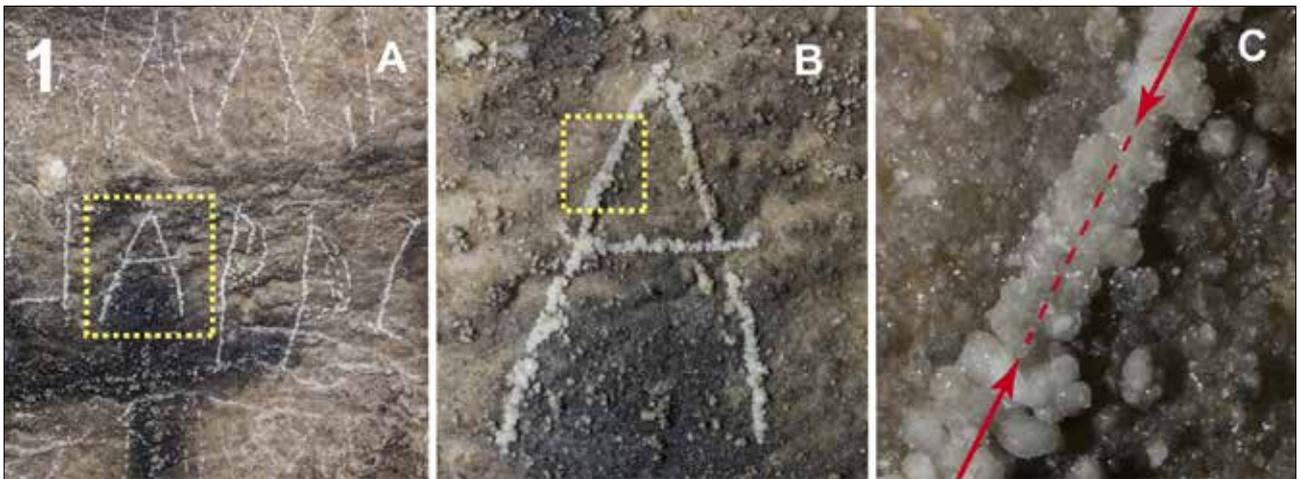
I minerali di grotta

Attualmente le grotte in gesso ospitano solamente 37 minerali di grotta, più tre tipi di composti amorfi (Tab. 5), numero che è inferiore di circa un ordine di grandezza rispetto a quello dei minerali secondari che sono stati osservati negli altri tipi di cavità (siano esse grotte in calare, o in lava, o in altri più rari litotipi).

Il motivo di questa scarsa variabilità composizionale che si riscontra nelle grotte solfatiche è dovuto innanzitutto a due fattori: il primo è che la roccia gessosa è in generale assai pura, il secondo è che le grotte che vi si aprono sono essenzialmente epidermiche e, spesso, i loro bacini di alimentazione sono piccoli e impostati su formazioni impermeabili.

Tutti questi fattori limitano fortemente la platea di cationi che possono trovarsi nelle loro acque sotterranee. A questo si aggiunga poi che l'acido solforico è un aci-

Fig. 56 – Grotta di Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): 1: A) graffiti lungo la galleria principale; B) ingrandimento dell'area riquadrata in giallo di A; C: ingrandimento dell'area riquadrata di giallo in B dove è possibile notare le due infiorescenze di neoformazione: la linea tratteggiata rossa indica dove l'infiorescenza attuale presenta ancora un avvallamento che marca l'originale presenza del solco dovuto al graffito (Foto: Piero Lucci); 2) su una superficie, in contatto con un'atmosfera saturata di vapor acqueo, vi sono luoghi in cui l'evaporazione e la condensazione sono attive contemporaneamente, mantenendo così invariata la concentrazione di umidità relativa (da BADINO *et al.*, 2011, modificata); 3A, B) sezione schematica di un solco con evidenziati i processi che avvengono rispettivamente durante la condensazione e la successiva evaporazione: 1) roccia gessosa; 2) gesso di neoformazione 3) atmosfera di grotta; 4) passaggio da condensazione (a sinistra) a condensazione (destra); 5) sezione originaria del solco. B: la deposizione del gesso tende progressivamente a sigillare il solco originario (da FORTI *et al.*, 2019, modificata).



do forte e i suoi sali sono in genere abbastanza solubili e pertanto altri anioni, eventualmente presenti, difficilmente possono scalzare lo ione solfato dai suoi sali. Detto questo però, pur nella oggettiva scarsità di variabilità mineralogica, le cavità in gesso ospitano anche alcuni minerali molto rari: in particolare sette di essi (buserite, cloromagnesite, gaylussite, howlite, inderite, inyoite e ulexite) sono esclusivi di questo ambiente (HILL & FORTI, 1997) e ciascuno di essi è stato per ora osservato in una sola grotta al mondo.

Va poi sottolineato che oltre un terzo dei minerali secondari delle grotte in gesso sono stati segnalati come minerali criogenici (Fig. 58) e molti di essi come componenti secondari delle polveri di gesso.

Questo fatto è assolutamente logico e dipende dal meccanismo alla base della loro formazione, che prevede il congelamento totale della soluzione madre e quindi anche concentrazioni minime di cationi ed anioni sono costrette, alla fine, a precipitare, formando spesso aggregati poliminerali.

La lenta cristallizzazione criogenica, infatti, permette lo sviluppo di bellissime strutture cristalline, spesso euedrali, che però possono essere ammirate esclusivamente al microscopio elettronico.

Ovviamente i depositi chimici più comuni e di maggior dimensione sono quelli di gesso e di calcite, presenti in quasi tutte le grotte di gesso, mentre gli altri minerali conosciuti appartengono a otto differenti gruppi mineralogici.

Il gruppo degli ossidi-idrossidi è quello che contiene il maggior numero di minerali (10: asbolane, birnesite, buserite, ematite, ghiaccio, goetite, idrogoetite, jarosite, lepidocrocite romanechite), seguito dai solfati (bassanite, celestina, epsomite, gesso, glauberite e mirabilite), dai carbonati (aragonite, calcite, dolomite, gaylussite, e rodocrosite). Gli alogenuri sono invece rappresentati da 3 minerali (cloromagnesite, salgemma e, silvite), come i silicati (calcedonio, opale e quarzo) e 4 borati (howlite, inderite, inyoite e ulexite) mentre uno solo è un elemento nativo (zolfo).

Gli ossidi-idrossidi

Il ghiaccio

Il ghiaccio forma grandiosi depositi sia perenni che stagionali, nelle grotte di Pinega e di Kungur (Russia) (Fig. 59A): in queste cavità il ghiaccio può formare tutti i tipi di concrezioni più comuni, escluse le pisoliti. Non esistono forme di ghiaccio peculiari delle grotte in gesso, dato che i meccanismi che ne consentono lo sviluppo (il congelamento e, più raramente, la sublimazione) sono del tutto indipendenti dal tipo di roccia in cui la grotta si è formata. Comunque val qui la pena di ricordarne due: i grandi cristalli di sublimazione, che si formano in inverno soprattutto nella

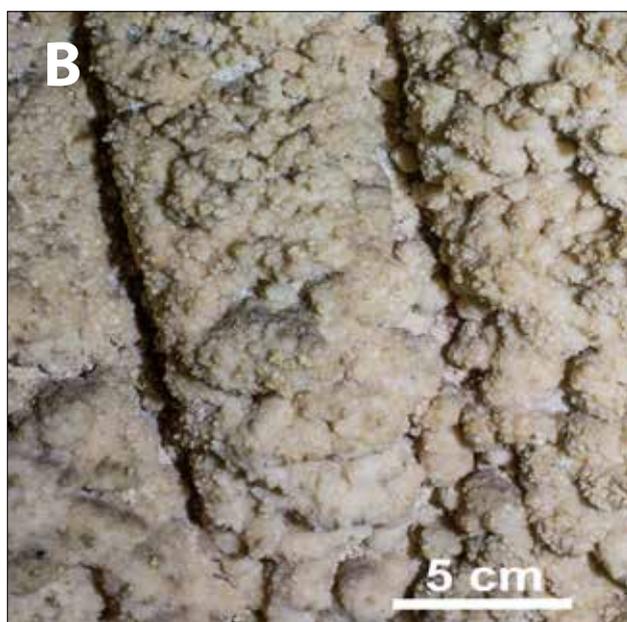


Fig. 57 – Grotta presso Ca'Toresina (Vena del Gesso romagnola): A) infiorescenze subparallele, che ricoprono i bordi delle scalpellature fatte dai minatori di *lapis specularis* quasi due millenni fa; B) particolare delle infiorescenze in cui ancora le scalpellature non sono state del tutto obliterate dagli aggregati cristallini (Foto: Piero Lucci).

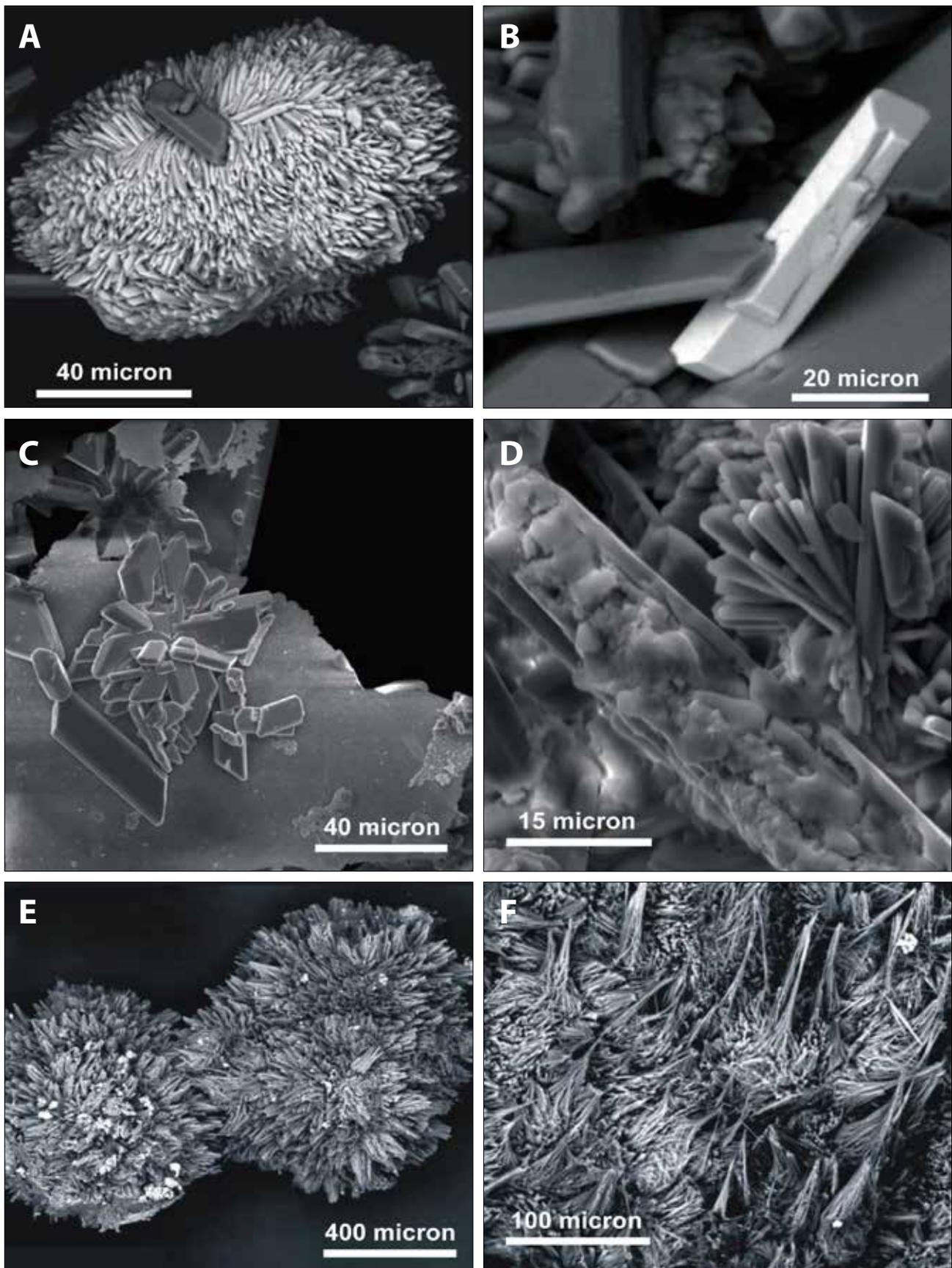


Fig. 58 – Immagini al microscopio elettronico di minerali di origine criogenica della Grotta di Kungur (Russia): A) aggregato sferoidale di cristalli di celestina accresciutisi su un cristallo di gesso; B) cristallo prismatico di celestina su gesso; C) crosta di silice amorfa su cui è cresciuto un aggregato di gesso; D) particolare di un cristallo sub-euedrale di gesso al cui interno vi sono depositi di solfato di magnesio idrato; E-F) immagine al microscopio elettronico degli aggregati sferoidali di ulexite e inyoite (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata) (Foto: Olga Kadebskaya e Elena Chirkova).

	Nome	Formula chimica	Ritrovamento	Prima citazione
1	Aragonite	CaCO ₃	Tubolari antigravitative	ANDREYTCHOUK <i>et al.</i> , 2013
2	Asbolane	Mn ⁴⁺ (O,OH) ₂ ·(Co,Ni,Mg,-Ca) _x (OH) _{2x} ·nH ₂ O	Mescolato a birnessite, in una stalattite rosso-bruna	VOLKOV <i>et al.</i> , 1987
3	Bassanite	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O	Polvere bianca stagionale all'ingresso delle grotte	CHIESI <i>et al.</i> , 1992
4	Birnessite	(Na,Ca,K) _{0.6} (Mn ⁴⁺ ,Mn ³⁺) ₂ O ₄ ·1.5H ₂ O	Mescolato a asbolane, in una stalattite rosso-bruna	VOLKOV <i>et al.</i> , 1986
	Blödite ●	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O		ANDREYTCHOUK <i>et al.</i> , 2013
5	Brushite	Ca(PO ₃ OH)·2H ₂ O	Polvere giallastra su guano di pipistrello	FORTI, 1983
6	Buserite*	Na ₄ Mn ₁₄ O ₂₇ ·21H ₂ O (?)	Associate a birnessite su un deposito lacustre fangoso	ANDREYTCHOUK & KLIMCHOUK, 2010
7	Calcite ●	CaCO ₃	Tutti gli speleotemi comuni Lame di calcite Mezze bolle Bolle, calcite flottante Concrezione biogeniche	FORTI, 1996 FORTI & RABBI, 1981 FORTI & CHIESI, 1995 ERCOLANI <i>et al.</i> , 2013 POLUZZI & MINGUZZI, 1998
8	Calcite magnesifera ●	CaCO ₃ + MgCO ₃		ANDREYTCHOUK <i>et al.</i> , 2013
9	Celestina ●	SrSO ₄	Mescolata con Mg-calcite, dolomite, gaylussite e salgemma all'interno di croste di gesso e calcite criogeniche. Piccoli cristalli all'uscita di una sorgente solfurea	TCHAIKOVSKIY <i>et al.</i> , 2015 CARROZZINI <i>et al.</i> , 1996
10	Calcedonio	SiO ₂	Associato a calcite nella crosta dei noduli di howlite	POTAPOV & PARSHINA, 2010
11	Cloromagnesite*	MgCl ₂	Dispersa all'interno delle fibre di epsomite	CERVELLATI <i>et al.</i> , 1975
12	Dolomite ●	CaMg(CO ₃) ₂	Moonmilk Associata a Mg-calcite, celestina, gaylussite e salgemma in una costa di gesso/calcite criogenica	FORTI <i>et al.</i> , 2004 TCHAIKOVSKIY <i>et al.</i> , 2015
13	Ematite	Fe ₂ O ₃	Piccoli cristalli con goetite, limonite e lepidocrocite all'interno di stalattiti, stalagmiti e crostoni	FORTI & ROSSI, 1989
14	Epsomite ●	MgSO ₄ ·7H ₂ O	Cristalli aciculari sul fango	CERVELLATI <i>et al.</i> , 1975
15	Fluorapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ F	Associata a carbonatoapatite in una crosta dorata sopra resti fossili	CHIESI & FORTI, 1992
16	Gaylussite* ●	Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ ·5H ₂ O	Mescolata con calcite magnesifera, celestina, dolomite and salgemma in una costa di gesso/calcite criogenica	TCHAIKOVSKIY <i>et al.</i> , 2015
17	Gesso ●	CaSO ₄ ·2H ₂ O	Molte concrezioni comuni e alcune particolari: palle, eccentriche, stalagmiti cave, polveri, cristalli euedrali, porcospini	HILL & FORTI, 1997 FORTI 2017 e le citazioni al suo interno
18	Ghiaccio	H ₂ O	Spelepotemi e cristalli	HILL & FORTI, 1997
19	Glauberite	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	Piccoli cristalli associati a tenardite e gesso in polveri criogeniche	KADEBSKAYA & GOLOVACHEV 2017

20	Goetite	FeO(OH)	Associate a lepidocrocite, limonite, e ossidi di Fe e Mn oxides in Crostoni, stalattiti e stalagmiti	FORTI & ROSSI, 1989
21	Howlite*	Ca ₂ SiB ₅ O ₉ (OH) ₅	Aggregati sferoidali ricoperti di una crosta di calcite e calcedonio	POTAPOV & PARSHINA, 2010
22	Idro-goetite	FeO(OH) · nH ₂ O	Associata a Jarosite in un deposito plastico di colore rossastro	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
23	Idrossiapatite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH	Associate a fluorapatite in croste dorate sopra ossa fossili	CHIESI & FORTI, 1992
24	Inyoite* ●	Ca ₂ [B ₆ O ₆ (OH) ₁₀] · 8H ₂ O	Assieme all'ulexite forma piccoli aggregati sferoidali	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
25	Inderite*	(Mg[B ₃ O ₃ (OH) ₅] · 5H ₂ O)	Aggregati di piccoli cristalli prismatici su una crosta parietale di gesso	KADEBSKAYA & GOLOVACHEV, 2017
26	Jarosite	K ₂ Fe ₆ (SO ₄) ₄ (OH) ₁₂	Associata a idro-geotite in un deposito plastico di colore rossastro	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
27	Lepidocrocite	Fe ³⁺ O(OH)	Componente minoritario di stalattiti e stalagmiti con goetite, limonite gesso e opale	FORTI & ROSSI, 1989
28	Mirabilite	Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	Stalattiti, cristalli euedrali Fibre estremamente allungate	BERTOLANI & ROSSI, 1972 ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
29	Opale ●	SiO ₂ · nH ₂ O	Sottili croste e coralloidi	FORTI & ROSSI, 1989
30	Quarzo	SiO ₂	Cristalli euedrali sopra cristalli di gesso corrosi	FORTI, 1993
31	Rodocrosite	MnCO ₃	Sottili croste sopra speleotemi di calcite	TURCHINOV, 1993
32	Romanechite	(BaH ₂ O) ₂ (Mn ⁴⁺ , Mn ³⁺) ₅ O ₁₀	Piccole stalattiti e cannule di colore bruno scuro	VOLKOV <i>et al.</i> , 1987
33	Silvite	KCl	Stalattiti	CALANDRI & RAMELLA, 1987
34	Salgemma ●	NaCl	Mescolata con calcite magnesifera celestina, dolomite e gaylussite dentro una crosta criogenica di gesso/calcite	TCHAIKOVSKIY <i>et al.</i> , 2015
35	Solfati di magnesio idrati ●	MgSO ₄ · nH ₂ O	Inglobati nei cristalli di gesso delle polveri criogeniche	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
36	Tenardite ●	Na ₂ SO ₄	Componente in traccia delle polveri di gesso criogeniche	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
37	Ulexite*	NaCa[B ₅ O ₆ (OH) ₆] · 5H ₂ O	Assieme all'ulexite forma piccoli aggregati sferoidali	ANDREYTCOUK <i>et al.</i> , 2013
38	Zolfo	S	Concrezioni poliminerali con opale e ossidi di Fe e Al Piccoli cristalli su concrezioni di gesso	CARROZZINI <i>et al.</i> , 1996 FORTI & LUCCI, 2016
39	Ossidi amorfi di alluminio	Al ₂ O ₃	Concrezioni poliminerali con opale e ossidi di Fe e zolfo	CARROZZINI <i>et al.</i> , 1996
40	Ossidi-idrossidi amorfi di ferro		Croste con ossidi di Mn Stalattiti e stalagmiti con goetite, lepidocrocite, limonite and ossidi di Mn	TURCHINOV, 1993 FORTI & ROSSI, 1989
41	Ossidi-idrossidi amorfi di manganese		Croste con ossidi-idrossidi di Fe Stalattiti e stalagmiti con goetite, lepidocrocite, limonite and ossidi di Fe Polveri e spessi depositi neri su fango	TURCHINOV, 1993 FORTI & ROSSI, 1989 ANDREYTCOUK & KLIMCHOUK, 2010

Tab. 5 – Lista dei minerali secondari osservati all'interno delle grotte in gesso (* = nuovo per l'ambiente di grotta e, fino ad oggi, esclusivo delle cavità in gesso; ● = presente nelle polveri criogeniche di gesso).

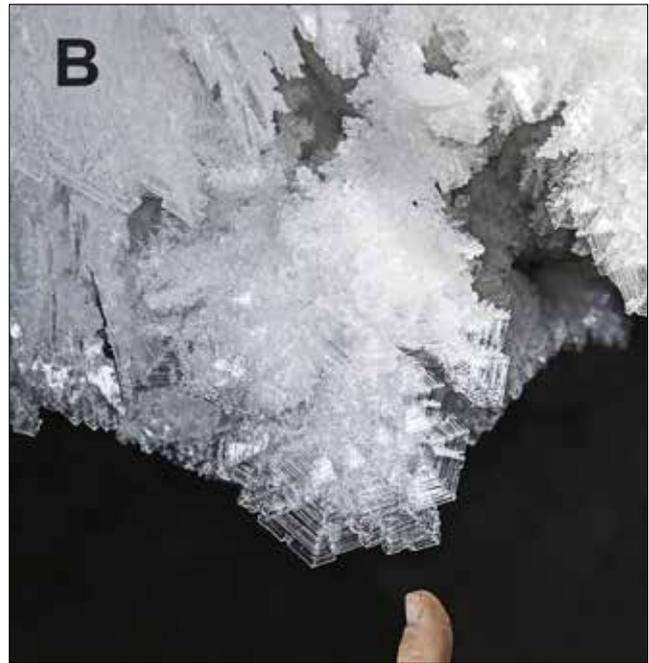


Fig. 59 – Primo grande salone della Grotta Ordinskaya vicino a Kungur (Russia): A) stalagmiti di ghiaccio; B) grandi e perfetti cristalli di sublimazione (Foto: Gaetano Boldrini).

Grotta Ordinskaya, non lontano da Kungur (Fig. 59B), e le stalagmiti a canna di bambù (Fig. 60), caratteristiche delle grotte in aree temperate (quali, per esempio, i Gessi Emiliani e la Vena del Gesso romagnola).

Lo sviluppo davvero inusuale dei cristalli di ghiaccio dell'Ordinskaya è la conseguenza diretta della presenza, al suo interno di una grande massa d'acqua, che non congela mai e che pertanto nei mesi invernali continuamente libera nell'atmosfera della grotta una notevole quantità di umidità che, risalendo verso l'ingresso, incontra aria estremamente più fredda (fino a 10, e anche più, gradi sottozero) e pertanto immediatamente congela, permettendo così lo sviluppo di cristalli di sublimazione perfetti e giganteschi.

Le stalagmiti a canna di bambù (Fig. 60D), invece, si formano nei primi ambienti di grotta dove il clima (temperato umido, come quello dei gessi dell'Emilia-Romagna) consente alla neve, o al ghiaccio esterno, di fondere durante le ore più calde del giorno, mentre nella notte tutto ricingela e l'infiltrazione diminuisce. Dato che i tempi di corrivazione nelle grotte in gesso sono normalmente molto brevi, l'acqua che affiora negli ambienti sotterranei è assai di più nelle ore centrali della giornata, rispetto a quelle notturne. Come è ben noto, il diametro delle stalagmiti è direttamente proporzionale alla quantità d'acqua che le alimenta (FRANKE, 1965), ecco dunque che, nelle stalagmiti a canna di bambù, la distanza tra due ingrossamenti successivi approssimativamente corrisponde a 24 ore (Fig. 60E).

In generale, i tratti con diametro minore sono mol-

to più lunghi di quelli a diametro maggiore, e questo perché, mentre l'infiltrazione accentuata avviene, come già detto, solo nelle ore centrali, i tempi di corrivazione sono più lunghi e pertanto una piccola quantità d'acqua continua ad alimentare le stalagmiti anche nel lungo periodo in cui, a causa del congelamento, l'infiltrazione diminuisce fortemente, o addirittura si arresta del tutto.

Dalle osservazioni condotte in varie occasioni nell'area dei Gessi Bolognesi, e non solo, è stato possibile dimostrare che la velocità di crescita delle stalagmiti di ghiaccio può essere di 20 cm al giorno, o anche più, velocità questa di ben 3-4 ordini di grandezza superiore a quella delle normali stalagmiti di calcite o di qualunque altro minerale (HILL & FORTI, 1997).

Per spiegare il motivo di una velocità così elevata è necessario considerare che per tutte le stalagmiti, che derivano dalla precipitazione di un minerale per sovrassaturazione, la velocità di crescita apicale dipende esclusivamente dalla concentrazione iniziale di quella sostanza nell'acqua di alimentazione.

È chiaro che questo non è vero per il ghiaccio che invece si deposita come conseguenza di un passaggio di fase (congelamento): quindi, più bassa sarà la temperatura, e più ghiaccio si formerà nel punto esatto di impatto della goccia. Pertanto, nel caso di stalagmiti di ghiaccio, la velocità di crescita apicale dipenderà da due fattori: la temperatura dell'ambiente di grotta e la frequenza di gocciolamento. In pratica, la velocità di crescita sarà inversamente proporzionale alla temperatura dell'ambiente in cui

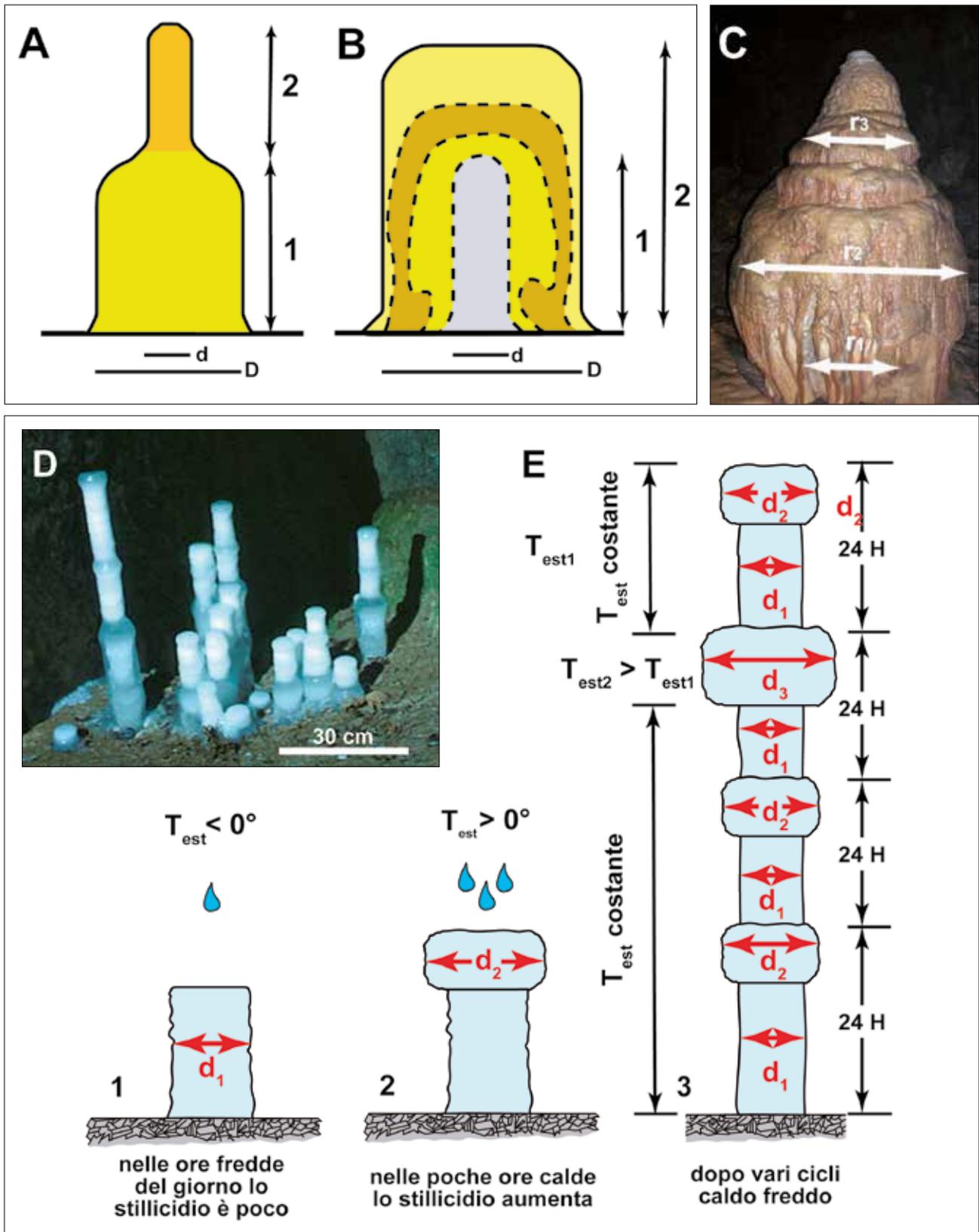


Fig. 60 – A) forma di una stalagmite normale che ha subito un improvviso calo nella sua alimentazione e con i relativi intervalli di crescita; B) forma interna di una stalagmite che ha subito un improvviso aumento nella sua alimentazione e relativi intervalli di crescita; C) foto di una stalagmite di calcite della Grotta impossibile (Trieste) che nel suo sviluppo ha avuto volumi di alimentazione prima crescenti e poi calanti (Foto: Paolo Forti); D) ingresso della Grotta della Spi-pola nei Gessi Bolognesi: stalagmiti di ghiaccio con la caratteristica forma a bambù in cui la distanza tra un ingrossamento e l'altro corrisponde all'incirca a un giorno (Foto: Paolo Forti); E) stadi di sviluppo delle concrezioni di ghiaccio "a bambù" con evidenziate le variazioni di diametro che risultano essere direttamente proporzionali alla temperatura esterna (da CIGNA & FORTI, 2021, modificata).

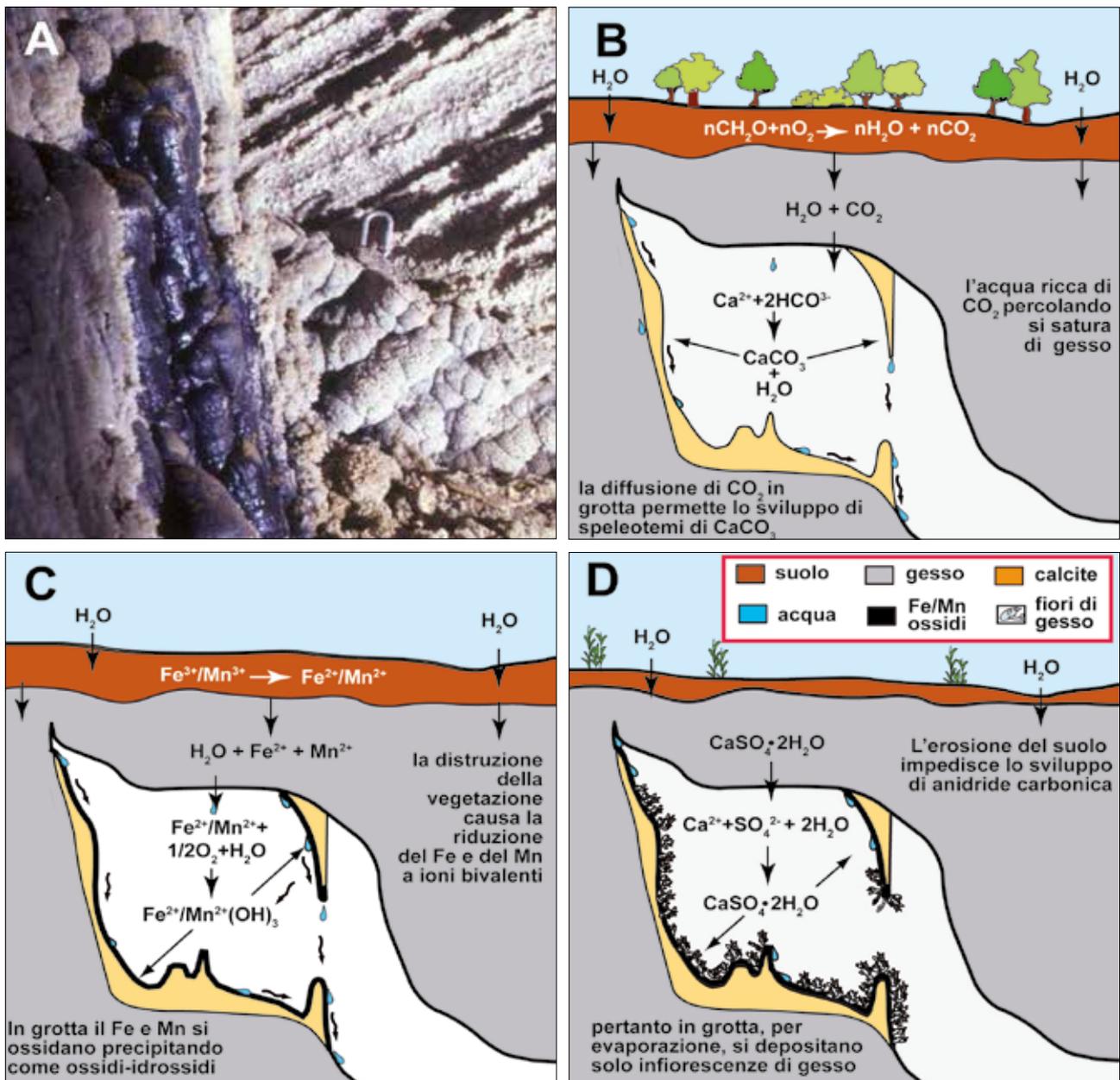


Fig. 61 – A: Grotta di Entella (Sicilia): colata di carbonato di calcio ricoperta da un sottile livello di ossidi-idrossidi di ferro e manganese su cui si sono sviluppate delle infiorescenze gessose attualmente in parziale ridissoluzione (Foto: Paolo Forti); B) la copertura arborea ha permesso lo sviluppo di una grande concrezione di carbonato di calcio; C) il taglio del bosco e la conseguente alterazione del suolo pedologico ha permesso la migrazione del Fe e Mn bivalenti all'interno della grotta dove si sono ossidati formando lo strato nero sulla colata; D) attualmente, dato il perdurare di scarsa copertura vegetale, l'evaporazione fa crescere uno strato di infiorescenze gessose sullo speleotema.

si forma e direttamente proporzionale alla quantità d'acqua che alimenta la stalagmite.

Gli ossidi di ferro e manganese

Gli ossidi-idrossidi di Fe e Mn, spesso amorfi o poco cristallini, sono molto comuni nelle grotte in gesso, dove formano normalmente sottili croste, sia sopra concrezioni attive che direttamente sulla roccia gessosa. I meccanismi di formazione di questi depositi, di solito poco appariscenti, possono variare da grotta

a grotta.

Nella Grotta Novella, nei Gessi Bolognesi, e anche nella Grotta di Entella, in Sicilia (Fig. 61), gli ossidi-idrossidi di Fe e Mn sono presenti come sottili croste superficiali, o anche come livelletti, all'interno delle colate di carbonato di calcio.

L'origine di questi depositi è stata fatta risalire all'azione di disboscamenti massivi e/o incendi successivi che, periodicamente (negli ultimi secoli), hanno distrutto i boschi sopra le grotte (FORTI & QUERZÈ, 1978).

Infatti, la distruzione della copertura vegetale causa un'alterazione del suolo pedologico che immediatamente si impoverisce di carbonio organico e quindi non è più in grado di fornire alle acque di percolazione la CO_2 indispensabile per attivare il meccanismo della dissoluzione incongruente, arrestando immediatamente lo sviluppo delle concrezioni di carbonato di calcio.

Contemporaneamente, le ceneri ricche di Fe e Mn reagiscono con le acque di precipitazione meteorica all'interno del suolo pedologico, ricco in sostanze organiche che, ossidandosi, riducono il Ferro e il Manganese a ioni bivalenti, i cui sali sono molto solubili.

La percolazione trasferisce questi ioni all'interno della grotta, dove subiscono un'immediata ossidazione da parte dell'ossigeno presente nell'atmosfera, con conseguente formazione di croste nere. Comunque, la deposizione di questi ossidi-idrossidi ha breve durata, dato che rapidamente la vegetazione torna a svilupparsi restaurando così le condizioni per un nuovo periodo di concrezionamento carbonatico.

Nella Grotta Pelagalli (Gessi Bolognesi), in una piccola saletta sviluppatasi al contatto con un potente interstrato marnoso, si sono sviluppate stalattiti rosse e stalagmiti rosso-brune (Fig. 62A), in cui i livelli ad ossidi idrossidi di Fe e Mn sono largamente prevalenti

(FORTI & ROSSI, 1989).

Queste concrezioni sono le uniche in cui, fino ad oggi, sono stati trovati ben tre differenti minerali di ferro ben cristallizzati: ematite, goetite e lepidocrocite.

La loro evoluzione (Fig. 62B) è stata controllata da parametri ambientali davvero poco comuni, che possono essere sintetizzati come segue: 1) presenza in superficie di una piccola pozza d'acqua permanente, tipo marcita, al cui fondo si erano realizzate condizioni fortemente riducenti, tale da consentire a concentrazioni alte di ferro e manganese di passare in soluzione, 2) la presenza, esattamente sotto questa pozza, di un grosso interstrato subverticale di argille e marne che la metteva in collegamento capillare diretto con l'ambiente di grotta in cui si sono sviluppate le concrezioni, permettendo così alla soluzione ricca in Fe e Mn di raggiungere il vuoto, senza subire ossidazione e 3) il clima relativamente secco e caldo della grotta che ha permesso una rapida ossidazione degli ioni rispettivamente a Fe^{3+} e $Mn^{4+/6+}$, con conseguente deposizione dei relativi ossidi-idrossidi che sono praticamente insolubili (FORTI & ROSSI, 1989).

Il meccanismo appena descritto per la Grotta Pelagalli, nei Gessi Bolognesi, è quello che, in generale, permette agli ioni ferro e manganese di migrare sotto terra e quindi, una volta raggiunta una cavità naturale

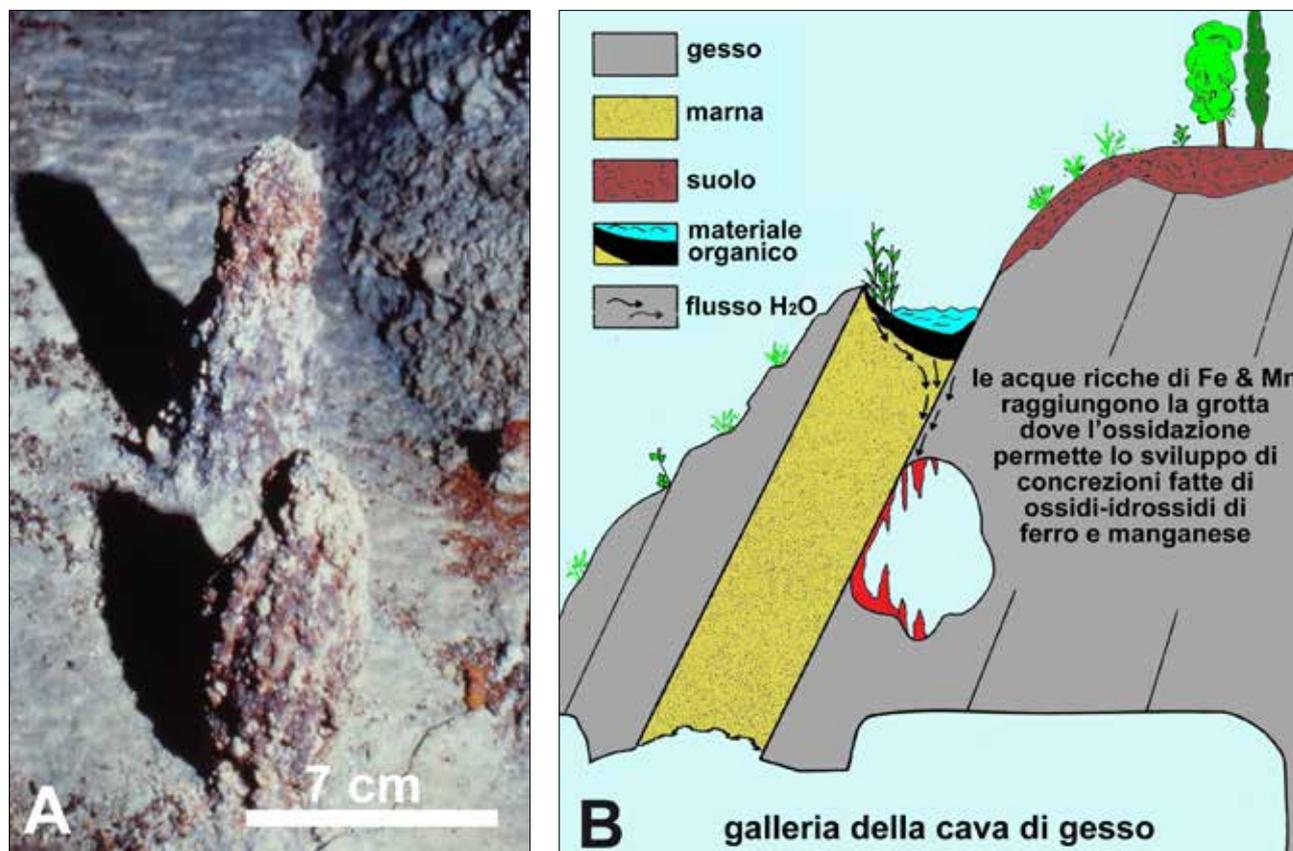


Fig. 62 – Grotta Pelagalli (Gessi Bolognesi): A) due delle stalattiti poliminerali a prevalenza di Fe e Mn (Foto: Paolo Forti); B) le condizioni al contorno che hanno permesso la deposizione di queste concrezioni poliminerali (da FORTI & ROSSI, 1989, modificata).

qualsiasi, se aerata, di ossidarsi e precipitare, formando ossidi-idrossidi di ferro e manganese.

Un caso classico è rappresentato dalla grotta ipogenica Zoloushka (Fig. 63), nei gessi della Podolia in Ucraina, che ha subito un improvviso e totale svuotamento nel momento in cui l'avanzamento dei lavori minerari di una cava di gesso ha intersecato un suo ramo oltre mezzo secolo fa, causando la rapida fuoriuscita di tutta l'acqua che conteneva.

Le reazioni di ossidazione biologica del ferro e del manganese in soluzione (KOTULA *et al.*, 2019) hanno quindi portato allo sviluppo di molti grandi speleotemi differenti, tanto da rendere la Zoloushka la grotta con le più grandi e varie concrezioni di questo tipo al mondo.

Tra queste concrezioni vanno ricordate le cannule e le stalattiti rosso-brune di romanechite (Fig. 60B), le stalattiti botroidali di ossidi-idrossidi di manganese e di ferro (Fig. 63D), i depositi pulverulenti, a volte parzialmente trasformati in depositi laminati soffici di ossidi di manganese amorfi (ANDREYCHOUK & KLIMCHOUK, 2010), e poi le stalagmiti cave (in realtà tower cones sviluppatasi sott'acqua) di birnessite (TURCHINOV, 1993) e altri ancora. Una cosa abbastanza insolita è rappresentata dal fatto che nella Zoloushka i depositi di ferro e manganese sono nettamente separati tra loro, a differenza di quello che si verifica in molte altre grotte nel mondo, dove questi minerali sono quasi sempre intimamente mescolati tra loro.

La spiegazione di questo fenomeno (Fig. 64) è stata data solo recentissimamente da uno studio microbiologico (KOTULA *et al.*, 2019) che ha evidenziato come gli ossidi di ferro vengano precipitati per primi, non appena l'ossidazione dell'acido solfidrico ha innescato lo sviluppo di batteri chemioautotrofici (Fig. 64B), mentre quelli di manganese iniziano a depositarsi solo dopo l'avvento dei microorganismi eterotrofici (Fig. 64A) che per esistere hanno necessità del supporto trofico delle biomasse dei batteri autotrofici. Infine, si possono formare grosse concrezioni di ossidi di ferro ad opera di organismi fungini che crescono in simbiosi con i batteri chemioautotrofici (Fig. 64C e Fig. 65).

Per la Grotta Zoloushka non si hanno dati certi sui tempi che hanno richiesto queste multiformi mineralizzazioni per potersi sviluppare, dato che lo svuotamento della cavità è avvenuto oltre mezzo secolo fa,

ma i processi di ossidazione biologica che sovrintendono alla loro formazione sono certamente rapidissimi. Tale evidenza è stata confermata all'interno di una grande grotta ipogenica casualmente intersecata dalla miniera di gesso di Moncalvo nell'Astigiano nel febbraio del 2005 (VIGNA *et al.*, 2010).

La sua esplorazione, condotta poche settimane dopo il suo improvviso svuotamento, ha evidenziato infatti come i processi ossidativi avessero già permesso la formazione non solo di fanghi rossastri di idrossidi di ferro lungo le vie di deflusso dell'acqua solfurea, ma anche di crosticine di ossidi di ferro, da cui pendevano colonie di solfobatteri, a formare le classiche mucoliti sulle pareti della cavità (Fig. 66A, B).

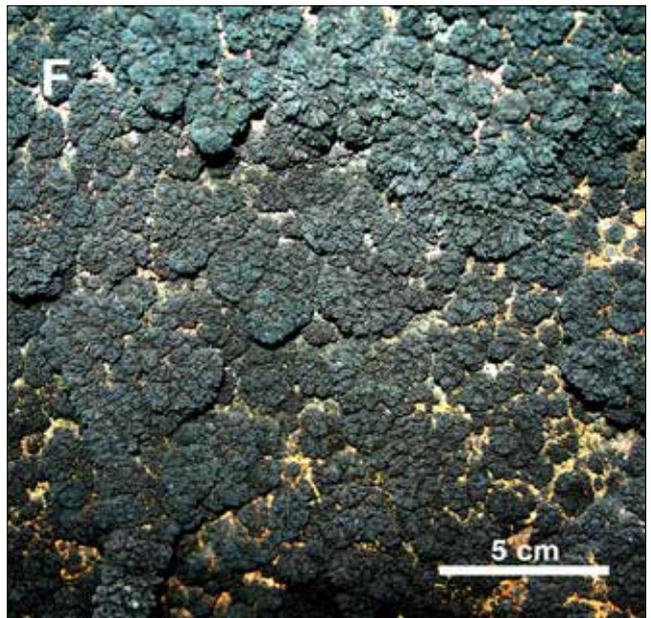
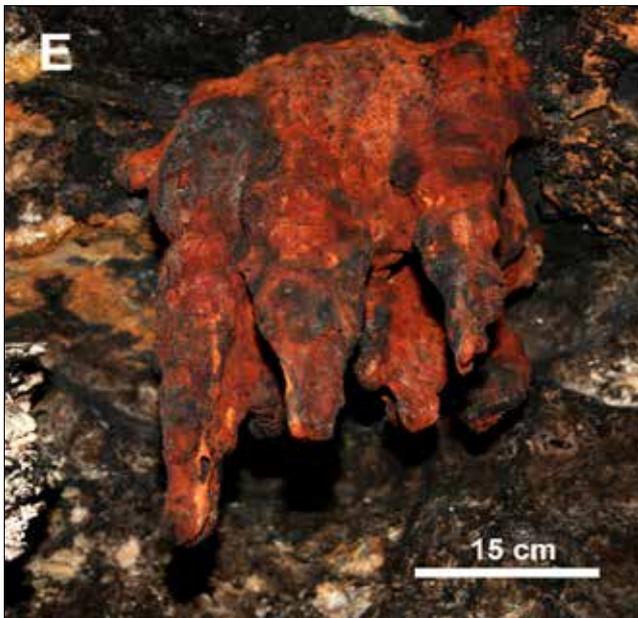
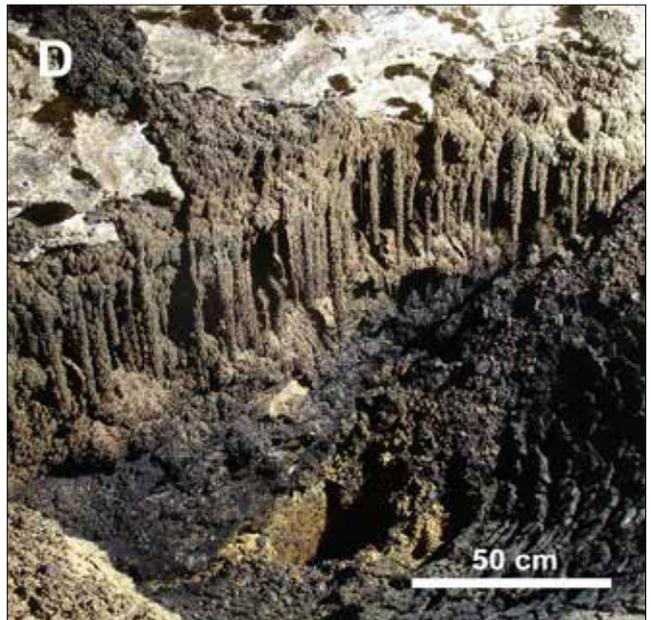
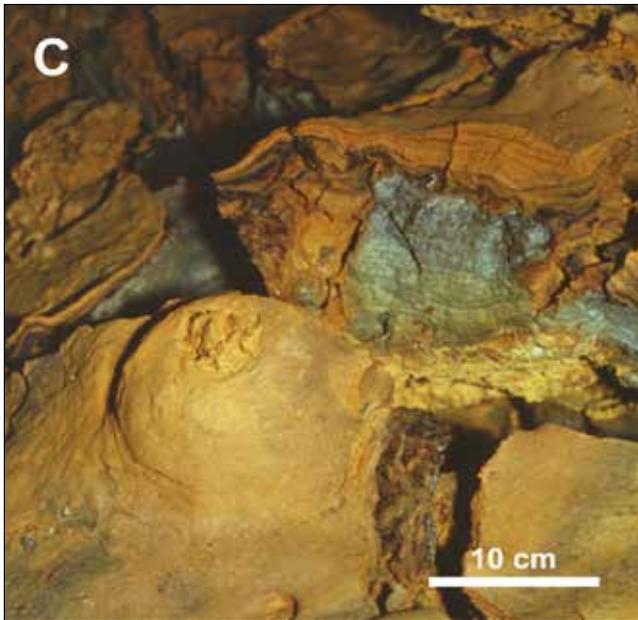
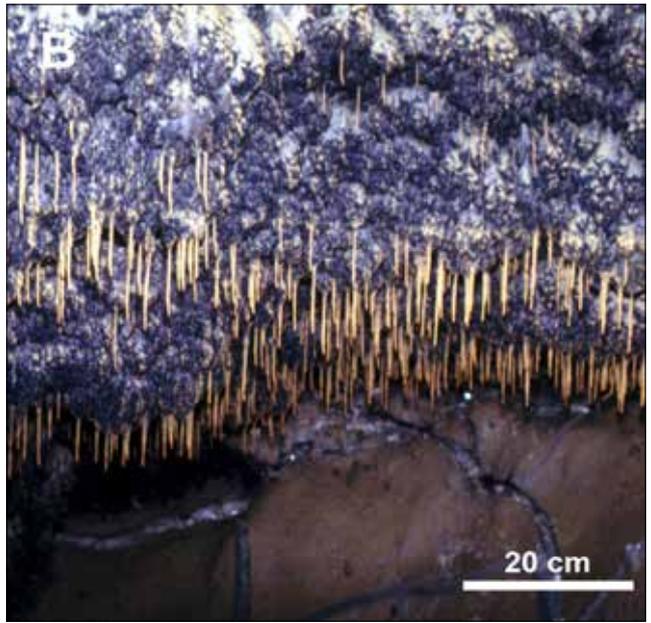
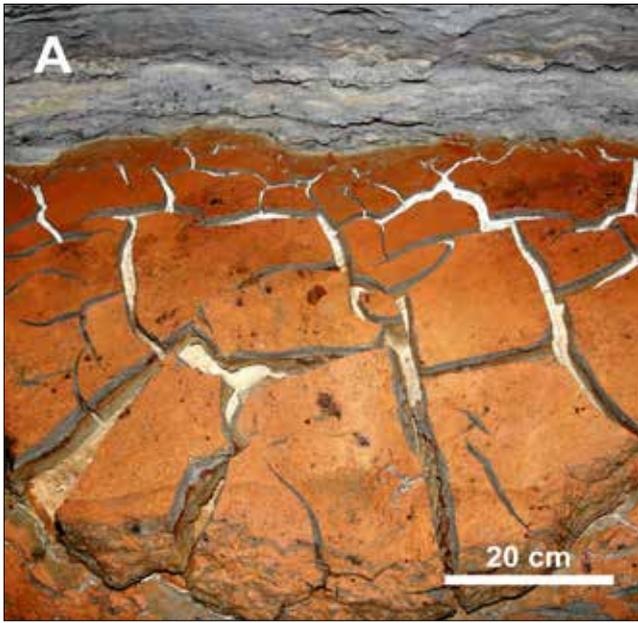
Il secondo stadio dello schema di Fig. 64 può essere applicato anche a tutte le grotte in gesso non ipogeniche, dove le acque, che risiedono per lunghi periodi negli interstrati marnoso-argillosi, possono lentamente migrare lungo i piani intercristallini, fino ad affiorare sulle pareti delle grotte, dove, per ossidazione, danno luogo, in tempi oggettivamente molto più lunghi, alla formazione di cordoli di ossidi-idrossidi essenzialmente di ferro (Fig. 66D) (DE WAELE *et al.*, 2013), del tutto analoghi a quelli descritti nel paragrafo degli aggregati microcristallini di gesso (Fig. 47, 48).

Nella Grotta di Grave Grubbo a Verzino in Calabria, ossidi amorfi di alluminio, mescolati a quelli di Fe e Mn e ad opale e zolfo, hanno dato luogo a sottili colate di color arancio brillante, immediatamente al di sotto di una piccola scaturigine di acqua solfurea. La loro genesi è stata indotta dai processi di alterazione instaurati dalle acque solfuree che fluivano all'interno dei riempimenti argilloso-siltosi degli interstrati esistenti tra i vari banconi di gesso che caratterizzano l'area di Verzino (CARROZZINI *et al.*, 1996). Analoghe piccole colate sono state anche osservate nella Grotta di Santa Ninfa nei pressi della scaturigine di acqua solfurea (Fig. 67).

I carbonati

Il secondo gruppo per numero di minerali è quello dei carbonati, dove oltre alla calcite, estremamente comune nelle grotte degli ambienti temperati umidi, e di cui si è già parlato a proposito delle sue concrezioni spesso sviluppatasi per dissoluzione incongruente, compaiono anche l'aragonite, la dolomite, la gaylussi-

Fig. 63 – Grotta Zoloushka, Ucraina: A) suolo poligonale ricoperto da un velo di ossidi prevalentemente di ferro (Foto: Vianceslav Andreychouk); B) piccole cannule di romanechite (Foto: Paolo Forti); C) depositi plastici di ossidi idrossidi amorfi di ferro e manganese (Foto: Paolo Forti); D) stalattiti botroidali di ossidi di manganese; E) pseudostalattiti di ossidi di ferro che hanno fossilizzato colonie di organismi fungiformi; E) aggregati coralloidi sferoidali di ossidi di manganese (Foto: Viacheslav Andreychouk).



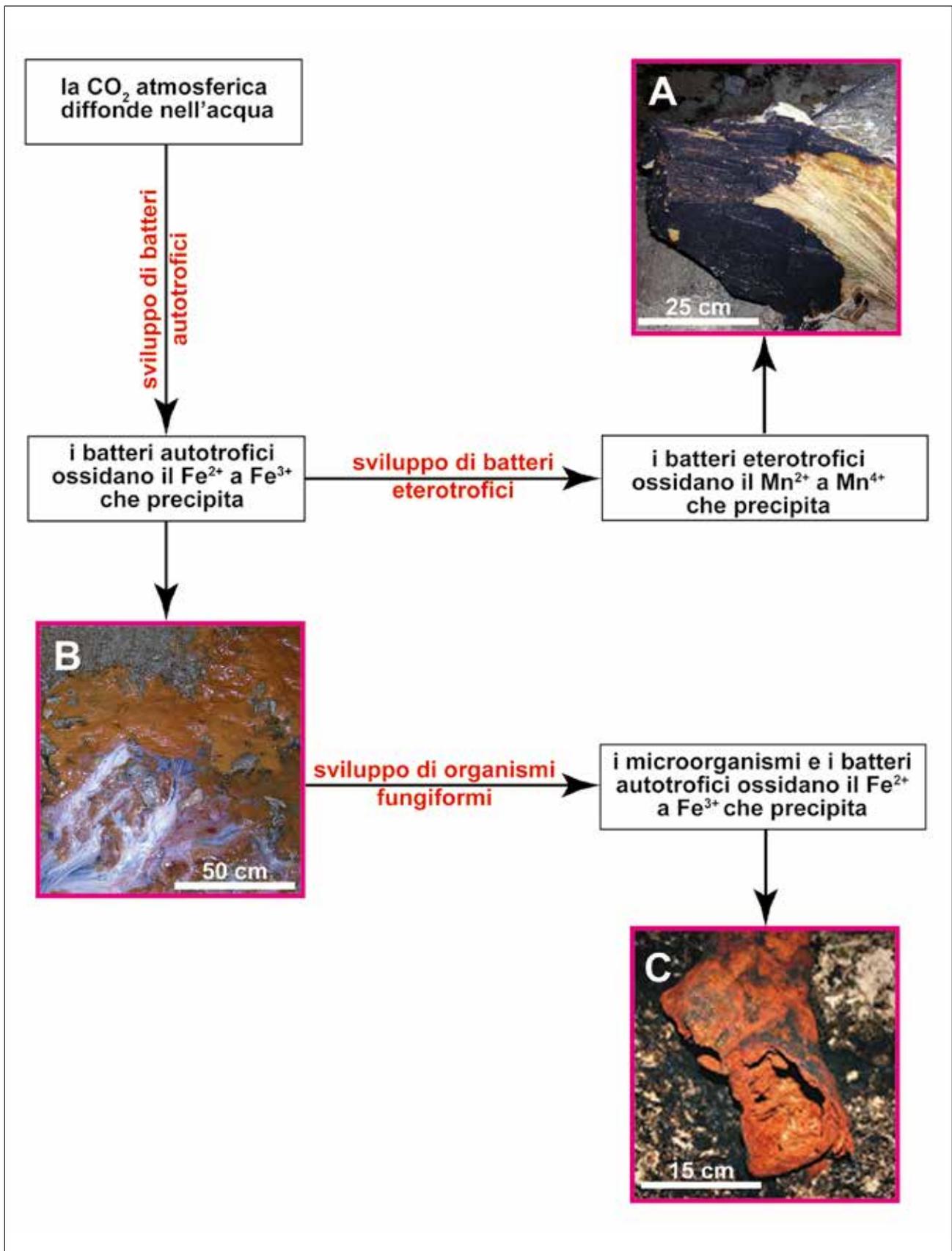


Fig. 64 – Rapporti esistenti tra sviluppo di colonie di microorganismi e formazione di depositi di ossidi-idrossidi di ferro e manganese nella grotta Zoloushka in Ucraina (da KOTULA *et al.*, 2019, modificata). Grotta di Moncalvo, Piemonte poche settimane dopo il suo svuotamento: A) polveri nere di composti di manganese depositati su un interstrato marnoso (Foto: Paolo Forti); B) masse rosse di idrossidi di ferro in formazione (Foto: Paolo Forti); C) Grotta Zoloushka (Ucraina): frammento di una concrezione di ossidi di ferro cresciuta all'interno di una colonia di organismi fungiformi (Foto: Viacheslav Andreychouk).

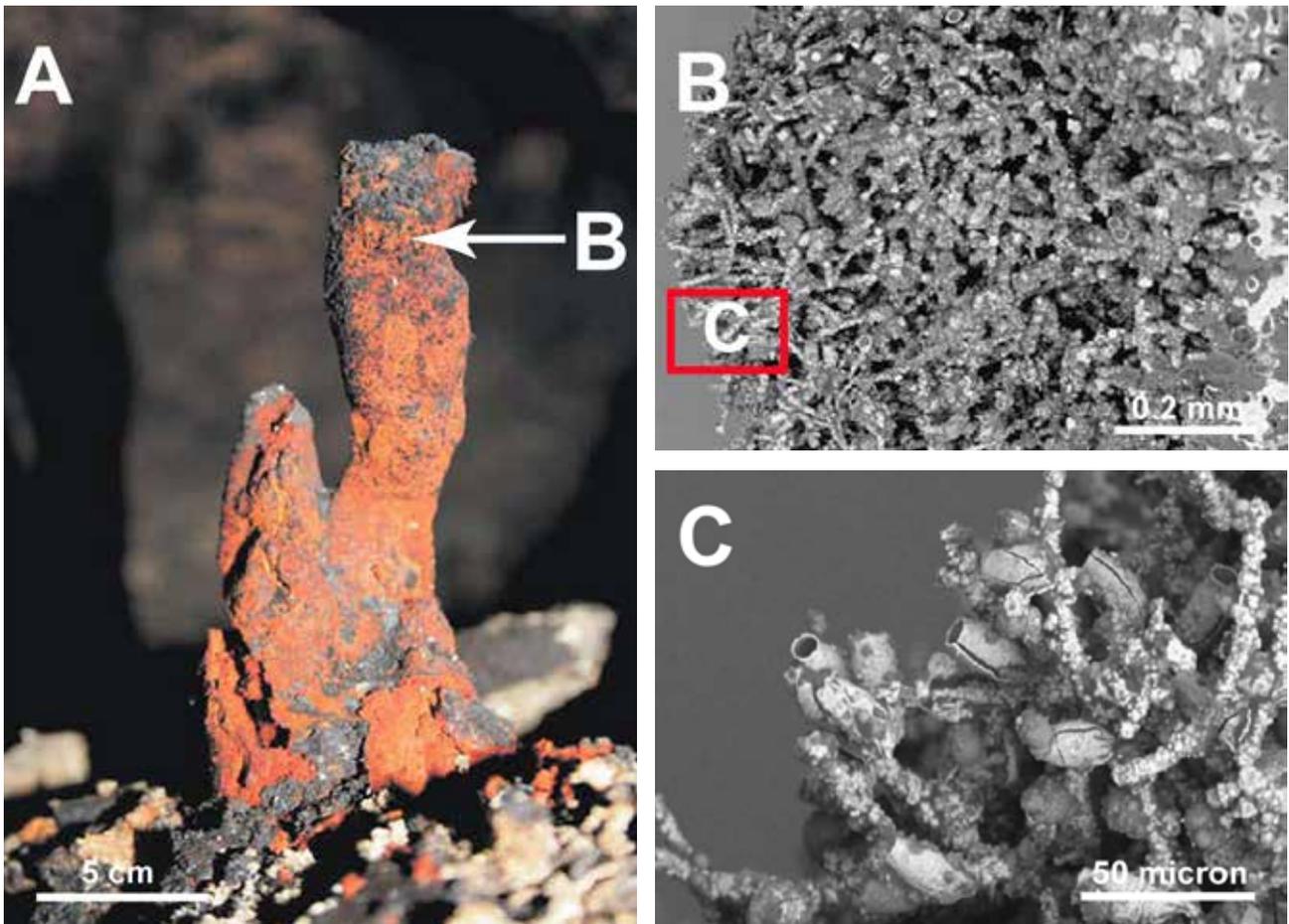


Fig. 65 – A) Grotta Zoloushka (Ucraina): pseudo-stalagmite formata da ossidi di ferro cresciuti su una colonia di batteri fungiformi; B) immagine al microscopio elettronico di una sezione trasversale della pseudo-stalagmite che evidenzia la struttura biogenica della stessa; C) ingrandimento di B per mettere in evidenza le strutture biologiche fossilizzate dagli ossidi di ferro (Foto: Viacheslav Andreychouk).

te e la rodocrosite.

L'aragonite è il terzo minerale di grotta più comune al mondo (HILL & FORTI, 1997) ma è praticamente assente nelle cavità in gesso. Risulta segnalato una sola volta, e in una unica grotta (ANDREYCHOUK *et al.*, 2013), dove forma alcune strane concrezioni sul fondo, parzialmente concrezionato, di un lago prosciugato (Fig. 68A).

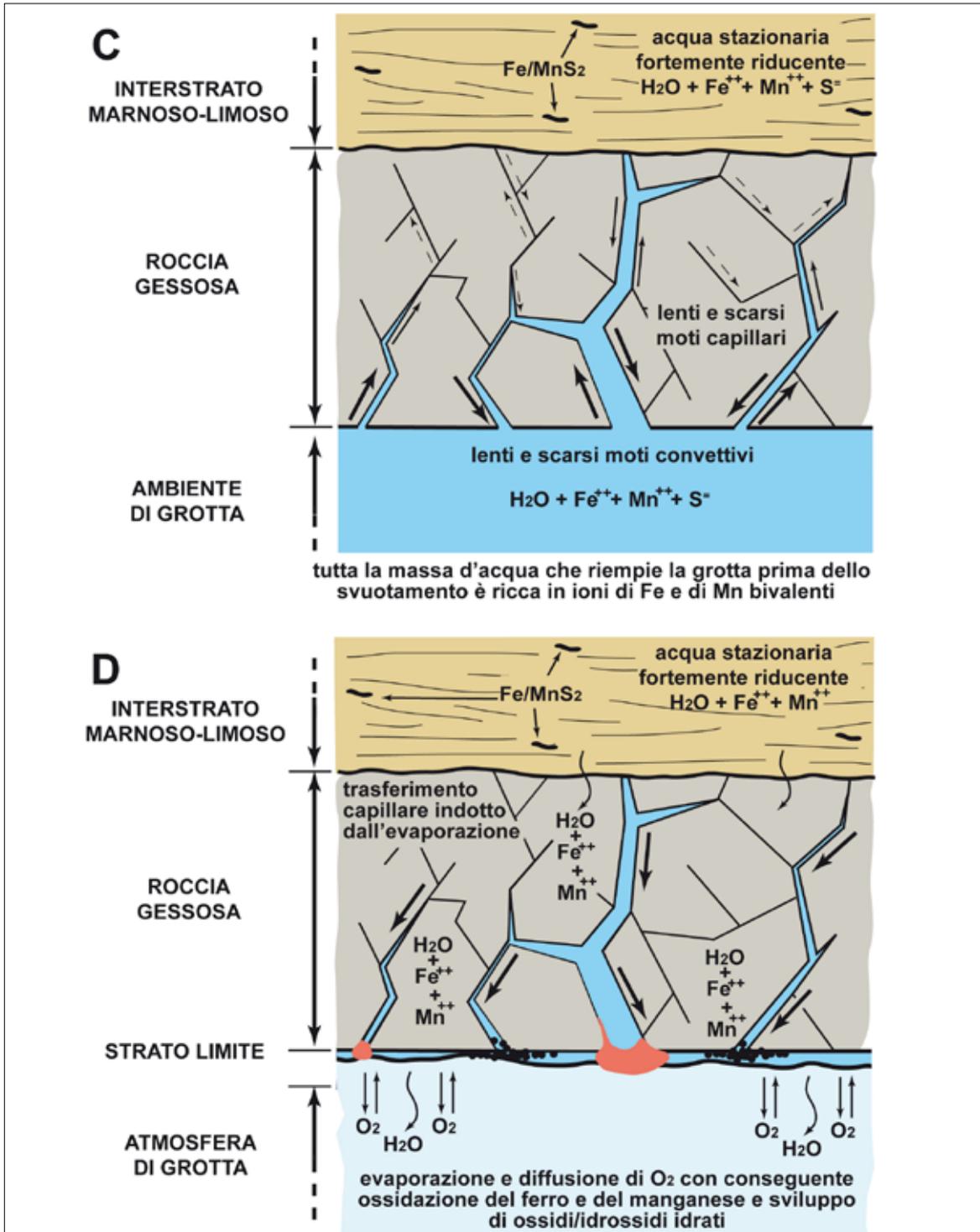
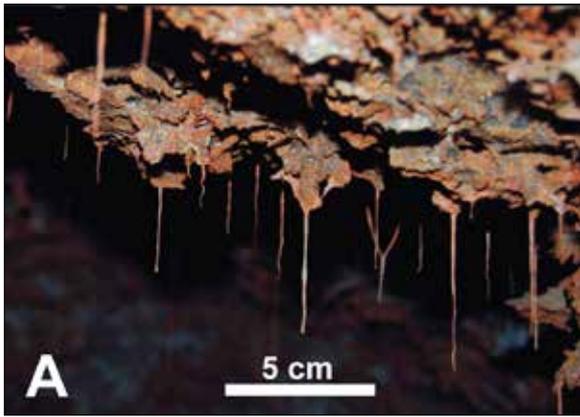
La segnalazione è molto concisa e indica solamente la composizione mineralogica delle concrezioni, chiamate dagli autori "tubolari", per la presenza di un canalico interno di alimentazione, e la loro dimensione massima (3,5 cm di altezza e 3-5 mm di diametro). La genesi di questi speleotemi antigravitativi è messa in relazione diretta con la presenza, a poche decine di centimetri dalle tubolari, di un potente faro elettrico che illumina l'area situata all'interno del percorso turistico della Grotta di Kungur, mentre il carbonato di calcio necessario al loro sviluppo deriva dalla solubilizzazione delle calciti flottanti che si erano accumulate sul fondo argilloso del lago, prima della sua scom-

parsa (ANDREYCHOUK, comunicazione personale).

In ultima analisi, quindi, le tubolari di aragonite sarebbero un nuovo speleotema antropogenico, il cui sviluppo è conseguenza diretta della presenza del faro di illuminazione della grotta turistica.

In effetti, la formazione di aragonite (Fig. 68B) a seguito della presenza di un potente faro di illuminazione, era già stata documentata all'interno della Grotta di Castellana (FORTI, 1980).

In quell'occasione la deposizione avveniva sulla sommità di una stalattite monocristallina attiva, il che indicava chiaramente che, senza l'illuminazione, la sovrassaturazione era molto modesta e permetteva quindi solo la crescita per epitassia. Le analisi sperimentali effettuate in loco, avevano però evidenziato l'enorme influenza che l'accensione della lampada (di 1Kw di potenza), posta a meno di 1 metro di distanza dalla stalattite stessa, aveva sul microclima locale. Infatti, dopo poco più di un minuto dall'accensione, la temperatura della goccia passava da 15 a 24 °C, mentre l'umidità relativa scendeva da 98-99% a poco più



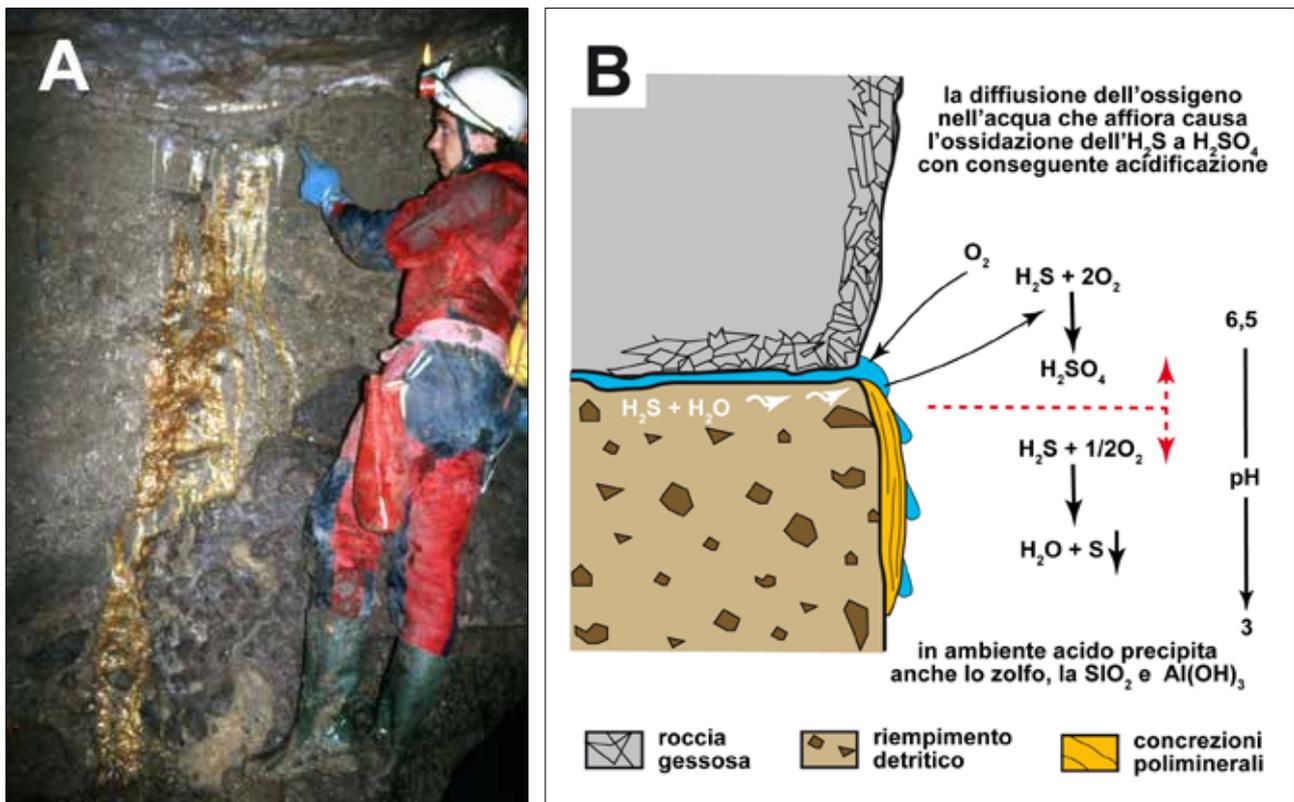


Fig. 67 – Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): A) colata poliminerale nella zona di affioramento dell'acqua solfurea (Foto: Paolo Forti); B) il meccanismo che ha permesso allo zolfo elementare di dare luogo alle colate poliminerali assieme a opale e ossidi-idrossidi amorfi di alluminio e ferro (da FORTI, 1989, modificata).

del 50% e la corrente d'aria, prima assente, diveniva ascensionale, con velocità di quasi 1 m/s. È evidente quindi che la conseguente evaporazione accentuata, causava un brusco innalzamento della sovrassaturazione della soluzione, tale da permettere lo sviluppo di aragonite al posto della calcite.

In assenza di dati sperimentali, per cercare di dare almeno una spiegazione logica dello sviluppo delle cannule antigravitative, è utile tener presente il meccanismo genetico di un altro speleotema antropogenico: le carbidimiti (SARIGU, 1999), che morfologicamente non differiscono molto dalle cannule antigravitative della grotta di Kungur.

Le carbidimiti (Fig. 69A) spesso sono formate da calcite, ma si conoscono casi in cui il minerale che le costituisce è invece la vaterite o, appunto, l'aragonite (HILL & FORTI, 1997) e si sviluppano sopra gli accumuli di carburo esausto un tempo abbandonati in grotta dagli speleologi (Fig. 69B).

In pratica l'acqua di condensazione, o di stillicidio, penetrando nelle polveri di carburo esausto, quando incontra dei frammenti di CaC_2 reagisce, formando l'acetilene e l'idrossido di calcio.

Il gas acetilene tende quindi a risalire verso l'alto, trascinandosi con sé la soluzione ricca di ioni Ca^{2+} e OH^- , i quali, non appena arrivano in contatto con l'atmosfera, reagiscono con l'anidride carbonica per dare carbonato di calcio, che precipita sotto forma di calcite o, più raramente, aragonite.

Inizialmente si forma un "collarino" di concrezione, che circonda la goccia d'acqua, di solito stazionaria; progressivamente, nella sua crescita, la carbidimite tende ad allargarsi fintantoché non raggiunge una dimensione di equilibrio, attorno al mezzo centimetro, o poco più, di diametro.

Le carbidimiti sono caratterizzate sempre dall'esistenza di un canalicolo di alimentazione, da capillare fino a qualche millimetro di diametro, lungo cui risalgono

Fig. 66 – Grotta della miniera di gesso di Moncalvo (Piemonte): A) croste di ossidi di ferro da cui pendono pseudostalattiti dette "mucoliti" essendo formate dalle colonie dei batteri ferro-ossidanti (Foto: Bartolomeo Vigna); B) particolare delle croste di ossidi-idrossidi di ferro di A (Foto: Bartolomeo Vigna); C) prima che la miniera la intersecasse la grotta era completamente allagata da acqua solfurea ricca di ioni Fe^{2+} e di ioni Mn^{2+} ; D) immediatamente dopo lo svuotamento sono iniziati i processi biologici ossidativi grazie all'ossigeno dell'atmosfera che hanno portato alla formazione di croste di ossidi-idrossidi idrati di ferro e manganese (da DE WAELE *et al.*, 2013, modificata).

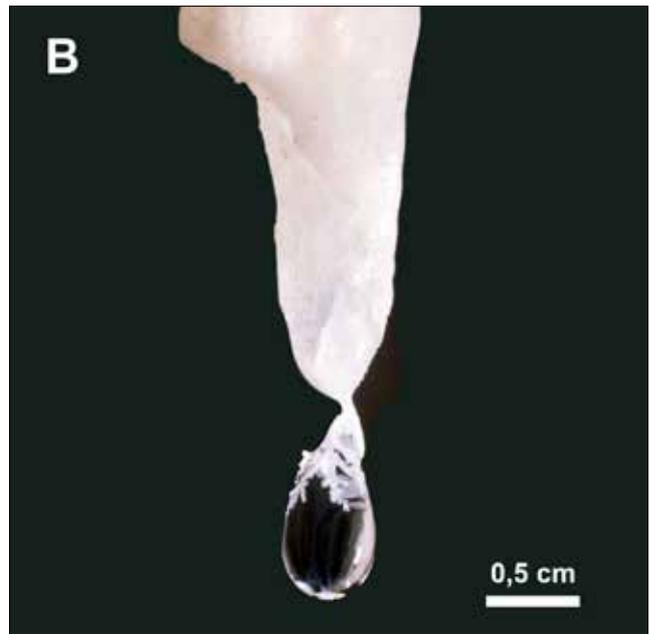
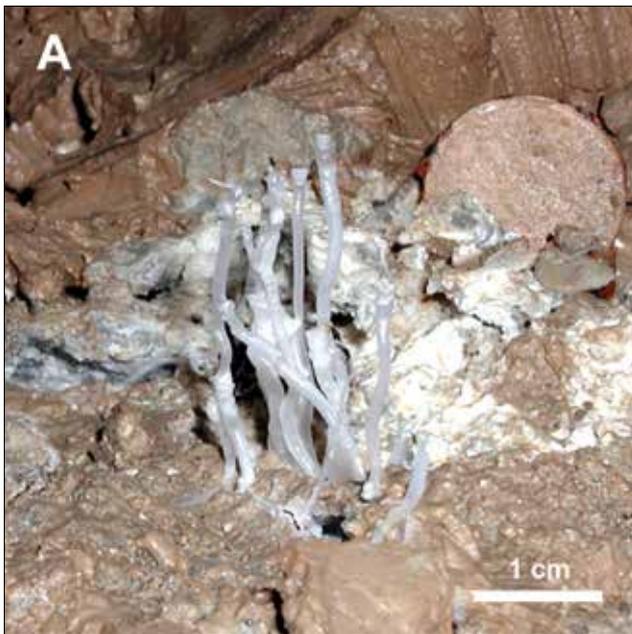


Fig. 68 – A) Grotta di Kungur (Russia): cannule antigravitative di aragonite che crescono dal fondo di un laghetto adesso completamente asciutto (Foto: P. Sivinskih) (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata); B) Grotta bianca al fondo del percorso turistico della Grotta di Castellana (Puglia): stalattite di calcite monocristallina dal cui apice si sviluppano piccole eccentriche di aragonite (Foto: Pierfederico Testi).

le bolle di acetilene e la soluzione di idrossido di calcio che poi, al contatto con l'atmosfera di grotta, crea la concrezione.

Le cannule antigravitative della Grotta di Kungur sono morfologicamente molto simili alle carbidimiti, ma il loro meccanismo genetico è necessariamente del tutto differente (Fig. 70).

In pratica la genesi delle cannule inverse inizia all'interno del sedimento, costituito da una mescolanza di argilla e frammenti di calcite flottante, dove l'acqua liquida, quando presente, si satura di carbonato di calcio, a spese dei frammenti di calcite flottante. Quindi, per capillarità, pressione idrostatica e/o correnti convettive, risale fino ad arrivare in contatto con l'atmosfera dove, grazie al calore sviluppato dalla grande lampada, si scalda ed evapora rapidamente, raggiungendo così condizioni idonee per la precipitazione di aragonite.

Questo processo è accentuato anche dalla possibile presenza di acqua ghiacciata all'interno del sedimento argilloso, che diviene disponibile non appena il calore sviluppato della lampada, penetrando nel sedimento, la fa liquefare e concentrare esattamente al di sotto dei condotti che si raccordano con le cannule inverse.

In buona sostanza quindi questi speleotemi sono attivi esclusivamente durante il periodo di apertura al pubblico e solamente quando la luce posizionata vicino ad essi è accesa, mentre sono inattivi, per mancanza di alimentazione, per tutto il resto del tempo.

Allo stadio delle conoscenze attuali, non è possibile sapere se i canalicoli di alimentazione interni alle cannule antigravitative siano capillari e no e neppure se l'acqua che le alimenta possa a volte fuoriuscire e scorrere sulla superficie esterna delle concrezioni, permettendone così un certo progressivo allargamento.

Rimane da notare che centinaia di cicli di accensione e spegnimento dell'illuminazione fanno lentamente crescere questi speleotemi, il cui sviluppo continuerà fintantoché la capillarità, e le altre forze eventualmente in gioco, saranno in grado di far risalire l'acqua fino alla sommità delle cannule inverse. Da quel momento in poi, queste concrezioni cesseranno di accrescersi.

In conclusione però, quello che si può sostenere con sicurezza è che le cannule inverse sono un *unicum* per le grotte in gesso, non solo per il fatto di essere costituite da aragonite, ma anche perché sono una concrezione del tutto antropogenica.

Più recentemente, poi, cannule antigravitative, molto simili per dimensioni e forma a quelle subaeree, sono state scoperte a 3 metri sotto il livello di un altro lago della stessa grotta (OLGA KADEBSKAYA, comunicazione personale): in questo caso si trattava però di speleotemi formati da calcite e non da aragonite (Fig. 71).

È evidente che, in questo caso, l'eventuale presenza di illuminazione non avrebbe potuto, in alcun caso, influenzare il loro sviluppo, dato che il grande volume d'acqua contenuto dal lago avrebbe comunque impedito una sua, anche minima, variazione di tem-

peratura.

L'ipotesi più probabile è basata invece sul fatto che i sedimenti al fondo del lago sono ricchi di materiale organico, il quale, ossidandosi, produce anidride carbonica.

La CO_2 così generata da un lato permette la solubilizzazione del carbonato di calcio presente nel sedi-

mento con l'accumulo di calciti flottanti, e dall'altro crea bolle di gas che, nella loro migrazione ascendente, trascinano la soluzione ricca di CaCO_3 . Quando la soluzione raggiunge l'acqua del lago si ha una diffusione dell'anidride carbonica verso quest'ultima e, conseguentemente, la soluzione diviene leggermente sovrasatura e pertanto deposita il carbonato di calcio,

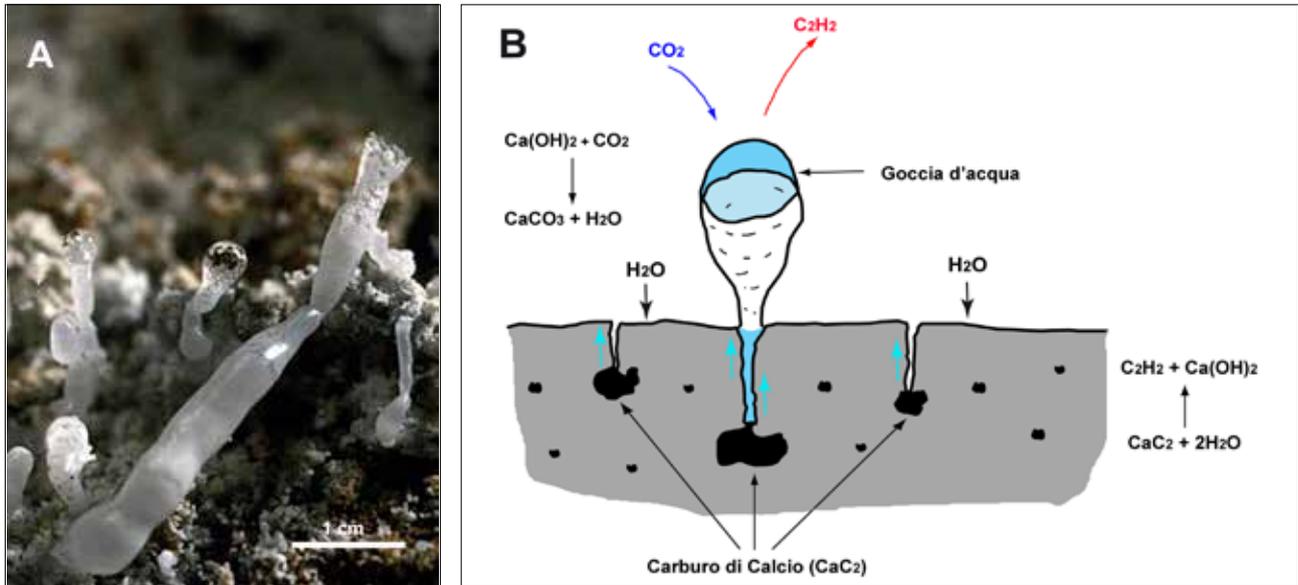


Fig. 69 – A) Grotta degli Scogli Neri, Liguria: carbidimiti di calcite su un ammasso di carburo esausto (Foto: Sergio Sarigu); B) meccanismo genetico che porta allo sviluppo di questi speleotemi a partire dalla reazione tra i granuli di carburo di calcio, ancora presenti nelle polveri di carburo esausto, e l'acqua che arriva loro in contatto.

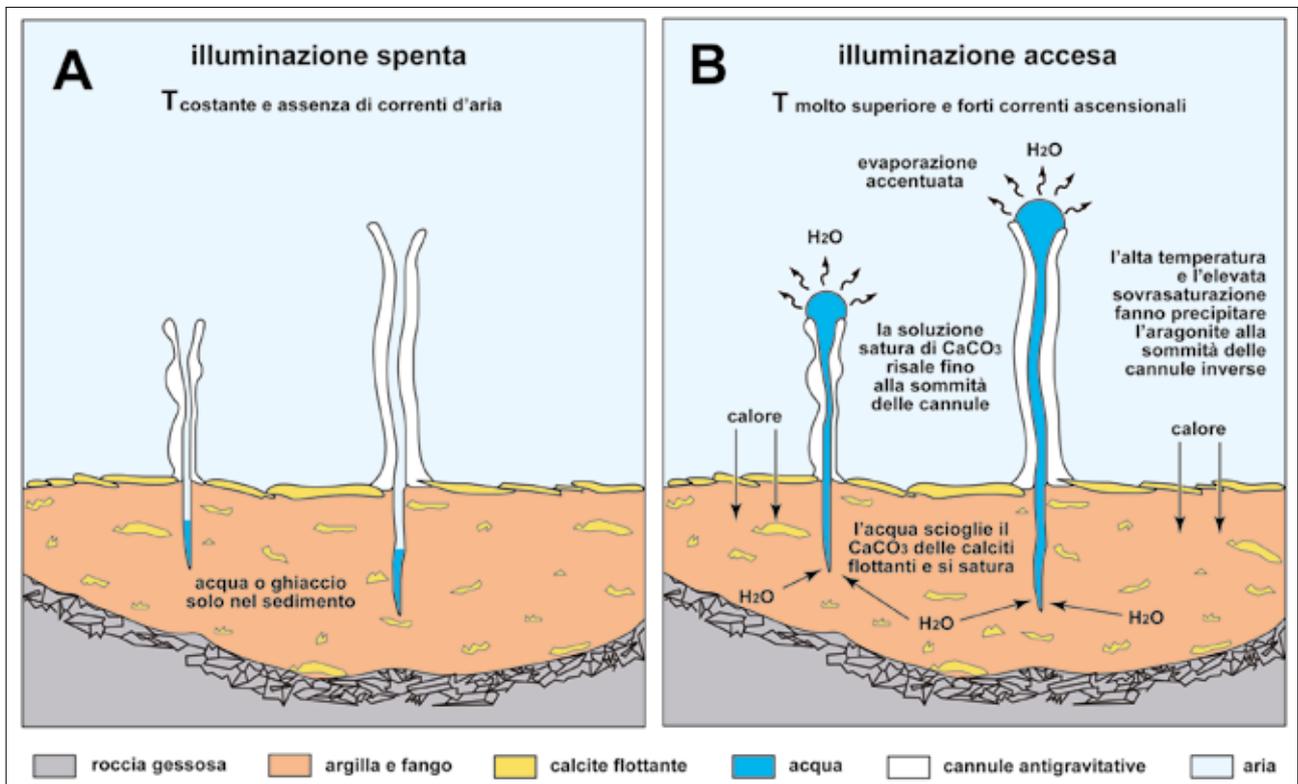


Fig. 70 – Grotta di Kungur (Russia): A-B) schema genetico che sintetizza il meccanismo di sviluppo delle cannule antigravitative di aragonite controllato dalla accensione (A) e spegnimento (B) di una potente lampada del percorso turistico.

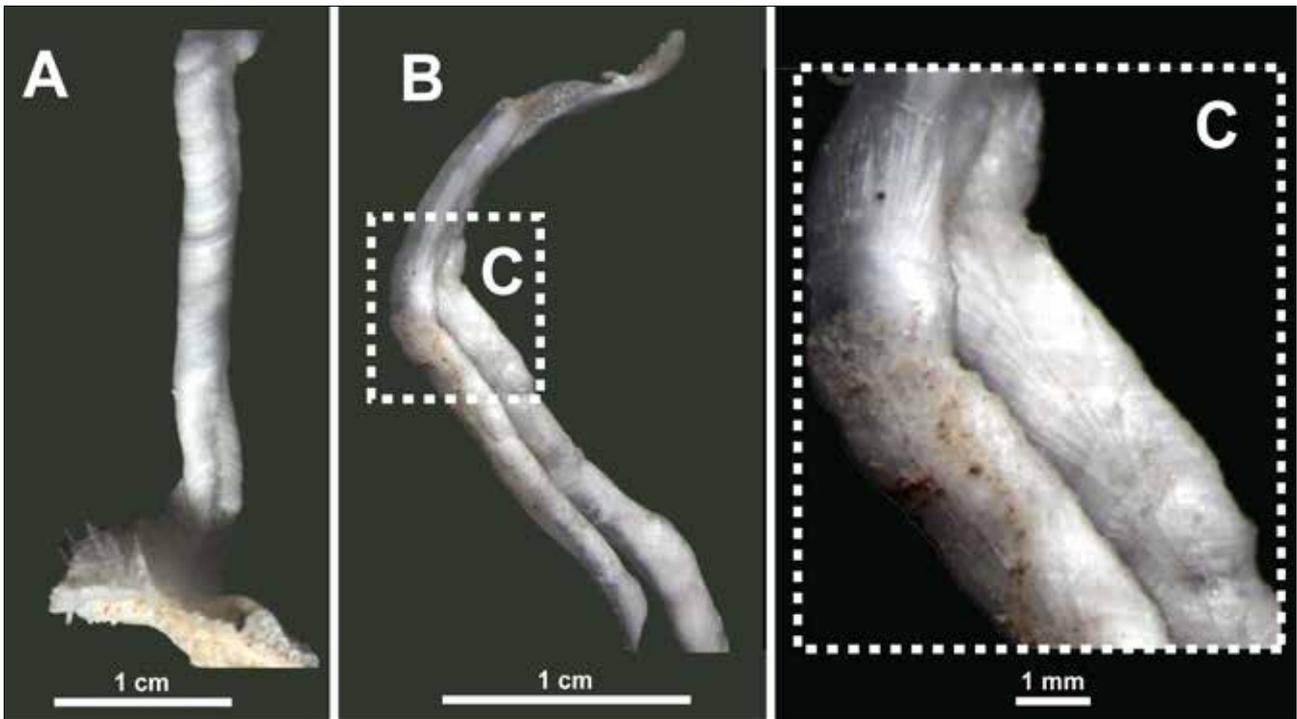


Fig. 71 – Grotta di Kungur (Russia): A-B immagini di due frammenti di cannule antigravitative subacquee; C) ingrandimento per evidenziare la struttura cristallina aciculare della calcite che forma le pareti delle cannule (Foto: Olga Kadebskaya).

sotto forma di calcite, ma solo nel punto esatto di miscelazione con le acque del lago (Fig. 72). In questo modo iniziano a formarsi le cannule inverse che nel tempo spostano il punto di miscelazione sempre più in alto. La bassa sovrasaturazione ipotizzata per il loro sviluppo è confermata anche dal fatto che i cristalli che costituiscono la struttura delle cannule sono particolarmente ben sviluppati (Fig. 71C).

In pratica, quindi il loro meccanismo di sviluppo è assolutamente analogo a quello delle carbidimiti, solo che la CO_2 proviene da reazioni organogene, mentre la sua diffusione avviene sott'acqua e non all'interfaccia acqua-aria.

La principale differenza tra le cannule antigravitative subaeree e quelle subacquee consiste nella loro diversa composizione mineralogica: aragonite per le prime e calcite per le seconde. Questo è assolutamente logico perché la sovrasaturazione, come anche la temperatura, raggiunta è molto maggiore nel caso delle cannule subaeree. Nonostante questo, però, forse la velocità globale di crescita dei due differenti speleotemi è simile perché lo sviluppo delle cannule subacquee è continuo nel tempo, mentre quello degli speleotemi subaerei si attiva solo per poche ore al giorno e quasi esclusivamente nei mesi estivi.

Proprio per questo si può anche pensare che le reazioni biogeniche a livello del sedimento siano importanti anche nel caso di quelle subaeree. Infatti il sedimento

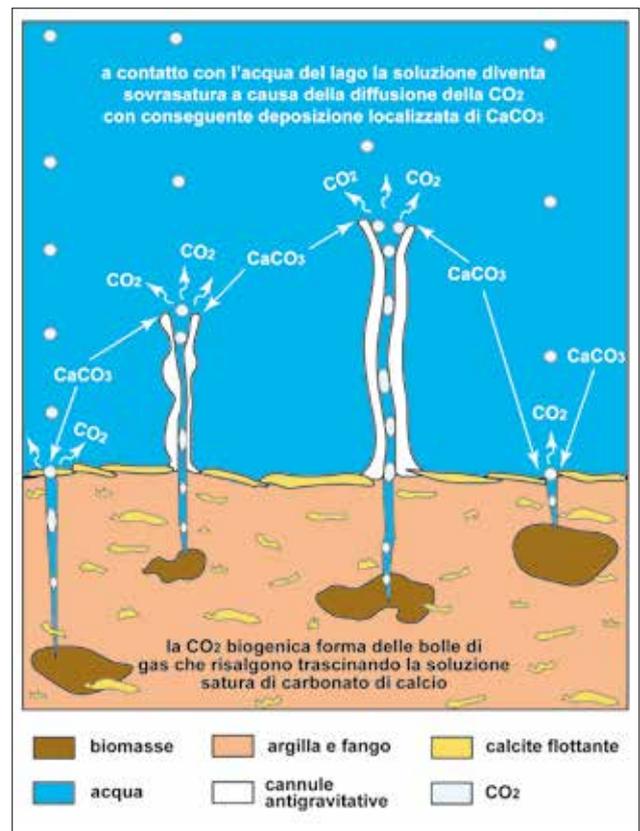


Fig. 72 – Grotta di Kungur (Russia): meccanismo evolutivo ipotizzato per la genesi e lo sviluppo delle cannule subacquee di calcite: l'unico punto in cui è attiva la deposizione di calcite è esattamente l'orlo superiore delle cannule.

argilloso è essenzialmente lo stesso ed è quindi logico che contenga materiale organico in concentrazioni simili, e che, pertanto, possa dar luogo anch'esso allo sviluppo di CO₂.

Produzione che verrebbe anche aumentata nei periodi di illuminazione, come conseguenza diretta del grande riscaldamento subito dal substrato delle cannule antigraavitative; inoltre lo sviluppo di piccole bolle di anidride carbonica favorirebbe la risalita della soluzione nel meato di alimentazione e, conseguentemente, renderebbe più efficace e rapida l'evoluzione di queste ultime. Naturalmente tutte queste ipotesi andrebbero suffragate da analisi sperimentali in loco, che si spera possano essere effettuate in un prossimo futuro.

La dolomite, praticamente pura, è stata osservata per la prima volta (FORTI *et al.*, 2004) come piccoli depositi di moonmilk bianco-grigiastro (Fig. 73A) sulle pareti di una galleria a non molta distanza dall'ingresso della Grotta della Spipola nei Gessi Bolognesi. Un'analisi al microscopio elettronico ha dimostrato come il moonmilk è costituito da minuscoli cristallini sub-euedrali di dolomite.

Il magnesio, necessario alla formazione di questo minerale, deriva dagli interstrati marnosi-argillosi presenti nella formazione gessosa, il calcio dalla dissoluzione parziale del gesso, e infine, la CO₂ dalla diffusione di questo gas dall'atmosfera nell'acqua che condensa sulla parete gessosa. La genesi del moonmilk è stata chiaramente indotta da un periodo di

siccità eccezionale, che ha causato un forte abbassamento dell'umidità relativa nella galleria in questione, tanto da richiamare per capillarità soluzioni intrappolate, da un lungo tempo, nei piani di contatto tra i vari cristalli, che costituiscono la parete stessa, e causarne l'evaporazione totale. Non appena però, con le prime piogge, si sono ri-istaurate le condizioni di normale umidità relativa, e quindi di flusso laminare di acqua di condensazione sulle pareti, tutti i depositi di dolomite sono stati ridisciolti o comunque dilavati.

Un secondo ritrovamento è avvenuto, più recentemente, nel Sistema carsico Rio Stella-Rio Basino (Vena del Gesso romagnola), all'interno di ammassi pulverulenti biancastri (Fig. 73B) che si trovano su massi di crollo lungo il torrente, a pochi metri dall'ingresso del Rio Basino (FORTI & LUCCI, 2010).

In questa grotta, la dolomite non era pura come nel caso della Spipola, ma risultava essere un componente minoritario della polvere formata quasi totalmente dalle strutture di microorganismi. In questo caso, quindi, la genesi della dolomite è di natura biogenica, essendo stata controllata da questi microorganismi che, con le loro attività vitali, forniscono al sistema la CO₂ necessaria alla sua precipitazione, dato che lo ione calcio è praticamente sempre presente in alte concentrazioni nell'ambiente gessoso. Lo ione magnesio, come nel caso della Spipola, proviene dal dilavamento degli interstrati marnoso-argillosi. Anche nel Rio Basino i depositi pulverulenti con dolomite non sono permanenti, essendo distrutti ogniqualvolta il

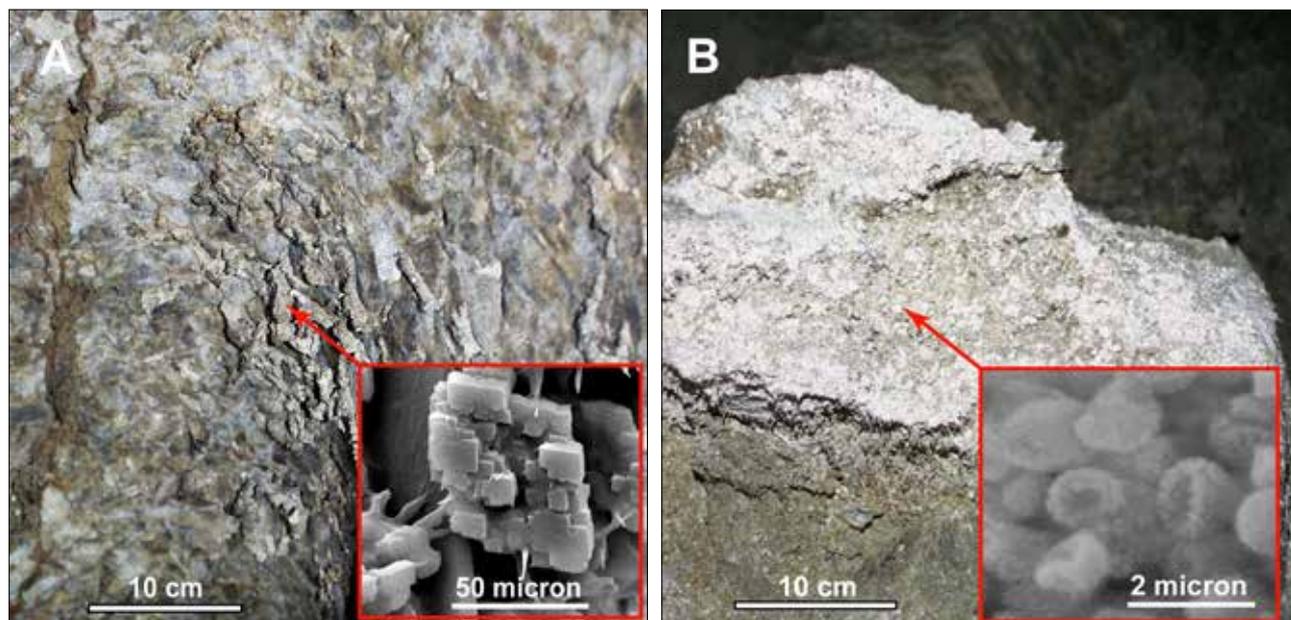


Fig. 73 – A) Grotta della Spipola (Gessi Bolognesi): la volta della condotta in cui si sono formate masserelle di moonmilk di dolomite pura durante un periodo di estrema siccità (Foto: Paolo Forti) e nel riquadro l'immagine al microscopio elettronico dei cristalli di dolomite (Foto: Paolo Ferrieri); B) Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): uno dei massi ricoperti dalla polvere bianca in cui si è sviluppata la dolomite (Foto: Piero Lucci) e immagine al microscopio elettronico delle colonie di batteri responsabili per la deposizione della dolomite (Foto: Paolo Ferrieri).

torrente sotterraneo va in piena.

La gaylussite è un minerale di grotta scoperto solo recentemente, come costituente secondario, assieme ad altri quattro minerali (calcite, dolomite, celestina e salgemma), delle polveri di gesso criogeniche che si sviluppano nei periodi invernali nella Grotta di Kungur, che è attualmente l'unica cavità naturale in cui questi depositi sono stati studiati in dettaglio (TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015).

Il congelamento progressivo di grandi volumi d'acqua causa la deposizione non solo di polveri di gesso, ma anche, verso la fine del processo e a causa della concentrazione progressiva degli ioni residui in soluzione, lo sviluppo di crosticine che, a fronte di una maggioranza di gesso e calcite, contengono gli altri quattro minerali. In particolare, è stato dimostrato che in questi aggregati pluricristallini la composizione risulta, almeno in parte, condizionata dal microclima locale: infatti nelle zone più lontane dagli ingressi e quindi relativamente meno fredde ($>0^{\circ}\text{C}$) la deposizione, conseguente al congelamento e all'evaporazione, causa la sequenza calcite \rightarrow dolomite, mentre, nelle aree più fredde (da -5 a -3°C), i minerali depositati sono calcite \rightarrow calcite magnesifera \rightarrow gaylussite (TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015). Infine, la rodocrosite è stata osservata solo nella grotta Zoloushka in Ucraina, dove è presente sotto forma di sottili crosticine, o come piccoli boxwork a struttura microcristallina che sporgono dalla parete di gesso che ha subito una forte dissoluzione durante il periodo di totale sommersione della cavità.

I solfati

Oltre al gesso altri cinque solfati sono stati segnalati come minerali di grotta in ambiente gessoso: la bassanite, la celestina, l'epsomite, la glauberite e la mirabilite.

La bassanite è stata trovata, come polvere incoerente, solo nei primissimi ambienti di alcune piccole grotte del diapiro gessoso di Punta Alegre a Cuba (CHIESI *et al.*, 1992). La bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) deriva di norma da una parziale e relativamente facile disidratazione del gesso: la sua localizzazione costante, pochissimo all'interno di queste piccole grotte, fa ritenere che il responsabile della sua formazione sia l'impatto diretto dei raggi del sole in quell'area subtropicale, come del resto avviene al gesso esposto all'esterno di queste cavità naturali.

Due sono le aree in cui la celestina è presente: la Grotta di Kungur negli Urali e la Grotta di Grave Grubbo, in Calabria.

Nella Grotta di Kungur la presenza di celestina nelle polveri poliminerali (Fig. 58A, B) è solamente stagionale e la sua deposizione avviene esclusivamente verso la fine del processo di congelamento totale delle

acque che, alla fine, diventano sovrasature rispetto a questo sale di stronzio che, originariamente, è disperso in concentrazione molto bassa all'interno della roccia gessosa (TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015).

Nella grotta di Grave Grubbo la celestina si presenta sotto forma di piccoli cristalli euedrali esattamente al contatto con l'acqua solfurea che fuoriesce da una piccola sorgente parietale.

Non sono ancora state avanzate teorie genetiche per questi depositi, ma sembra logico che si siano formati durante il breve periodo di svuotamento della grotta, quando la rapida ossidazione biologica dell'acido solfidrico a solforico (CARROZZINI *et al.*, 1996) ha aumentato la concentrazione degli ioni solfato presenti in soluzione, costringendo così anche la celestina, meno solubile del gesso, a precipitare.

L'epsomite e la mirabilite sono minerali stagionali che si sviluppano, nel pieno dell'inverno, in molte grotte dei Gessi Bolognesi (BERTOLANI & ROSSI, 1972; CERVELLATI *et al.*, 1975).

L'epsomite, nota come minerale delle grotte bolognesi già nell'antichità (LAGHI, 1806), forma fibre bianche traslucide molto sottili (meno di 0,1 mm) ed estremamente allungate (fino a 10-15 cm) (Fig. 74A) che si sviluppano sulle superfici esposte degli interstrati argillosi-limosi o direttamente sul suolo fangoso delle grotte, qualora sia presente lo ione magnesio necessario alla loro formazione. Le fibre di epsomite, minerale estremamente solubile, vengono sciolte non appena l'umidità relativa dell'atmosfera di grotta aumenta all'inizio della primavera (CERVELLATI *et al.*, 1975).

La mirabilite si trova spesso associata all'epsomite, anche se è meno comune, a causa della sua maggiore facilità a passare in soluzione. È infatti un composto deliquescente (in grado cioè di assorbire l'acqua direttamente dall'atmosfera), e pertanto la sua presenza è limitata a un periodo molto freddo ed estremamente breve, in cui l'umidità relativa nell'aria scende sotto all'80% (HILL & FORTI, 1997).

La mirabilite è stata segnalata nella Grotta Gortani nei Gessi di Zola Predosa (Bologna) (BERTOLANI & ROSSI, 1972): come nel caso del magnesio per l'epsomite, lo ione sodio necessario alla sua formazione proviene dagli interstrati marnosi-argillosi. La mirabilite è comunque molto più instabile dell'epsomite, dato che ha una capacità molto maggiore di assorbire l'umidità dell'atmosfera.

Nella Grotta di Kungur, la mirabilite da luogo a sottilissime fibre che si formano esclusivamente nella zona periglaciale della grotta (Fig. 74B, C) a seguito della risalita capillare di soluzioni presenti all'interno di depositi essenzialmente argillosi: anche in questo caso però la sua stabilità è abbastanza problematica, dato che è un minerale deliquescente, ma anche perché

può facilmente disidratarsi, qualora le temperature si innalzino.

All'interno delle polveri di gesso criogenico, poi, sono stati segnalati anche la glaubertite e la tenardite assieme a diversi solfati di magnesio idrati, che, per la loro dispersione e scarsità, non sono stati identificati.

Infine, l'ultimo minerale solfatico di grotta scoperto nella Grotta di Kungur è stata la jarosite che, insieme alla idro-goetite, ha dato luogo a sottili depositi plastici e crosticine all'interno di una frattura della sala chiamata "Dirty Grotto" (Fig. 75).

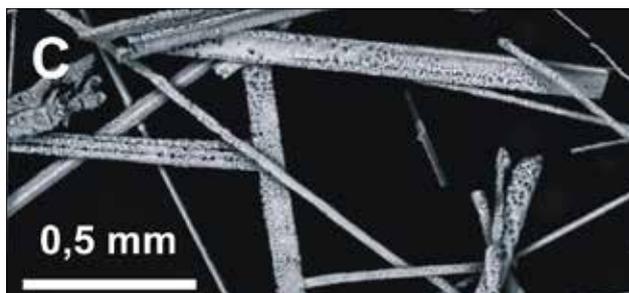
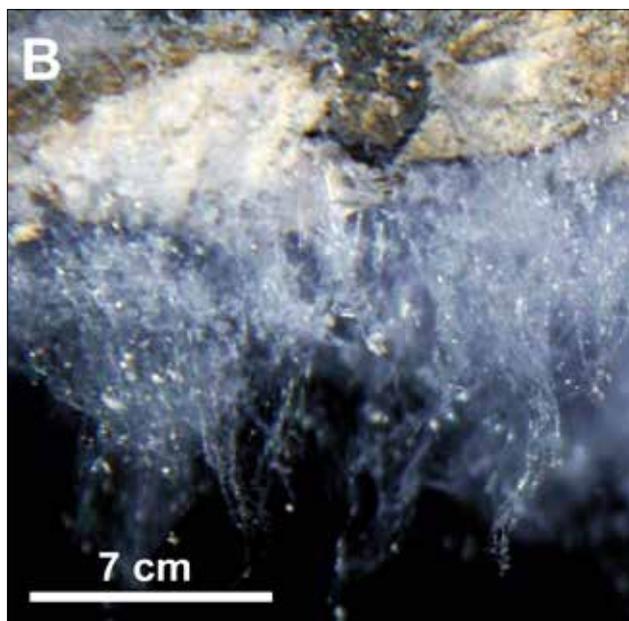
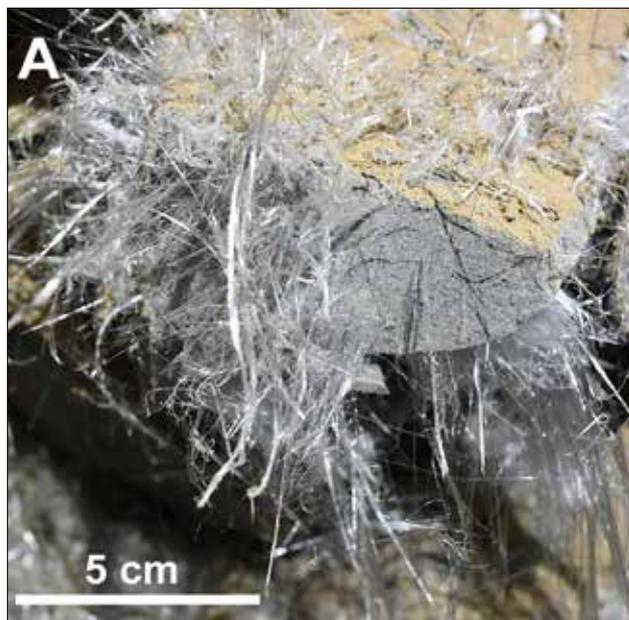
La formazione della jarosite e della idro-goetite, possibile solo nella zona periglaciale delle grotte, è dovuta all'affioramento di soluzioni capillari che scorrono lungo i bordi dei granuli di gesso, con conseguente inizio del processo di ossidazione del ferro bivalente.

I cloruri

I cloruri sono attualmente rappresentati da tre minerali, che sono stati segnalati in tre differenti grotte: il primo, la cloromagnesite, fu scoperto all'interno del Buco dei Buoi nei Gessi Bolognesi (CERVELLATI *et al.*, 1975) dove è presente come cristalli submillimetrici associato a epsomite (largamente prevalente) e, come quest'ultima, è solo un minerale stagionale. La sua genesi va ricondotta all'evaporazione totale di piccoli volumi d'acqua che affiorano per capillarità dai depositi argilloso-marnosi dove sono presenti in traccia gli elementi che ne rendono possibile la formazione.

Il salgemma è stato individuato, come componente minoritario delle piccole croste che si formano in inverno, a causa del congelamento totale dei laghi della grotta di Kungur, (TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015). Infine la silvite forma delle piccole stalattiti monominerali all'interno della grotta Darhedj Cave in Algeria: questo minerale si trova all'interno della sequenza evaporitica che ricopre la grotta, e quindi è sciolto dalle acque di infiltrazione meteorica e ridepositato, a causa del clima molto arido dell'area, per evaporazione non appena affiorano all'interno della cavità, (CALANDRI & RAMELLA, 1987).

Fig. 74 – A) Grotta del Tempio (Gessi Bolognesi): fibre di epsomite su massi di crollo (Foto: Giovanni Belvederi); B) Grotta di Kungur (Russia): fibre di mirabilite che pendono dal soffitto della galleria (Foto: Viacheslav Andreychouk); C) immagine al microscopio elettronico delle fibre di mirabilite in cui sono evidenti i piccoli vacui superficiali causati dalla parziale solubilizzazione per assorbimento dell'umidità dell'ambiente; D) immagine al microscopio elettronico che evidenzia le fratture e la perdita di volume delle singole fibre di mirabilite dovute alla disidratazione probabilmente occorsa dopo il suo campionamento (Foto: Olga Kadebskaya & Elena Chirkova) (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata).



I fosfati

Sino ad oggi gli unici tre fosfati segnalati nelle grotte in gesso sono tutti molto comuni: la brushite, l'idrossiapatite e la fluoroapatite. La brushite forma ammassi lenticolari di materiale terroso giallastro (Fig. 76A) all'interno di grossi depositi di guano risalenti a un tempo passato (non meglio precisato) che si trovano nelle prime sale della grotta del Prete Santo, vicino a Bologna (FORTI, 1983). L'idrossiapatite e la fluoroapatite invece sono state osservate esclusivamente nella Grotta della Milocchite (Santa Ninfa, Sicilia), sotto forma di crosticine, di color giallo oro brillante, su una mandibola fossile (Fig. 76B) (CHIESI & FORTI, 1992).

Molti dei fosfati attualmente conosciuti come minerali di grotta (come del resto anche alcuni dei solfati, nitrati e cloruri) (HILL & FORTI, 1997), derivano direttamente dalle reazioni biologiche di mineralizzazione del guano che avvengono all'interno degli accumuli dello stesso, quasi senza alcun contributo da parte dell'ambiente della grotta in cui si trovano (Fig. 77). È quindi quasi certo che, in realtà, molti altri fosfati esistano nelle grotte in gesso abitate da colonie di pipistrelli e attendano solo di essere scoperti.

I silicati

Gli unici tre silicati attualmente conosciuti sono: il calcedonio, l'opale e il quarzo.

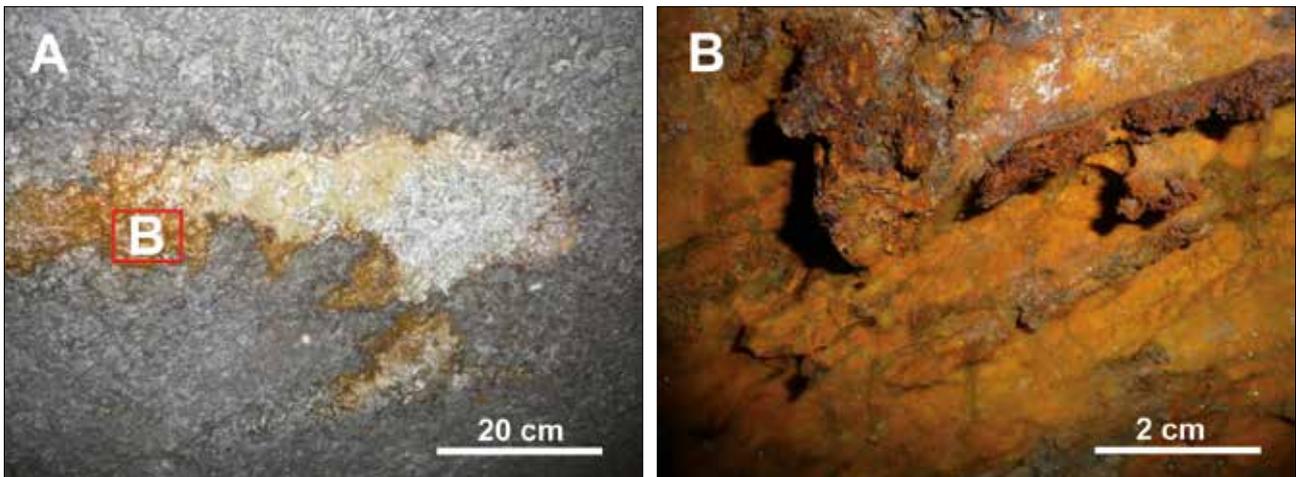


Fig. 75 – Grotta di Kungur, Russia: A) parete della sala “Dirty Grotto” dove si stanno formando depositi di jarosite e idrogoetite sotto forma di depositi plastici; B) particolare delle masserelle di jarosite e idro-geoetite fortemente idrate (Foto: Viacheslav Andreychouk) (da ANDREYCHOUK *et al.*, 2013, modificata).

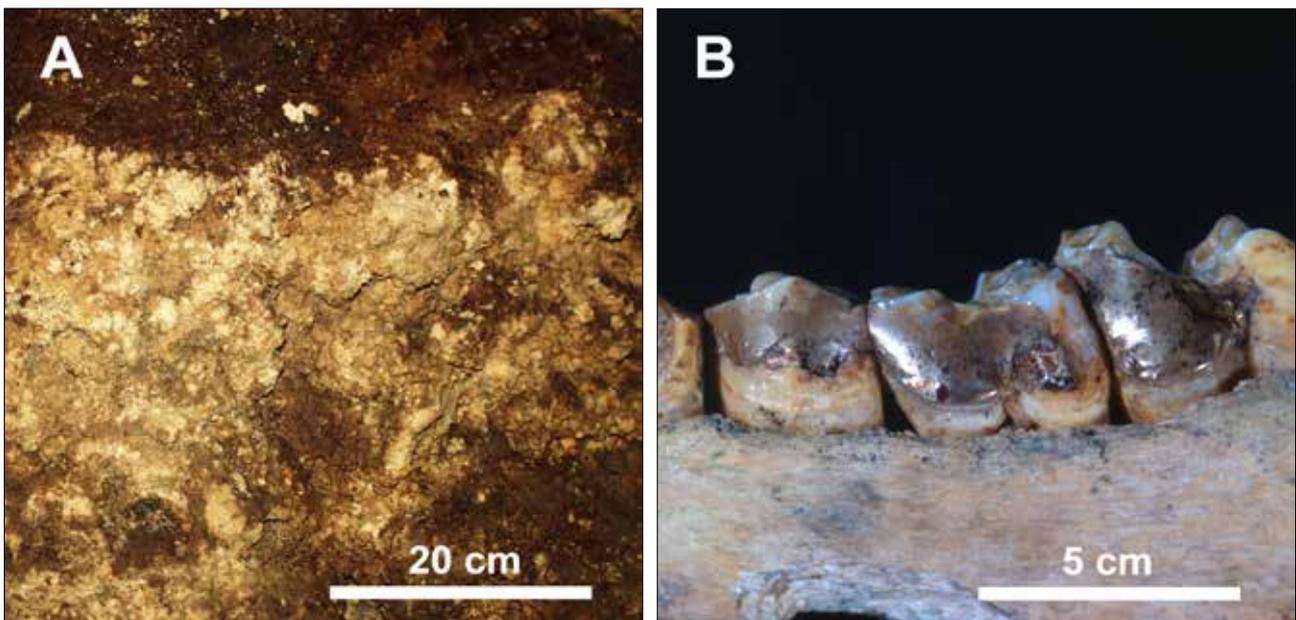


Fig. 76 – A) Grotta del Prete Santo nei Gessi Bolognesi: ammasso terroso pulverulento di brushite all'interno di un antico ammasso di guano di pipistrello (Foto: Paolo Forti); B) Grotta della Milocchite, Gessi di Santa Ninfa: mandibola di erbivoro parzialmente ricoperta da crosticine di fluorapatite e idrossiapatite (Foto: Paolo Forti).

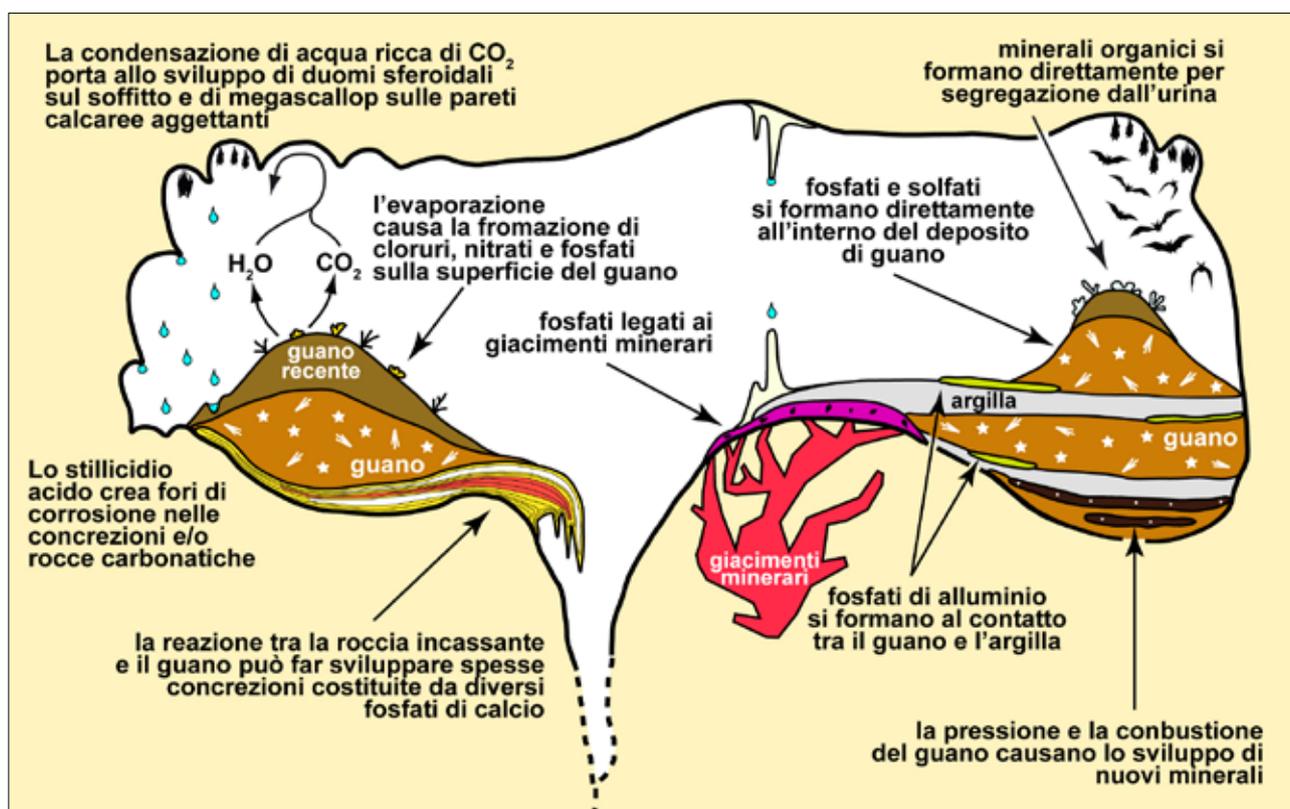


Fig. 77 – Insieme dei meccanismi minerogenetici legati alla presenza di guano: esclusivamente quelli che sono legati alla CO_2 sono limitati all'ambiente carbonatico, mentre tutti gli altri possono svilupparsi in ogni tipo di cavità e quindi anche in quelle gessose (da FORTI & ONAC, 2016, modificata).

Il calcedonio (un particolare tipo di quarzo microcristallino), assieme alla calcite, ha formato il guscio esterno degli aggregati di howlite che si trovano esclusivamente nella Grotta Ordinskaya, a Kungur, in Russia: nell'unico lavoro che li cita (POTAPOV & PARSHINA, 2010) non è fornito alcun meccanismo genetico che ne spieghi lo sviluppo. L'opale è presente come piccole crosticine botroidali disperse all'interno degli ossidi-idrossidi di Fe/Mn (Fig. 62A) che hanno dato luogo a stalattiti e stalagmiti poliminerali nella Grotta Pelagalli al Farneto (Gessi Bolognesi) (FORTI & ROSSI, 1989): la sua genesi è stata indotta dall'abbassamento del pH durante le complesse reazioni biologiche che hanno causato l'alternanza di livelli di minerali di ferro e manganese a livelli di gesso o di calcite. Sempre l'opale è stato segnalato anche come costituente di crosticine poliminerali all'interno della Grotta di Santa Ninfa, in Sicilia (Fig. 67A) (FORTI, 1989), e di Grave Grubbo, in Calabria (CARROZZINI *et al.*, 1996; FORTI & LOMBARDO, 1998).

Il ritrovamento, forse più curioso, di silice amorfa è però avvenuto all'interno della Grotta Calindri nei Gessi Bolognesi (FORTI & ROSSI, 2003). Questa cavità è nota soprattutto per le frequentazioni umane durante la preistoria che hanno lasciato al suo interno

molte tracce, tra cui spiccano i segni delle torce, che venivano comunemente appoggiate ai massi di gesso (Fig. 78).

Nella stessa sala sono presenti anche dei focolari (BARDELLA & BUSI, 1979), il cui fondo ovviamente è stato completamente alterato in maniera ancora più intensa. In particolare, alla base di uno di essi è presente una porzione di gesso molto alterato (Fig. 79A) che, pur conservando quasi intatta la struttura cristallina originale, presenta una lucentezza opalescente vitrea e, soprattutto, una durezza assolutamente inaspettata: non solo non è possibile scalfirlo con l'unghia ma addirittura una punta d'acciaio lo fa con molta difficoltà. Si è appurato sperimentalmente che è possibile incidere un vetro con un suo frammento.

Una sua sezione verticale (Fig. 79B) ha permesso di evidenziare come l'alterazione abbia interessato la roccia gessosa per circa 15-20 mm di spessore e che la colorazione bianco latte parta immediatamente sopra il gesso non alterato ma, a circa 1 mm dalla superficie esterna, si interrompa bruscamente e l'ultimo millimetro circa di roccia sia costituito da un sottile strato compatto di gesso macrocristallino, quasi perfettamente trasparente.

L'analisi ai raggi x ha poi rivelato che, in tutto il cam-



Fig. 78 – Grotta Serafino Calindri (Gessi Bolognesi): A) massa di gesso del salone archeologico su cui sono evidenti i segni neri del fumo delle torce e, subito sotto, le chiazze chiare dovute alla disidratazione del gesso ad opera del fuoco (Foto: Paolo Forti)

pione, la sola fase cristallina presente è quella del gesso, mentre al microscopio elettronico è stato possibile evidenziare come l'intervallo bianco latte sia costituito da gesso pseudomorfo su anidrite, mentre la parte più esterna e trasparente è costituita da gesso macrocristallino. Quest'ultimo ha inglobato piccole lamelle con superficie botroidale e fratture da disidratazione,

chiaramente riferibili a silice amorfa (opale).

L'evoluzione di questo gesso, dalle caratteristiche morfologiche e fisiche del tutto particolari, è iniziata dall'azione termica esercitata dal fuoco, rimasto acceso a diretto contatto con il gesso per un tempo abbastanza lungo, e probabilmente in più occasioni. Questo ha causato la "cottura" del gesso che ha così subito una disidratazione totale, per uno spessore di almeno 2 cm, con conseguente formazione di una polvere incoerente di cristallini di anidrite.

Una volta abbandonato il focolare, la condensazione ha avviato un lento processo di ri-idratazione dell'anidrite che, progressivamente, si è trasformata in gesso, mantenendo però quasi inalterata la sua struttura, formando quello che si definisce un "gesso pseudomorfo su anidrite".

Nello stesso tempo lo scarso stillicidio presente ha avuto modo di modellare la superficie esterna, asportandone i granelli di anidrite ancora non cementati per cui le superfici originali dei cristalli di gesso hanno assunto un aspetto lievemente concavo-convesso.

Sopra il gesso cotto, però, vi erano anche residui di cenere e frustoli di carbone che, in contatto con l'acqua di condensa e/o di stillicidio, hanno ovviamente dato luogo a soluzioni leggermente basiche: queste ultime hanno portato in soluzione una certa quantità di silice dai sedimenti argillosi ubiquitari in quell'area di grotta. Fintantochè le soluzioni si sono mantenute basiche, la presenza di silice in soluzione non ha causato alcun problema al processo di idratazione dell'anidrite, ma

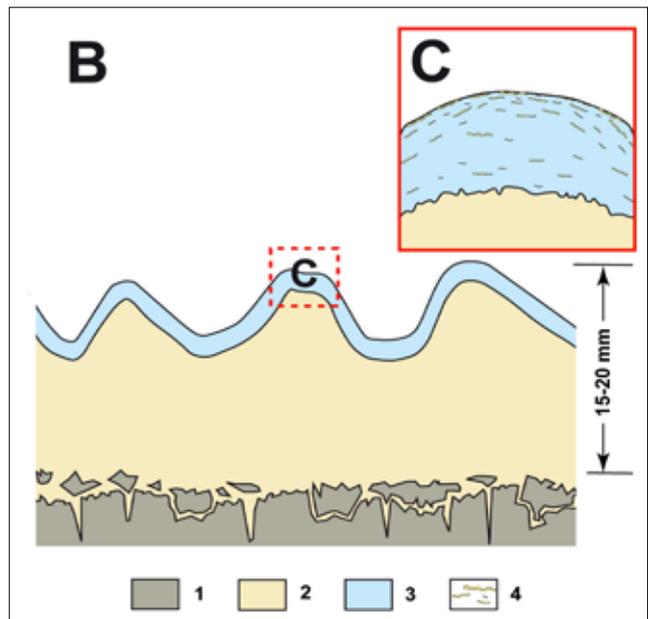
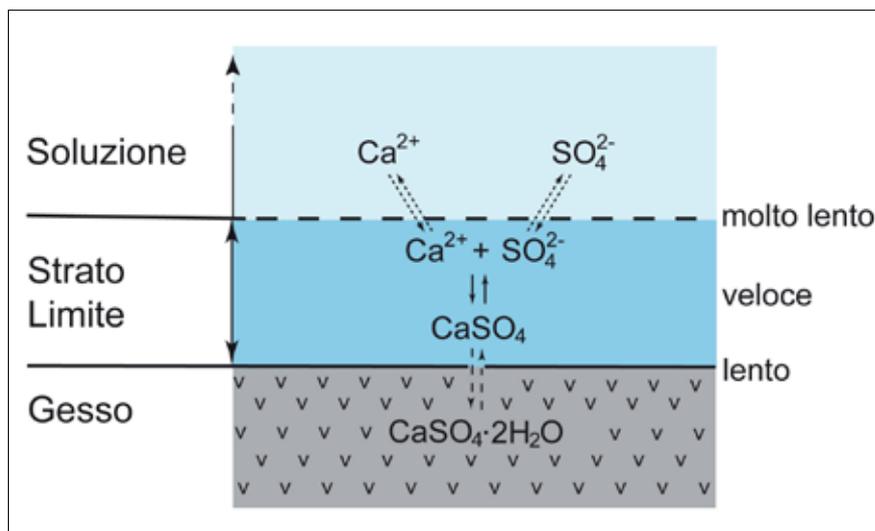


Fig. 79 – Grotta Serafino Calindri (Gessi Bolognesi): particolare del gesso opalescente al fondo del focolare (Foto Paolo Forti); B) sezione schematica del gesso opalescente per evidenziarne la porzione inalterata (1) su cui si trova uno strato di 1,5-2 cm di gesso pseudomorfo su anidrite (2) alla cui sommità si è sviluppato un livello di 0,5-1 mm di gesso macrocristallino ialino (3) in cui sono presenti, soprattutto verso la sommità, sottili lamelle di silice amorfa (4), queste ultime responsabili dell'anomala durezza evidenziata da questo gesso.

Fig. 80 – Stadi della dissoluzione del gesso: dapprima si ha il passaggio di molecole non ionizzate allo strato limite, ove avviene la scissione in ioni, che poi migrano per diffusione verso il centro della soluzione. Lo stadio molto lento, che quindi controlla la cinetica della reazione, è l'ultimo. Pertanto in assenza di moto turbolento che rimescoli lo strato limite al resto della soluzione la dissoluzione del gesso è praticamente inibita.



quando tutta la cenere è stata dilavata, e quindi il pH della soluzione è ritornato neutro e la silice in eccesso ha iniziato a precipitare, formando sottili crosticine che venivano progressivamente inglobate nel gesso di neoformazione.

Per spiegare però come mai si sia avuta una concentrazione progressivamente maggiore di silice a partire dallo strato di gesso macrocristallino che ricopre, per meno di un millimetro di spessore, quello ri-idratato (Fig. 79C), è necessario considerare i fenomeni che governano la solubilizzazione e/o deposizione del solfato di calcio biidrato.

Infatti, la cinetica di solubilizzazione/deposizione del gesso è regolata da tre stadi successivi (Fig. 80), di cui il passaggio più lento è quello che da luogo alla diffusione tra lo strato limite e la soluzione: è infatti questo passaggio il fattore critico che permette, o impedisce anche totalmente, gli scambi tra il solido e il liquido.

In pratica, se non siamo in presenza di moti turbolenti (e non è il caso della Calindri), la diffusione dallo strato limite alla soluzione diviene quasi nulla.

Questo spiega come mai, in oltre 2000 anni, al di sopra del gesso pseudomorfo su anidride, si sia depositato solo una pellicola di meno di un millimetro di gesso macrocristallino, nonostante l'evaporazione sia sicuramente attiva per buona parte dell'anno.

Un fattore poi che favorisce il rimescolamento e quindi, in ultima analisi, velocizza la cinetica globale è la scabrosità del substrato: ma lo sviluppo dello strato di gesso macrocristallino ha causato un effetto opposto, facendo passare da una superficie molto scabrosa, come quella ereditata dall'anidrite, ad una sempre più levigata. Questo fatto ha progressivamente diminuito il gesso che ha potuto depositarsi e accrescere lo strato macrocristallino.

Al contrario, la cinetica della precipitazione della silice amorfa è del tutto svincolata dal passaggio tra la

soluzione e lo strato limite: questo spiega perché, pur rimanendo praticamente costante nel tempo la sua concentrazione nella soluzione, e quindi la sua velocità di deposizione, in realtà la densità delle lamelle di silice sia andata progressivamente aumentando, all'interno dello strato di gesso macrocristallino, fino a causare gli anomali fenomeni di durezza riscontrati. In conclusione questo gesso opalescente e di notevole durezza deve essere considerato uno speleotema di origine antropogenica, perché in assenza dei fuochi accesi dall'uomo preistorico non avrebbe avuto alcuna possibilità di svilupparsi.

Sia per il calcedonio che per l'opale la silice è sempre fornita dalle reazioni di alterazione dei minerali argillosi presenti negli spessi interstrati che si alternano alla roccia gessosa, in tutti e tre i casi citati.

Infine, cristalli euedrali millimetrici di quarzo, spesso aggregati in strutture scheletriche (Fig. 81A, B), sono stati scoperti all'interno della Grotta Carlo Azzali nella Vena del Gesso romagnola, a ricoprire parzialmente dei grandi cristalli di gesso, solo in parte ridisciolti (FORTI, 1993).

Lo sviluppo di questo quarzo euedrale è avvenuto necessariamente a temperature inferiori ai 40-50°C, in quanto il cristallo di gesso non è stato minimamente trasformato in anidrite, che, a quelle temperature, è la fase più stabile del solfato di calcio in contatto con l'acqua.

La SiO_2 deriva probabilmente dall'alterazione di una formazione ricca di componenti silicatici, che un tempo esisteva al di sopra dei gessi, mentre la deposizione del quarzo, invece che il più comune opale, è stata spiegata (FORTI, 1994) come conseguenza della riduzione anaerobica, in ambiente totalmente sommerso, dei solfati in soluzione, ad opera di acque di percolazione lenta, ricche in materiale organico (Fig. 81C).

L'ossidazione della materia organica, a spese degli ioni

solfati che si riducono, produce una grande quantità di anidride carbonica che abbassa il pH, costringendo quindi la silice a precipitare in forma di cristalli di quarzo euedrali. Nel contempo, la riduzione dei solfati a solfuri contribuisce anch'essa ad abbassare il pH, ma soprattutto causa una sottosaturazione rispetto al gesso che quindi è costretto a sciogliersi parzialmente (FORTI, 1994).

Lo zolfo

Lo zolfo è il solo elemento nativo presente come minerale secondario nelle grotte in gesso: in tutte le cavità naturali in cui è stato osservato, deriva sempre dall'ossidazione dell' H_2S disciolto nelle acque che affiorano all'interno delle grotte dove avviene la sua ossidazione ad opera di microorganismi specifici (MESSINA *et al.*,

2015) (Fig. 82A).

In generale, però, l'ossidazione porta alla trasformazione dello ione solfuro in ione solfato: questo processo è dominante nelle grotte in calcare, dato che il conseguente aumento di acidità viene neutralizzato dalla reazione tra l'acido solforico e la roccia carbonatica, con produzione di gesso.

Nelle grotte in calcare, infatti, lo zolfo si forma molto raramente ed esclusivamente quando la concentrazione di H_2S è molto elevata e pertanto la sua rapida ossidazione causa un forte abbassamento del pH che inibisce l'attività dei batteri in grado di ossidare direttamente lo ione solfuro a solfato, mentre diventano attivi quelli che lo trasformano in zolfo elementare (FORTI, 1985).

Per questo motivo, di solito, le concrezioni di zolfo

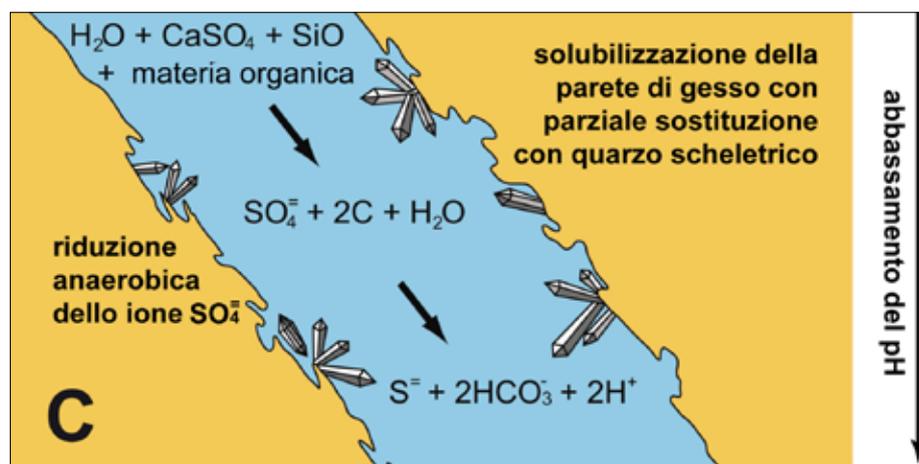
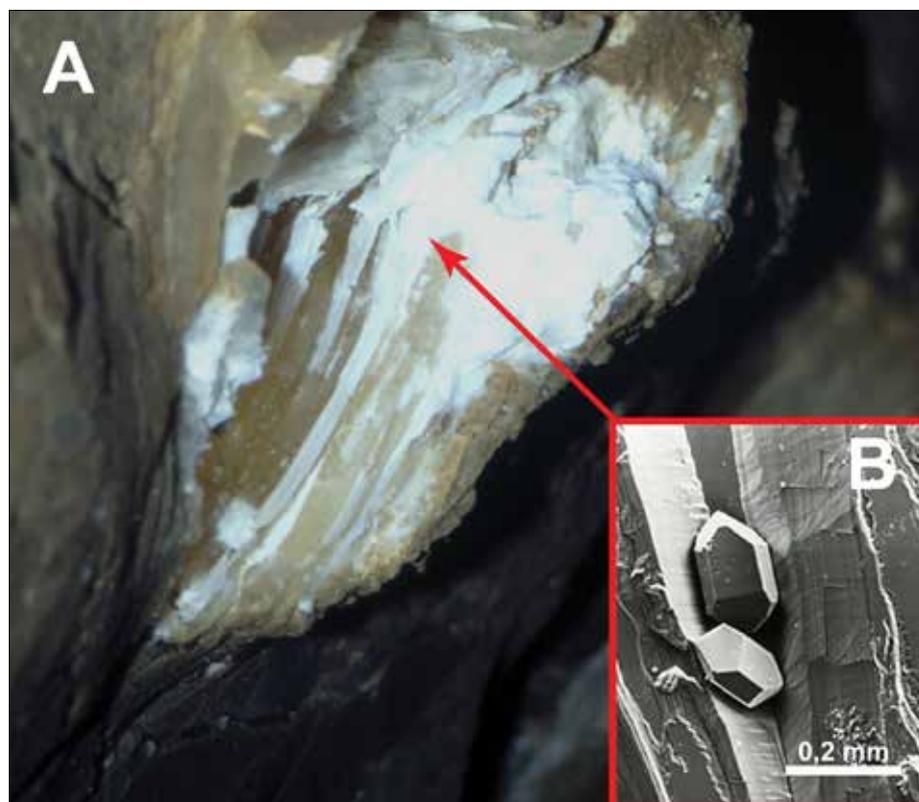


Fig. 81 – A) Grotta Carlo Azzali (Vena del Gesso romagnola): grande cristallo di gesso parzialmente ridissolto con contemporanea deposizione di aggregati di quarzo euedrale (Foto: Paolo Forti); B) immagine al microscopio elettronico di una coppia di cristalli di quarzo che sono cresciuti sopra il cristallo di gesso che risulta in parte ridissolto (Foto: Paolo Ferrieri); C) meccanismo genetico che ha permesso la formazione dei cristalli di quarzo sopra i cristalli di gesso in dissoluzione (da FORTI, 1996, modificata).

sono state osservate in grotte termali con acque molto ricche di acido solfidrico (FORTI, 1985).

La situazione è ovviamente differente se si prendono in considerazione le grotte in gesso dove la neutralizzazione dell'eccesso di acidità non è possibile. In queste condizioni infatti anche una relativamente bassa concentrazione di acido solfidrico è sufficiente per inibire la formazione diretta di acido solforico e, pertanto, lo sviluppo di zolfo elementare è assai più facile.

Questo spiega come mai lo zolfo sia stato rinvenuto in grotte gessose in cui non vi è assolutamente traccia di acqua solfurea: nelle grotte in gesso, infatti la produzione di acido solfidrico può avvenire facilmente, quando si realizzino condizioni anossiche in soluzioni sature di gesso e ricche di materiale organico, che si ossida a spese dello ione solfato che passa a ione solfuro.

La prima cavità in gesso in cui è stato osservato è la Grotta di Santa Ninfa (FORTI, 1989) dove lo zolfo colloidale forma pellicole opalescenti, del tutto simili a quelle dell'Inghiottitoio di Monte Conca (Fig. 82B, C), sul rivolo che si forma a valle di una sorgente solfurea e quindi in sottili crosticine poliminerali di colore giallo arancio lungo l'interstrato marnoso-argilloso da cui scaturisce l'acqua solfurea (Fig. 67A). Concrezioni del tutto analoghe sono state rinvenute anche all'interno di Grave Grubbo, in Calabria (CARROZZINI *et al.*, 1996): in questi speleotemi lo zolfo è disperso all'interno di depositi poliminerali, con opale e ossidi-idrossidi di alluminio e ferro.

Più recentemente, lo zolfo è stato scoperto anche all'interno della Grotta della Casupola, dove è presente non solo come polvere direttamente sulla roccia gessosa

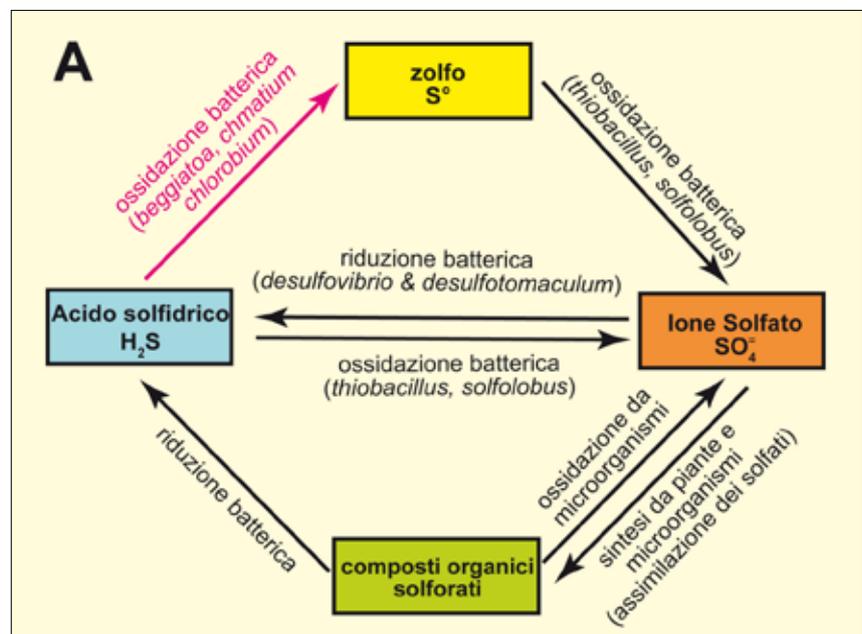
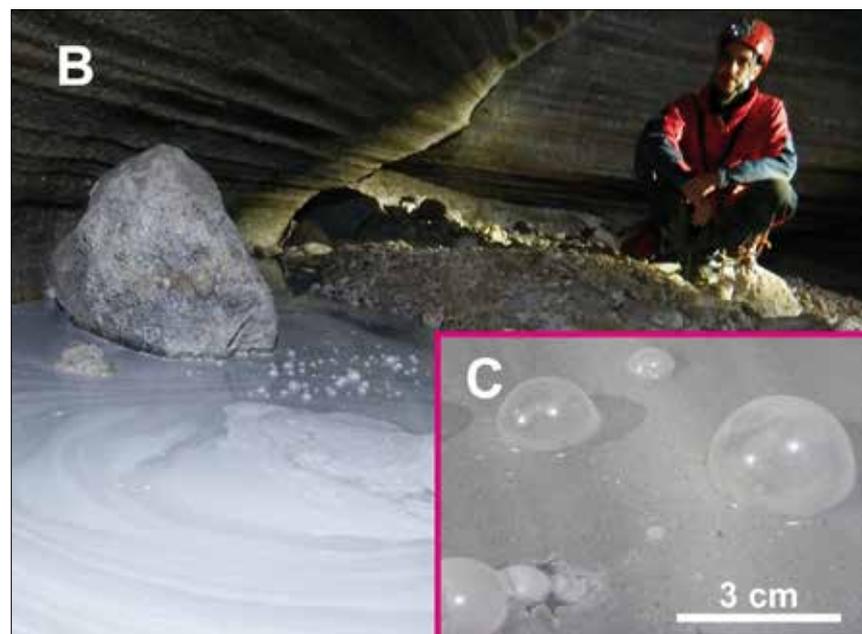


Fig. 82 - A) in natura il ciclo dello zolfo è basato su reazioni di ossidoriduzione controllata da microrganismi specifici: in rosso la reazione di ossidazione che permette la formazione di zolfo elementare in grotta; B) Inghiottitoio di Monte Conca (Sicilia): il fiume sotterraneo subito a valle della scaturigine di acqua solfurea, la cui ossidazione porta allo sviluppo di zolfo colloidale, che si deposita a livello delle sottili pellicole di materiale organico che galleggiano sulla superficie dell'acqua. L'insieme della biomassa e dello zolfo da luogo a bolle stazionarie anche di grandi dimensioni (Foto Marco Vattano); C) particolare di alcune delle bolle di B per evidenziare (in basso a sinistra) la presenza di crosticine di zolfo colloidale all'interno di una bolla collassata (Foto: Marco Vattano).



(Fig. 83B), ma anche come cristalli euedrali submillimetrici, cresciuti su coralloidi e stalattiti di gesso.

A differenza delle altre cavità, nel caso della Grotta della Casupola, la formazione dello zolfo cristallino non è avvenuta all'interno dell'acqua solfurea, ma direttamente sulla roccia gessosa e sulle concrezioni. In pratica, l' H_2S , essendo un composto volatile, è passato dall'acqua all'atmosfera per condensare poi sulle superfici di gesso. In questo modo, vista l'impossibilità di diluizione dell' H_2SO_4 , il pH è sceso rapidamente a valori tali da causare la deposizione del solo zolfo elementare che, data la lentezza del fenomeno, ha formato cristalli sub-euedrali (Fig. 84).

I borati

Infine, i minerali di boro sono molto rari in natura, ma ben 4 di quelli oggi noti (la howlite, la inderite, la inyoite e la ulexite) sono stati rinvenuti tutti in grotte gessose e al momento sono esclusivi di queste cavità. Ben 3 di questi (howlite, ulexite e inyoite) sono stati osservati in due grotte dell'area di Kungur, in Russia, mentre l'ultimo (la inderite) è stato scoperto solo molto di recente (KADEBSKAYA & GOLOVACHEV, 2017) nella grotta Ice Fern, in Kazakhstan.

Il primo borato ad essere scoperto è stata la howlite, che è presente nella grotta Ordinskaya, pochi chilometri a sud di Kungur: il suo ritrovamento è avvenuto ad opera dei subacquei che stavano esplorando la parte sommersa di questo imponente sistema carsico (POTAPOV & PARSHINA, 2010).

La howlite forma aggregati botroidali da 2 a 15 centimetri di diametro (Fig. 85A,B), attaccati alla volta della grotta da un sottile peduncolo di gesso residuale. Il nucleo centrale dell'aggregato consiste di howlite estremamente pura, mentre la crosta esterna, di circa 5 mm di spessore, è costituita da una miscela di calcite e di calcedonio, quest'ultimo in concentrazione molto bassa. La crosta ricopre la totalità della howlite, con eccezione del peduncolo di gesso residuale. Piccole masse di howlite hanno iniziato a svilupparsi per segregazione durante la cristallizzazione frazionata del gesso, durante i lunghi e lenti processi di idratazione dell'anidrite, causati dalla progressiva lenta infiltrazione delle acque meteoriche, che ha portato alla completa gessificazione di tutta la formazione di Kungur. Successivamente, l'evoluzione carsica nel gesso ha esposto le masse di howlite, causandone una ricristallizzazione che ha portato anche allo sviluppo della crosta superficiale di calcite e calcedonio (POTAPOV & PARSHINA, 2010). Proprio per merito della crosta esterna meno solubile, la howlite non è stata poi completamente solubilizzata, quando la grotta è stata sommersa dalle acque di un lago artificiale, costruito nelle sue vicinanze.

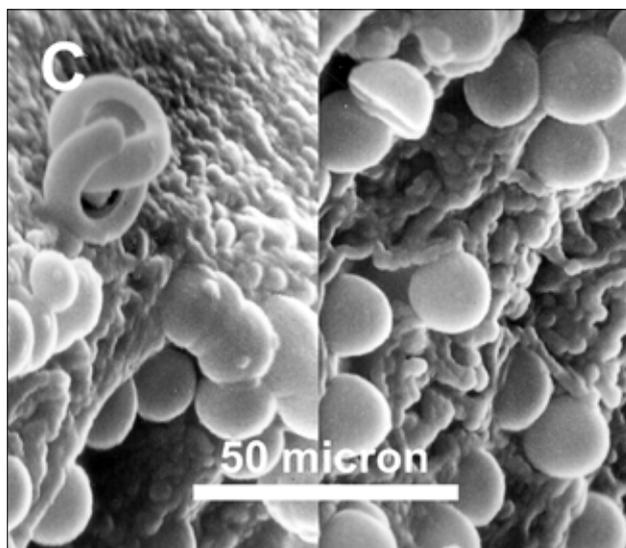


Fig. 83 – Ramo solfureo della Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): A) le pellicole bianche formate essenzialmente da zolfo flottante, che si formano sulla superficie dell'acqua solfurea (Foto: Mauro Chiesi); B) Grotta della Casupola (Gessi Bolognesi): polveri gialle formate da zolfo che si sviluppano sulla parete di gesso del meandro dello zolfo (Foto: Massimo Dondi); C) immagini al microscopio elettronico dei microorganismi che hanno reso possibile lo sviluppo dello zolfo per ossidazione dell'acido solfidrico (Foto: Paolo Ferrieri).

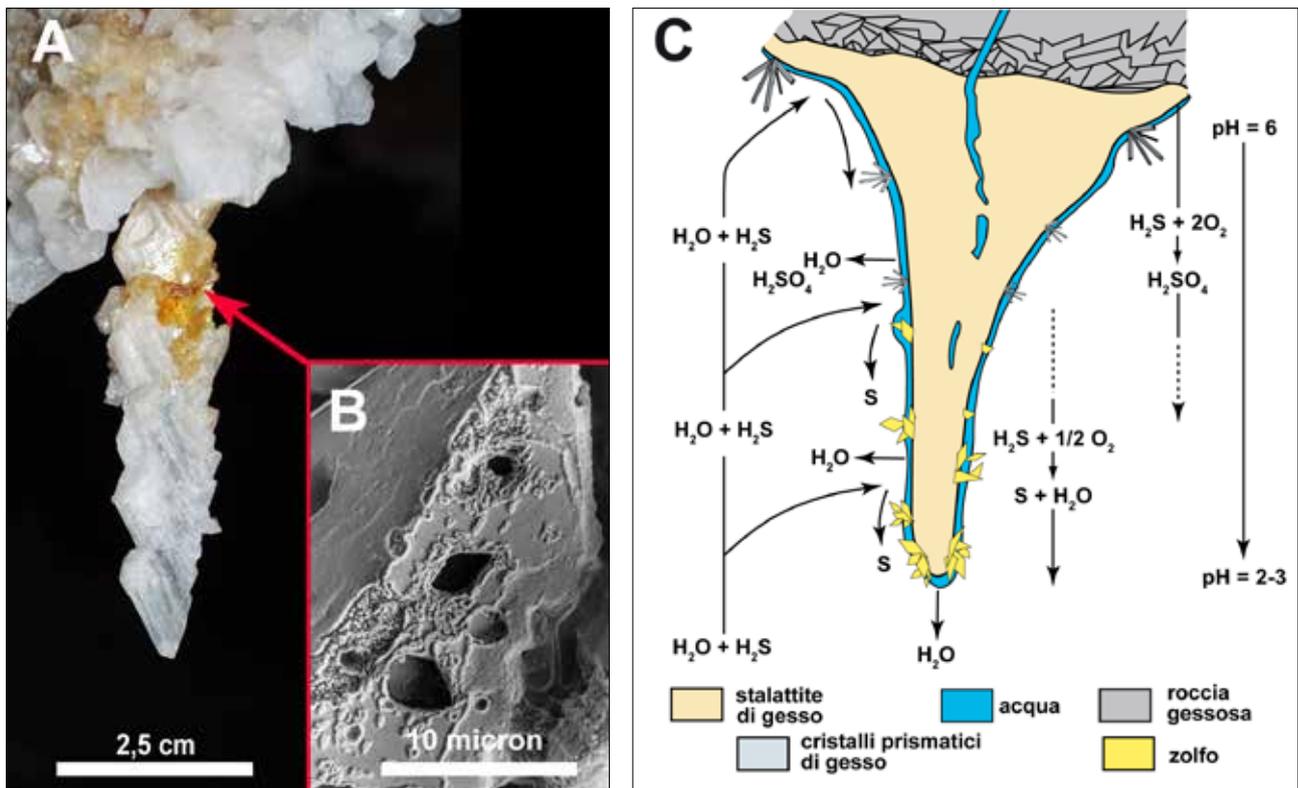


Fig. 84 – A) stalattite di gesso macrocristallino su cui si è depositata una crosticina di zolfo microcristallino (Foto: Paolo Forti); B) immagine al microscopio elettronico di un cristallo di zolfo sulla cui superficie sono presenti colonie di batteri solfoossidanti (Foto: Paolo Ferrieri); C) meccanismo genetico per lo sviluppo di zolfo cristallino sopra stalattiti di gesso (da FORTI, 2017, modificata).

La inyoite e la ulexite (Fig. 85C, D) sono state invece trovate, all'interno della Grotta di Kungur, nel salone "Brave Grotto" (ANDREYCHOUK *et al.*, 2013), dove hanno formato piccoli aggregati sferoidali di color bianco candido, in cui i due minerali sono intimamente mescolati con concentrazioni che vanno dal 50% di sodio e 50% di calcio nella ulexite al 100 di calcio e 0% di sodio nella inyoite pura. Questi due borati sono infatti molto simili per formula chimica e struttura cristallina, tanto che sono in grado di dare luogo a soluzioni solide, con concentrazioni molto variabili di calcio e magnesio tra loro.

I minuscoli aggregati di questi due minerali si sono sviluppati per evaporazione di acque che affiorano capillarmente sulla parete rocciosa in un'area della grotta che, in periodo estivo, ha temperature superiori allo zero e condizioni di ventilazione davvero modeste (ANDREYCHOUK *et al.*, 2013; TCHAIKOVSKIY *et al.*, 2015). Gli aggregati di ulexite e inyoite si sviluppano infatti per lenta evaporazione di soluzioni capillari originariamente presenti all'interno di sedimenti incoerenti, parzialmente argillosi, pertanto non possono essere considerati di origine criogenica. Comunque, i processi criogenici e quelli ciclici di assorbimento e rilascio ionico da parte delle argille sono determinanti

per arricchire la soluzione di boro e permettere quindi la formazione di questi due borati.

La inderite è stato l'ultimo borato, in ordine di tempo, ad essere scoperto: è stato rinvenuto in Kazachstan all'interno di una grotta che si apre in un diapiro gessoso sulle sponde del lago Inder, nella provincia di Atyrau (KADEBSKAYA & GOLOVACHEV, 2017).

La caratteristica principale di questa grotta è quella di ospitare al suo interno il ghiacciaio ipogeo più meridionale di tutta l'area. Grazie al suo microclima, al suo interno si sono sviluppati molti minerali criogenici (tra cui una grande abbondanza di "polveri di gesso"). La inderite, comunque, non è stata trovata nelle polveri, ma forma aggregati di microcristalli tabulari sulla superficie interna ed esterna di una concrezione di calcite, parzialmente corrosa, che si era sviluppata su una parete della zona centrale della cavità, relativamente termostabile. Nella stessa cavità è stata osservata anche la presenza di ulexite, con caratteristiche del tutto analoghe a quelle evidenziate nelle grotte dell'area di Kungur.

Sulla base di queste evidenze, è logico che il processo che ha permesso il suo sviluppo sia lo stesso che ha portato alla formazione dei borati della grotta di Kungur.

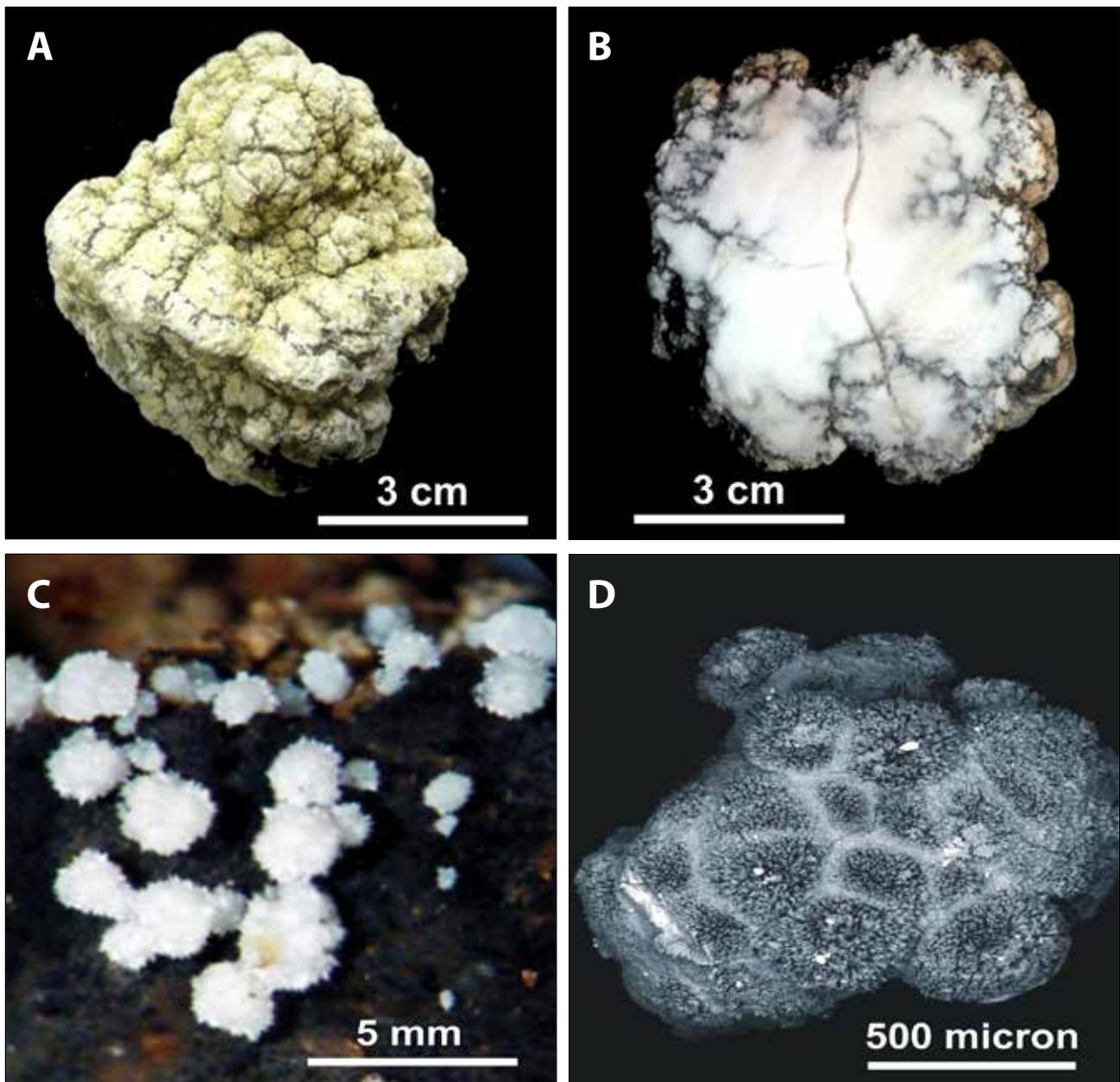


Fig. 85 – Grotta Ordinskaya, Russia: A) nodulo di howlite: la crosta esterna giallastra è costituita da calcite e calcedonio in intima commistione; B) sezione lucida del nodulo di A con evidenziate le impurezze dendritiche che sono essenzialmente costituite da argilla pelitica (da POTAPOV & PARSHINA, 2010, modificata); Grotta di Kungur: C) piccoli aggregati sferoidali di ulexite sulla parete della sala chiamata “Brave Grotto”; D) immagine al microscopio elettronico di un aggregato di ulexite che ne evidenzia la sua caratteristica botroidale (Foto: Olga Kadebskaya & Elena Chirkova).

Conclusioni

Anche se non completamente esaustiva, questa breve carrellata sulle conoscenze attuali dei depositi chimici che si sviluppano nelle grotte in anidrite e gesso ha permesso di evidenziare come essi siano molto più vari di quanto ritenuto in un passato, anche non troppo lontano. Inoltre è stato dimostrato come i processi che presiedono al loro sviluppo sono quasi sempre diversi da quelli attivi nelle grotte in altri litotipi: questo ha fatto sì che l'ambiente carsico dei gessi e delle anidriti ospiti sia concrezioni che mineralizzazioni asso-

lutamente uniche e confinate in questo tipo di cavità naturali.

Seppure lo studio del concrezionamento in queste grotte abbia subito un'indubbia accelerazione negli ultimi 20-30 anni, è comunque evidente che ben pochi ricercatori si sono cimentati in questo tipo di studi e, soprattutto, esistono ancora molte aree carsiche gessose che non sono state ancora minimamente considerate da questo punto di vista.

Un altro problema rende molto complesso e, in alcuni casi, può addirittura impedire di avere un quadro

generale e aggiornato sugli studi effettuati sui depositi chimici delle grotte in gesso. Infatti, molti di questi lavori, ancora oggi, sono pubblicati in riviste non indicizzate e scarsamente diffuse, per cui il loro reperimento è oggettivamente difficile. Questo è ancora più evidente per i lavori pubblicati, anche recentissimamente e quasi esclusivamente in cirillico, sia in Russia che in alcune delle altre nazioni dell'ex Unione Sovietica, dove invece la ricerca scientifica è estremamente avanzata e innovativa, come ampiamente dimostrato dalle numerose citazioni bibliografiche raccolte alla fine di questo lavoro. Fortunatamente, la disponibilità

dei ricercatori di quei Paesi è stata davvero totale e ha quindi permesso di ottenere tutte le informazioni e il materiale necessario per fornire un quadro, il più aggiornato possibile, sugli speleotemi delle grotte in gesso delle loro aree di competenza.

Attualmente si può ragionevolmente affermare che la distribuzione delle aree carsiche gessose, che sono state almeno parzialmente studiate, copre la maggioranza delle aree climatiche mondiali e pertanto gli speleotemi che si possono sviluppare all'interno delle loro grotte sono abbastanza ben conosciuti.

Bisogna però, per onestà, ammettere che affioramen-

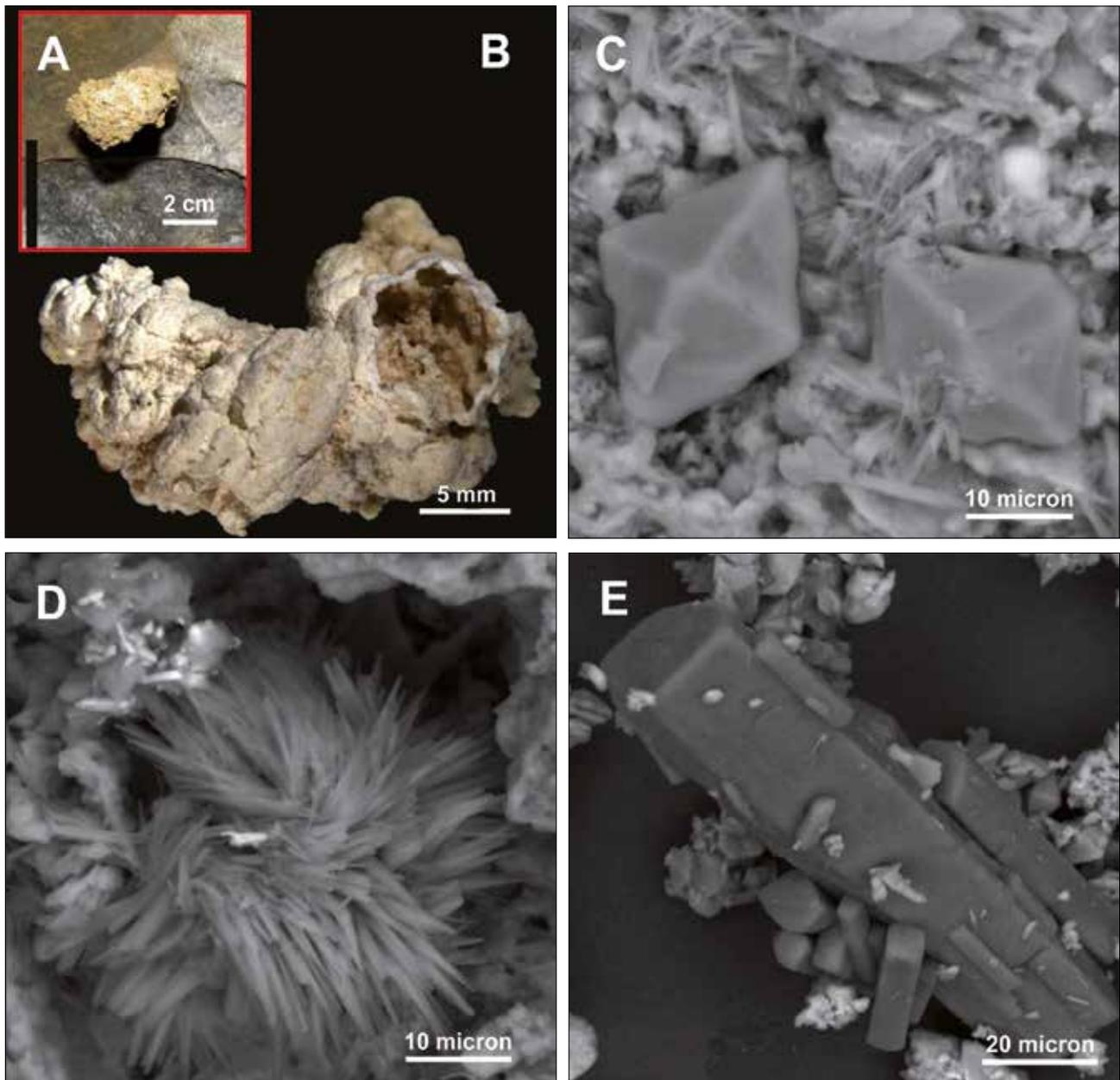


Fig. 86 – Ice Fern Cave (Kazakhstan): A-B) concrezione di calcite residuale, cava all'interno, messa in rilievo dalla solubilizzazione per condensazione, che ha modellato a grandi concavità la parete di gesso. Le analisi dei depositi minerali, hanno evidenziato la presenza di minuti cristalli tenardite ($\text{Na}_2(\text{SO}_4)$) (C) e aggregati sferulitici di glauberite ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) (D) sulla superficie esterna e su quella interna della concrezione, mentre i cristalli prismatici di inderite ($\text{Mg}[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_5] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (E) si trovano solo su quella interna (Foto: Olga Kadebskaya e Elena Chirkova).

ti estremamente vasti di formazioni gessose (quali per esempio quelli della Siberia centrale e della Cina, tanto per citarne i più grandi) sono ancora del tutto inesplorati. Ma anche all'interno delle aree più conosciute e studiate (quali alcune aree italiane, spagnole e ucraine, e le grotte di Kungur e di Pinega in Russia) vi sono alcuni aspetti, tra cui quello dei depositi di ossidi-idrossidi metallici e dei minerali derivanti dalla digestione degli accumuli di guano, che necessitano sicuramente di più accurate e puntuali ricerche ed analisi.

La situazione è molto peggiore se si considerano invece le grotte in anidrite e in gesso-anidrite: infatti solo le Gessi-Anidriti dell'alta Val di Secchia, in Emi-

lia-Romagna, possono considerarsi ben studiate dal punto di vista dei depositi chimici ospitati, mentre le informazioni attualmente disponibili per le grotte in anidrite della Germania centrale sono ancora abbastanza limitate e praticamente quasi nulla si sa su tutte le altre aree carsiche in questo litotipo, sparse nel resto del pianeta.

È pertanto facilmente prevedibile che in un prossimo futuro, emozionanti scoperte saranno fatte dagli speleologi e dagli scienziati che decideranno di dedicarsi allo studio e alla ricerca nel campo, ancora così poco investigato, dei depositi chimici nelle grotte in gesso ed anidrite.

Bibliografia

- ALDROVANDI U., 1648 - *Museum metallicum*. Ferronius, Bologna:1-979.
- ANDREYCHOUK V.N., KLIMCHOUK A.B., 2010 - *Geomicrobiology and redox geochemistry of the Karstified Miocene gypsum aquifer, Western Ukraine: the study from Zoloushka cave*. Geomicrobiology Journal, **18(3)**: 275-295.
- ANDREYCHOUK V., GALUSKIN, 2001 - *Formazione di criominerali nella grotta di Kungur*. Peshchery, Perm, **27-20**, 108-116 (in russo).
- ANDREYCHOUK V.N., KADEBSKAYA O.I. & CHAYKOVSKI I.I. 2013 - *Cryogenic mineral formations of Kungur Ice Cave* University of Silesia – Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences. Sosnowiec-Perm: 128 p.
- ANDREYCHOUK V., KLIMCHOUK A., BOSTON P., GALUSKIN E. 2009 - *Unique iron-manganese colonies of microorganisms in Zoloushka Cave (Ukraine-Moldova)* Speleology and Karstology, Simferopol, **3**: 5-25. (in russo).
- ANONIMO, 1988 - *Die Barbarossahöhle im Kyffhausergebirge*. Verwaltung der Barbarossahöhle, Kyffhauser: 8 p.
- BADINO G., CALAFORRA J.M., DE WAELE J., FORTI P. 2017 - *A hypothesis on the evolution of complex flowstones*. Proceedings XVII International Speleological Congress, Sydney, 2018, **2**, 323-327.
- BADINO G., CALAFORRA J.M., FORTI P., GAROFALO P. & SANNA L., 2011 - *The present day genesis and evolution of cave minerals inside the Ojo de la Reina cave (Naica Mine, Mexico)*. International Journal of Speleology, **40(2)**: 125-131.
- BARDELLA G., BUSI C., 1978 - *Nuove scoperte nei Gessi Bolognesi effettuate dall'Unione Speleologica Bolognese*. Atti del Convegno "Salviamo i Gessi", Bologna: 45-51.
- BARTOLOMÉ M., SANCHO C., OSÁCAR M.C., MORENO A., LEUNDA M., SPÖTL C., LUETSCHER M., LÓPEZ-MARTÍNEZ J., BELMONTE A., 2015 - *Characteristics of cryogenic carbonates in a Pyrenean ice cave(northern Spain)*. Geogaceta, **58**: 107-110.
- BERTOLANI M., ROSSI A., 1972 - *La Grotta Michele Gortani (31E) a Gessi di Zola Predosa (Bologna)*. Rassegna Speleologica Italiana, Memoria, **10**: 206-246.
- BERTOLANI M., ROSSI A., 1986 - *La petrografia del Tanone Grande della Gacciolina (154 E/Re) nelle evaporiti triassiche dell'alta val di Secchia*. Le Grotte d'Italia, **4(12)**: 79-105.
- CALAFORRA J.M., 1996 - *Contribucion al conocimiento de la karstologia de yesos*. PhD Thesis, University of Granada: 350 p.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., 1993 - *Le palle di gesso e le stalagmiti cave: due nuove forme di concrezionamento gessoso scoperte nelle grotte di Sorbas (Andalusia, Spagna)*. XVI Congresso Nazionale di Speleologia, Udine 1990, **1**: 73-88.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., 1994 - *Two new types of gypsum speleothems from New Mexico: gypsum trays and gypsum dust*. National Speleological Society Bulletin, **56**: 32-37.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., 1999 - *May the speleothems developing in gypsum karst be considered paleoclimatic indicators?* INQUA, Durban, South Africa, Book of Abstracts: 35-36.
- CALAFORRA J.M., FORTI P. 2019 - *The climate driven peculiar speleothems of the Natuturingam Cave (Puerto Princesa Underground River, Palawan, Philippines): a review* Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, **48**: 3-22.
- CALAFORRA J.M., FORTI P. 2021 - *Un nuovo speleotema di gesso controllato dal particolare regime di alimentazione indotto dal clima arido: gli "abeti" di gesso di Sorbas (Spagna)*. Atti e Memorie Comm. Grotte E. Boegan, in stampa.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., PULIDO BOSCH A., 1992 - *Nota preliminar sobre la influencia en la evolucion espeleogenetica de los yesos con special referencia a los afloramientos karsticos de Sorbas (Espana) y de Emilia-Romagna (Italia)*. Espeleotemas, **2**: 9-18.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., FERNÁNDEZ-CORTÈS A., 2008 - *The speleothems in gypsum caves and their paleoclimatological significance*. Environmental Geology, **53(5)**: 1099-1105.
- CALAFORRA J.M., FORTI P., GAZQUEZ F., SAURO F., SANTAGATA T., VATTANO M. 2021 - *Giant gypsum crystal caves: different destinies due to their peculiar socio-economical situation*. Proc. International Speleological Congress, France, in stampa.
- CALANDRI G., RAMELLA L., 1987 - *Il sistema carsico di Darhedj (Algeria NE)*. Bollettino Gruppo Speleologico Imperiese CAI, **28**: 2-10.
- CARROZZINI B., DE PAOLA M., DI MUCCIO L.A., 1996 - *Primo contributo alla caratterizzazione mineralogica delle rocce affioranti in una cavità carsica dell'Alto Crotonese*. Mineralogica Petrografica Acta, **38**: 189-199.

- CASALI R., FORTI P., 1969 - *I cristalli di gesso del bolognese*. Speleologia Emiliana, s.2, **1(7)**: 25-48.
- CAZZOLI M., FORTI P., BETTAZZI L., 1988 - *L'accrescimento di alabastri calcarei in grotte gessose: nuovi dati dalla Grotta dell'Acquafredda (3/ER/Bo)*. Sottoterra, **80**: 16-23.
- CERVELLATI R., FORTI P. & RANUZZI F., 1975 - *Epсомite: un minerale nuovo per le grotte bolognesi*. Grotte d'Italia, **4(5)**: 81-88.
- CHIARINI V., DE WAELE J., ERCOLANI M., FORTI P., GARELLI L., GRILLANDI L., LUCCI P., LUGLI S., POLETTI K., RUOCCO M., SANSAVINI B., SFRISI E., S. ZAULI, 2019 - *Le grotte nei Gessi di Monte Mauro in COSTA M., LUCCI P., PIASTRA S. (Eds.) I Gessi di Monte Mauro - studio multidisciplinare di un'area carsica nella vena del gesso romagnola*. Memorie Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, **34**: 89-234.
- CHIESI M., FORTI P., 1985 - *Tre nuovi minerali per le grotte dell'Emilia-Romagna*. Bollettino di 1318 Mineralogia e Paleontologia, **45**: 14-18.
- CHIESI M., FORTI P., 1986 - *Speleothems and secondary mineralisation of the "Inghiottitoio dei Tramonti", the largest cave in the Triassic evaporites of the Emilia-Romagna Region*. Le Grotte d'Italia, **4(12)**: 185-192.
- CHIESI M., FORTI P., 1988 - *Fenomeni di concrezionamento e minerali secondari delle grotte del reggiano*. In: CHIESI M. (Ed.), *Guida alla speleologia nel Reggiano*. Tecnograf, Reggio Emilia: 65-71.
- CHIESI M., FORTI P., 1992 - *Le concrezioni e le mineralizzazioni della Grotta della Milocchite MG2 (Milena, Caltanissetta)*. Mondo Sottterraneo, **16(1-2)**: 19-28.
- CHIESI M., FORTI P., PANZICA LA MANNA M. & SCAGLIARINI E., 1992 - *Osservazioni preliminari sui fenomeni carsici nei gessi di Punta Alegre (Cuba)*. Speleologia, **27**: 68-73.
- CIGNA A.A., FORTI P. 2021 - *Le stalagmiti di ghiaccio a "canna di bambù" della Spipola: un esempio della fondamentale importanza del microclima locale sullo sviluppo di questi speleotemi*. Sottoterra, in stampa.
- COLUMBU A., CHIARINI V., DE WAELE J., DRYSDALE R., WOODHEAD J., HELLSTROM J. FORTI P., 2018 - *Age and speleogenesis of gypsum caves in Emilia-Romagna (N Italy)*. Proceedings XVII International Speleological Congress Sydney, second edition 2018, **2**: 260-264.
- COLUMBU A., DE WAELE J., FORTI P., MONTAGNA P., PICOTTI V., PONS-BRANCHU E., HELLSTROM J., BAJO P., DRYSDALE R., 2015 - *Gypsum caves as indicators of climate-driven river incision and 1331 aggradation in a rapidly uplifting region*. Geology, **43(6)**: 539-542.
- CUCCHI F., FORTI P., 1993 - *Dissoluzione sottocutanea nei gessi: analisi e considerazioni*. Atti del Congresso Nazionale di Speleologia, Udine 1990, **1**: 89-100.
- DALMONTE C., FORTI P., 1995 - *L'evoluzione delle concrezioni di carbonato di calcio all'interno delle grotte in gesso: dati sperimentali dal Parco dei Gessi Bolognesi*. Sottoterra, **102**: 32- 40.
- DALMONTE C., FORTI P., PIANCASTELLI S., 2003 - *The evolution of carbonate speleothems in gypsum caves as indicators of microclimatic variations: new data from the Parco dei Gessi caves (Bologna, Italy)*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, **2(16)**: 65-82.
- DE WAELE J., ERCOLANI M., FORTI P., GALLE E., SANSAVINI B., 2013b - *Gesso, calcite e fango: come ricostruire dalle forme di dissoluzione e sedimentazione un'evoluzione particolarmente complessa nel sistema carsico del Re Tiberio* Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, **26**: 169-188.
- DE WAELE J., FABBRI F., FORTI P., LUCCI P., MARABINI S., 2013a - *Evoluzione speleogenetica del complesso carsico di Monte Tondo (Vena del Gesso romagnola)*. in ERCOLANI M., LUCCI P., PIASTRA S., SANSAVINI B. (Eds.) *I gessi e la cava di Monte Tondo*. Memorie Istituto Italiano di Speleologia. S.2, **26**, 81-101.
- ERCOLANI M., POLETTI K., FORTI P., 2013 - *Genesis and evolution of calcite bubbles in gypsum caves*. In: BOSÁK P. & FILIPPI M. (Eds.), *Proceedings of the 16th International Congress of Speleology*, Brno 19-27 July 2013, **3**: 443-448.
- FEDOROF E.S., 1883 - *Kungurskije cave*. Materialy po geologii Rossii, **11**: 217-273 (in russo).
- FORD D., WILLIAMS P., 2007 - *Karst hydrogeology and Geomorphology*. Wiley: 562 pp.
- FORTI P., 1980 - *Formazione di aragonite nella grotta di Castellana: un esempio di modificazione indotta dalla turistizzazione*. Grotte d'Italia, s. 4, **8**: 1-10.
- FORTI P., 1985 - *Le mineralizzazioni della grotta di Cala Fetente (Salerno, Campania)*. Mondo Sottterraneo, **9 (1-2)**: 43-50.
- FORTI P., 1986 - *Speleothems and cave minerals of the gypsum karst of the Emilia Romagna Region, Italy*. Atti "International Symposium on Evaporite Karst", Bologna: 259-266.

- FORTI P., 1987 - *Nuove concrezioni di grotta: le eccentriche di gesso di Santa Ninfa (Trapani)*. Notiziario di Mineralogia e Paleontologia, **52**: 5-10.
- FORTI P., 1988 - *Due nuovi meccanismi di formazione per i cristalli di gesso, osservati nella Grotta di Santa Ninfa (Trapani)*. Notiziario di Mineralogia e Paleontologia, **55**: 5-12.
- FORTI P., 1989 - *Le concrezioni e le mineralizzazioni delle cavità carsiche di Santa Ninfa*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, **3**: 137-154.
- FORTI P., 1993 - *I quarzi dendritici sul gesso*. Ipogea 1988-1993: 16-17.
- FORTI P., 1994 - *The role of sulfate-sulfite reactions in gypsum speleogenesis*. Abstract of Papers "Breakthroughs in Karst Geomicrobiology and Redox Geochemistry", Colorado Springs: 21- 22.
- FORTI P., 1996 - *Speleothems and cave minerals in gypsum caves*. International Journal of Speleology, **25(3-4)**: 91-104.
- FORTI P., 2000 - *I depositi chimici presenti nella grotta Calindri*. Sottoterra **110**: 31-41.
- FORTI P., 2003 - *Un caso evidente di controllo climatico sugli speleotemi: il moonmilk del Salone Giordani e i "cave raft" del Salone del Fango nella grotta della Spipola (Gessi Bolognesi)*. Atti 19° Congresso Nazionale di Speleologia, Bologna: 115-126.
- FORTI P., 2017 *Chemical deposits in evaporite caves: an overview*. International Journal of Speleology **46(2)**: 109-135.
- FORTI P., 2017 - "Ricci di mare", "Meduse giganti" e "stelle di ghiaccio": strani incontri all'interno del Puerto Princessa Underground River a Palawan (Filippine). Sottoterra **144**: 82-92.
- FORTI P., 2020 - *I depositi chimici e fisici nelle grotte*. In GRIMANDI P., FORTI P., LUCCI P. (Eds.) *Guida ai fenomeni carsici del Parco Regionale dei Gessi Bolognesi*, Federazione Speleologica Regionale dell'Emilia-Romagna: 85-94.
- FORTI P., CHIESI M., 1995 - *A proposito di un particolare tipo di calcite flottante osservato nella Grotta Grave Grubbo - CB 258 (Verzino, Calabria)*. Atti e Memorie della Commissione Grotte Boegan, **32**: 43-53.
- FORTI P., DANIELE G., PIZZIOLLO M., BELVEDERI G., BIANCO D., COSTA M., ERCOLANI M., GUARNIERI C., MIARI M., PIASTRA S. 2018, - *Evaporite karst & caves of Emilia Romagna Region. Tentative List - supplementary description Regione Emilia Romagna*, Direzione Generale del Territorio e dell'ambiente: 28 pp.
- FORTI P., ERCOLANI M., LUCCI P. 2019, - *Un tipo di infiorescenza gessosa della Vena del Gesso di origine antropogenica ancora non descritto* in COSTA M., LUCCI P., PIASTRA S. (Eds.) *I Gessi di Monte Mauro - studio multidisciplinare di un'area carsica nella Vena del Gesso romagnola*. Memorie Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, **34**: 297-308.
- FORTI P., LOMBARDO N., 1998 - *I depositi chimici del sistema carsico Grave Grubbo-Risorgente del Valloone Cufalo (Verzino, Calabria)*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s. 2, **10**: 81- 92.
- FORTI P., LUCCI P., 2010 - *Le concrezioni e le mineralizzazioni del Sistema Carsico Rio Stella-Rio Basino (Vena del Gesso romagnola)* Memorie Istituto Italiano di Speleologia s.2, **23**: 151-168.
- FORTI P., LUCCI P. 2016 - *Come si sviluppano i cristalli prismatici di gesso sulle stalattiti?* in GARBERI M.L., LUCCI P., PIASTRA S. *Gessi e solfi della Romagna Orientale*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia s.2, **31**, 157-162.
- FORTI P., MARSIGLI, 1978 - *Sulla genesi delle infiorescenze gessose sopra le concrezioni alabastrine della Grotta Novella*. Preprint XIII Congresso Nazionale di Speleologia, Perugia: 1-4.
- FORTI P., ONAC B., 2016 - *Caves and Mineral deposits* Zeitschrift für Geomorphologie, **60**, Supplement. **X**: 55-101.
- FORTI P., PIANCASTELLI S., 1998 - *L'accrescimento di concrezioni carbonatiche in grotte in gesso: nuovi dati dalla Grotta Novella (Bologna, Italia)*. Sottoterra, **105**: 21-29.
- FORTI P., QUERZÈ S., 1978 - *I livelli neri delle concrezioni alabastrine della Grotta Novella*. Preprint XIII Congresso Nazionale di Speleologia, Perugia: 1-5.
- FORTI P., RABBI E., 1981 - *The role of CO₂ in gypsum speleogenesis: I° contribution*. International Journal of Speleology, **11**: 207-218.
- FORTI P., ROSSI A., 1987 - *Le concrezioni poliminerali della Grotta di S. Ninfa: un esempio evidente dell'influenza degli equilibri solfuri-solfati sulla minerogenesi carsica*. Atti e Memorie Commissione Grotte "E. Boegan", **26**: 47-64.
- FORTI P., ROSSI A., 1989 - *Genesi ed evoluzione delle concrezioni di ossidi di ferro della grotta Pelagalli al Farneto (Bologna- Italia)*. Atti XV Congresso Nazionale di Speleologia, Castellana: 205-228.
- FORTI P., ROSSI A., 2003 - *Il carsismo ipogeo nei gessi italiani* In MADONIA G., FORTI P. (Ed.) *Le aree car-*

- siche gessose d'Italia. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, s.2, **14**: 65-87.
- FORTI P., BARREDO S., COSTA G., OUTES V., RE G., 1993 - *Two peculiar karst forms of the gypsum outcrop between Zapala and Las Lajas (Neuquen, Argentina)*. Proceedings of the XI International Speleological Congress, Beijing: 54-56.
- FORTI P., DE MARIA D., ROSSI A., 2004 - *The last mineralogical finding in the caves of the "Gessi Bolognesi" natural Park: the secondary dolomite*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, **2(16)**: 87-94.
- FRANKE H.V., 1965 - *Theory behind stalagmite shapes*. Studies in Speleology **1(2/3)**: 89-95.
- GÁZQUEZ, F., BAUSKA, T.K., COMAS-BRU, L. GHASLEB B., CALAFORRA JM., HODELL D.A. 2020, - *The potential of gypsum speleothems for paleoclimatology: application to the Iberian Roman Human Period*. Sci. Rep. **10**, 14705.
- HARDIE L.A., 1967 - *The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure*. American Mineralogist, **52**: 171-200.
- HILL C.A., 1976 - *Cave Minerals*. National Speleological Society, Huntsville: 138 pp.
- HILL C.A., FORTI P., 1997 - *Cave minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, USA: 464 pp.
- KADEBSKAYA O. I., GOLOVACHEV I.V., 2017 - *Caratteristiche dei minerali di neroformazione nella zona microclimatica neutra della Ice Fern cave (Kazakhstan)*. Geologia, Geografia e Energia Globale, Università di Astrahan, **3(66)**: 198-208 (in russo).
- KEMPE S., 2014 - *How Deep is Hypogene? Gypsum Caves in the South Harz*. Karst Water Institute Special Publication, **18**: 48-57.
- KORSHUNOV V.V., SHAVRINA E.V., 1998 - *Gypsum speleothems of freezing origin*. Journal of Cave and Karst Studies, **60(3)**: 146-150.
- KOTULA P., ANDREYCHOUK V., PAWLYTA J., MARYNOWSKI, L., JENDRZEJEWSKA I., 2019 - *Genesis of iron and manganese sediments in Zoloushka Cave(Ukraine/Moldova) as revealed by $\delta^{13}C$ organic carbon*. International Journal of Speleology, **48(3)**: 221-235.
- KUPETZ M., KNOLLE F., 2015 - *Die Mansfelder Schlotten – Verbreitung und Genese der größten mitteleuropäischen Anhydrit-Schichtgrenzhöhlen*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (German J. Geol.), **166(4)**: 327-339.
- KUPETZ M., MUCKE D., 1989 - *Beitrage zur Geologie un Genese der Barbarossahöhle bei Rottleben am Kyffhauser un Mansfelder Mulde*. Wiss.-Techn. Inf. dienst. Aentr. Geol. Inst., 1424 Reihe A, **30(2)**: 96-103.
- LA PORTA A., 1992 - *Informazioni sulle maestose cavità naturali di Cozzo Disi, presso Casteltermini*, report privato, 15 p.
- LAGHI, T., 1806 - *Di un nuovo sale fossile scoperto nel bolognese*. Memorie Istituto Nazionale Italiano, **1(1)**: 19-26.
- LO CONTE M., ERCOLANI M., FORTI P. 2021 - *Curiosità mineralogiche: le monete di "lapis specularis" della Grotta del Re Tiberio*. Speleologia Emiliana, in stampa.
- MAKSIMOVICH G.A., 1969 - *Caves of gypsum karst*. Peshchery (Perm University), **7(8)**: 5-29 (in russo).
- MALAVOLTI F., 1949 - *Morfologia carsica del Trias gessoso-calcareo nell'Alta Valle del Secchia*. Memoria del Comitato Scientifico Centrale del Club alpino Italiano, **1**: 129-225.
- MALKOV V.N. & SHAVRINA E.V., 1991 - *Golubino caves on the Pinega River*. Sotsyal'no-ekonomicheskie problem Evropeiskogo Sevra (in russo).
- MESSINA M., GRECH T., FIORENZA F., MARLETTA A., VALENTI P., PETRALIA S., 2015 - *Sulfidic spring in the gypsum karst system of Monte Conca (Italy): chemistry and microbiological evidences*. International Journal of Speleology, **44** (2), 125-139.
- PEERMAN S. & BELSKI D., 1991 - *GYPKAP Another New Mexico Caving Project*. National Speleological Society News, **49** (2): 57-63.
- POLUZZI A., MINGUZZI V., 1998 - *Un caso di biocostruzione in un ambiente di grotta*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, **2(10)**: 93-100.
- POTAPOV S.S., PARSHINA N.V., 2010 - *Howlite $Ca_2B_5SiO_9(OH)_5$ from Ordinskaya cave in Perm region – the first find on the Ural*. In: The problems of mineralogy, petrography and metallogeny, Scientific reading in memory. Chirvinsky P. N. Collection of scientific papers, Perm, **13**: 83-91 (in russo).
- RONDA SPELEOLOGICA IMOLESE, 2011 - *Sistema carsico Grotta della Befana* in: LUCCI P. & ROSSI A. (Eds.), *Speleologia e geositi carsici in Emilia-Romagna*. Pitagora, Bologna: 350-353.
- RUSO G.B., 1981 - *Splitting of gypsum crystals* (in Russo). Zapiski Vsesoyuz. Mineral. Obsch., **110(2)**: 167-171 (in russo).

- SANTAGATA A. 1836 - *Iter ad Montem vulgo Della Rocca*. *Novi commentari dell'Accademia delle Scienze dell'Istituto di Bologna*, **2**: 371-381.
- SARIGU S., 1999 - *Segnalazione di Carbidimiti nella Grotta degli Scogli Neri*. *Speleologia*, **40**: 17-24)
- TURCHINOV I.I., 1993 - *Secondary cave formation of the gypsum caves of Western Ukraine*. *Svet*, **3(9)**: 29-37 (in russo).
- TCHAIKOVSKY I.I., KADEBSKAYA O.I., 2009 - *Gesso criogenico della grotta di ghiaccio di Kungur*. *Problemi di Mineralogia, Petrologia e Metallogenesi*, Università di Perm., **12**, 85-90 (in russo).
- TCHAIKOVSKIY I., KADEBSKAYA O. & KALININA T., 2015 - *Mineral pellicles on the lakes surface of warm and cold zones in Kungur Ice Cave*. *Acta Carsologica*, **44(1)**: 101-106.
- VIGNA B., FIORUCCI A., BANZATO C., FORTI P., DE WAELE J., 2010 - *Hypogene gypsum karst and sinkhole formation at Moncalvo (Asti, Italy)*, *Zeitschrift für Geomorphologie* **54 (2)**: 285-306.
- VOLKOV S.N., ANDREYCHOUK V.N., JANCHOUK E., 1986 - *Birnessite stalactite from Zoloushka cave (Bukovina, Ukraine)*. *Peshchery*, **20**: 113-114 (in russo).
- VOLKOV S.N., ANDREYCHOUK V.N., JANCHOUK E., SMIRNOV B.I., 1987 - *Modern ferro-manganese deposits from the Zoloushka cave*. *Academia Nauk SSSR*, **292 (2)**: 451-454 (in russo).
- WHITE W.B., 1962 - *Introduction to the symposium on cave mineralogy*. *NSS Bulletin*, **24**: 55-56.
- ZAK K., ONAC B., PEROIN A., 2018 - *Criogenic carbonates in cave environment: a review*. *Quaternary International* **187 (1)**: 84-96.



Grotta Covadura, Sorbas: stalagmiti di gesso in parte cave (Foto: Paco Hoyos).



Foto di Speleotemi rari

La ricchezza del concrezionamento delle cavità naturali in gesso e gesso-anidrite non si esaurisce certo con i numerosi speleotemi peculiari che sono stati appena descritti.

Soprattutto le recenti esplorazioni hanno infatti mostrato che, in queste cavità naturali, vi è una sorprendente presenza di speleotemi di calcite e/o di gesso che, pur avendo caratteristiche simili a quelli che si sviluppano nelle grotte calcaree, spesso mostrano anche aspetti originali, meritevoli almeno di una citazione.

In molti casi questo è dovuto al fatto che i principali processi che portano alla loro formazione (dissoluzione incongruente del gesso per la calcite ed evaporazione per il gesso) sono estremamente più efficienti di quello che è responsabile dello sviluppo di tutti gli speleotemi di carbonato di calcio nelle grotte calcaree (diffusione della CO_2 da una soluzione satura di CaCO_3). In effetti la velocità di crescita degli speleotemi di calcite nelle grotte gessose è normalmente di 1-2 ordini di grandezza superiore a quello che normalmente si osserva nelle grotte in calcare.

Questo permette quindi nei gessi il rapido sviluppo di meso- e micro-forme che ben difficilmente possono essere osservate nelle normali grotte carsiche.

Si è quindi deciso di aggiungere questa piccola galleria fotografica in cui presentare, in maniera concisa, alcune delle morfologie più rare ed interessanti, anche se non peculiari, che in questi anni sono state documentate nelle grotte in gesso. Per ogni foto si è cercato di dare una concisa spiegazione dei fenomeni che ne avevano causato lo sviluppo particolare.



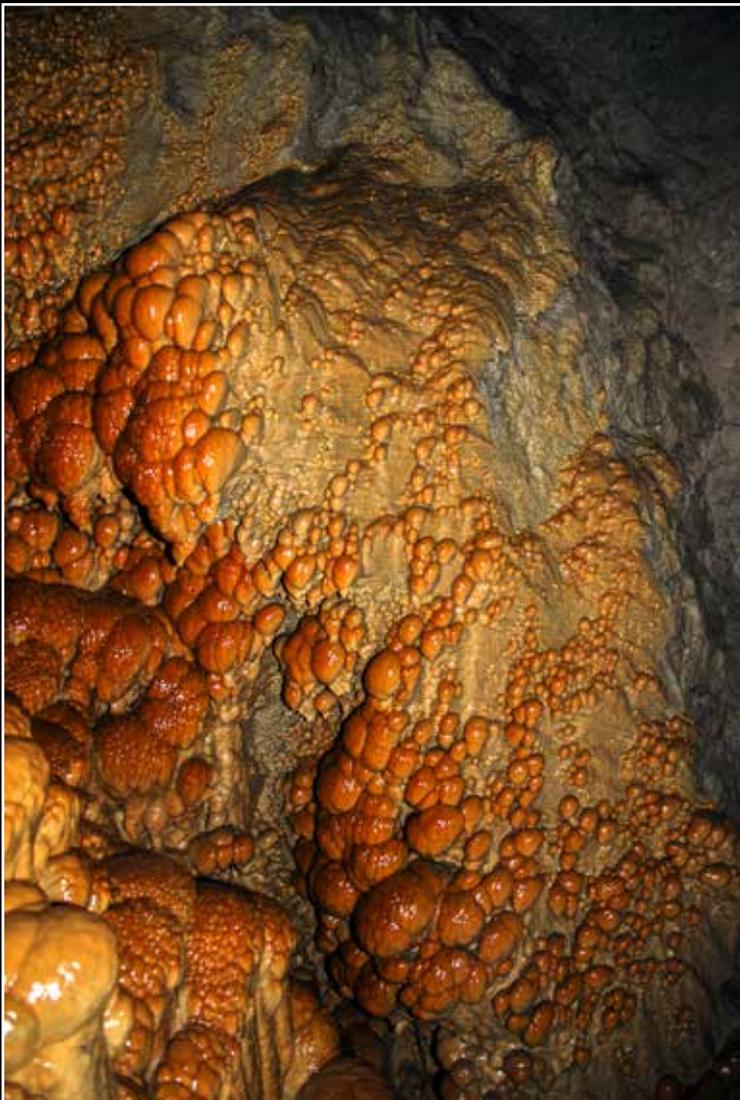
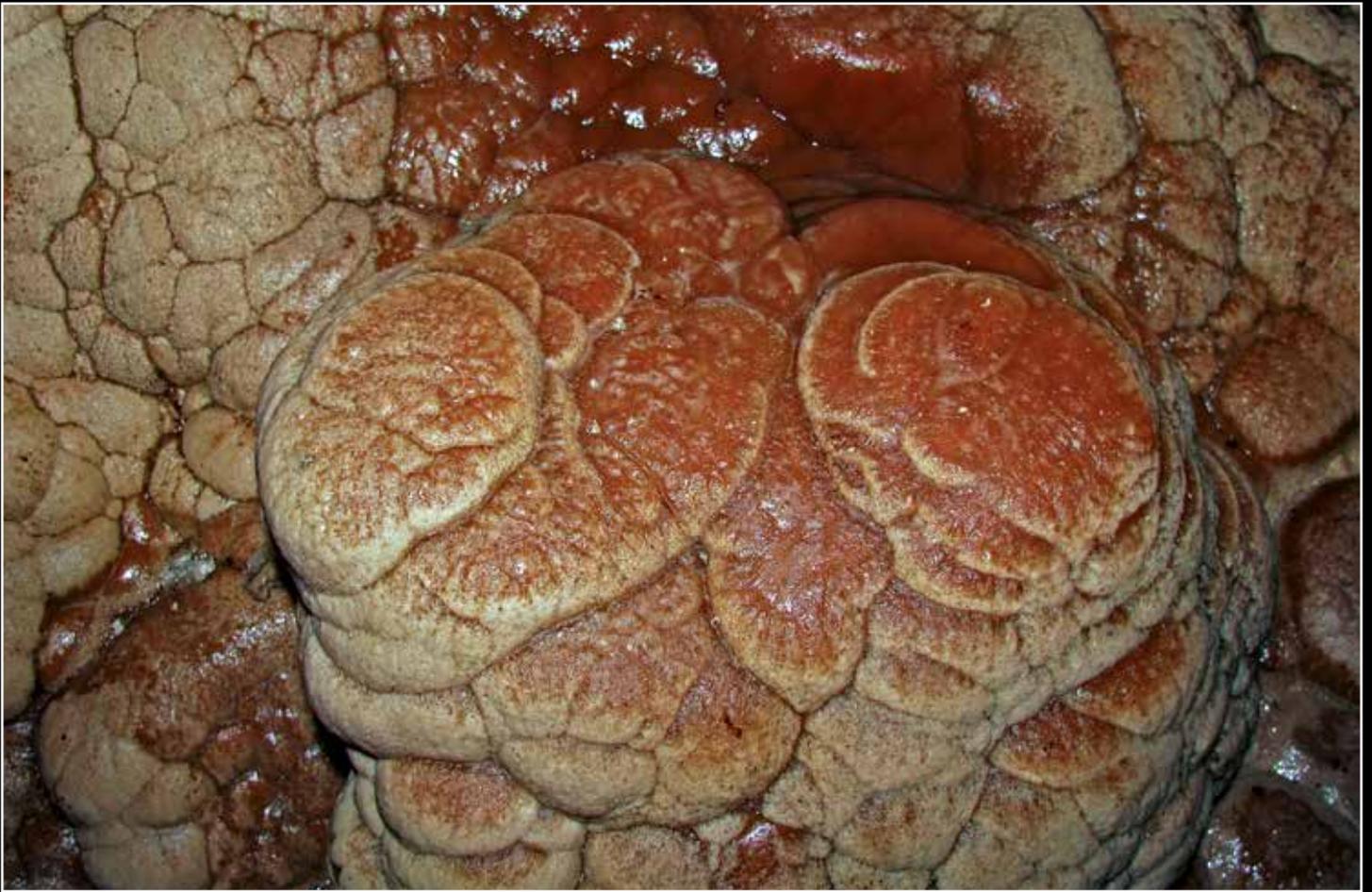
La grande colata di calcite formatasi in un pozzo della Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola); è importante notare che lo sviluppo di questo gigantesco speleotema è durato solo poche migliaia di anni, un tempo brevissimo se comparato a quello necessario per sviluppare una analoga forma in calcare (DE WAELE *et al.*, 2013A). Questa concrezione è importante anche per la grande varietà di differenti morfologie che presenta al suo interno (gradonature, canne d'organo, vele, stalagmiti etc.), tanto da essere utilizzato come esempio classico del controllo dell'idrodinamica sullo sviluppo delle concrezioni complesse (BADINO *et al.*, 2017) (Foto: Claudio Pollini).



A sinistra: Inghiottitoio di Monte Conca (Sicilia): corda abbandonata circa 20 anni fa e oggi completamente ricoperta da uno spesso strato di carbonato di calcio a conferma del fatto che la precipitazione di calcite dovuta alla dissoluzione in congruente del gesso è un processo molto più rapido ed efficiente di quello classico dovuto alla diffusione della CO_2 (Foto: Marco Vattano).

In basso: Inghiottitoio del Rio Stella (Vena del Gesso romagnola): concrezione di un'intensa colorazione rosso-arancio. Molto spesso le concrezioni di calcite nelle grotte in gesso presentano una colorazione da rosso arancio fino a marron rossiccio che è dovuta al fatto che la soluzione da cui si formano per dissoluzione incongruente è ancora ricca di acidi fulvici e umici provenienti dal suolo pedologico, data la normale velocità di percolazione che caratterizza i gessi (Foto: Piero Lucci).



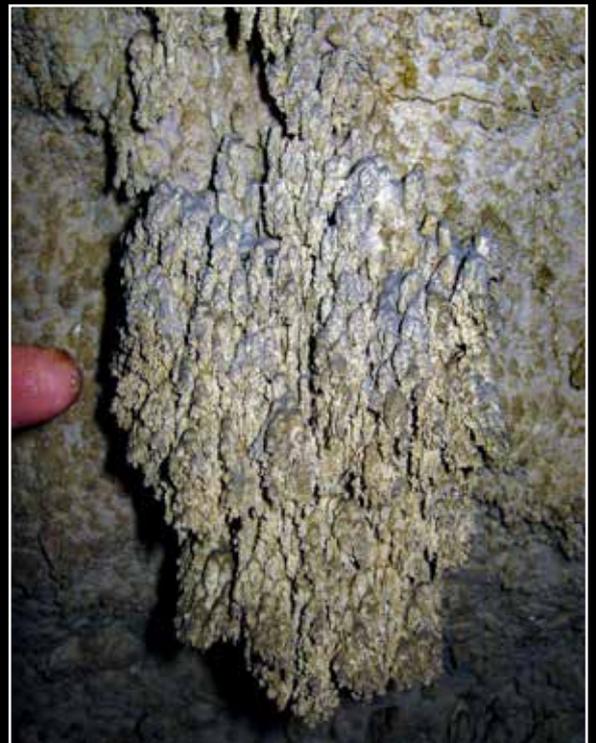


In alto: Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): particolare di una colata al fondo di un pozzo dove è presente molto stillicidio, ma anche condensazione. La differente colorazione è dovuta al fatto che, mentre dove è sempre attiva l'alimentazione gli acidi umici e fulvici vengono inglobati nella concrezione colorandola, nelle aree invece in cui prevale la condensazione, la parziale solubilizzazione dello strato superficiale permette l'ossidazione di tali acidi e quindi la contestuale perdita della colorazione (Foto: Piero Lucci).

A sinistra: Grotta Risorgente SEMPAL (Vena del Gesso romagnola): speleotemi globulari di calcite dovuti all'effetto dell'impatto delle gocce secondarie da splash su una parete subverticale. Le concrezioni da splash sono una caratteristica peculiare delle grotte in gesso dei climi temperati umidi, dove spesso ricoprono totalmente le pareti dei pozzi verticali (Foto: Elga Sfrisi).



Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): quando le concrezioni da splash si formano su una superficie suborizzontale rapidamente creano una sorta di "barriera" ai bordi della stessa a causa del fatto che la capillarità e l'evaporazione sono massime a livello dei bordi esterni (Foto: Piero Lucci).



Grotta sotto il Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): A) il bordo superiore della concrezione di calcite marca chiaramente il livello stazionario raggiunto dall'acqua nel laghetto adesso asciutto (De Waele *et al.*, 2013b); B) particolare dei poolfinger subacquei sviluppatisi all'interno del laghetto stesso (Foto: Jo De Waele).



A sinistra: Grotta risorgente SEMPAL (Vena del Gesso romagnola): rootsicles policrome. Questo particolare tipo di speleotema, abbastanza raro nelle grotte in calcare, è invece molto diffuso in quelle in gesso dato che spesso sono assolutamente epidermiche e quindi vengono facilmente raggiunte dagli apparati radicali (Foto: Elga Sfrisi).

In basso: Grotta Rosa Saviotti (Vena del Gesso romagnola): grande "campo" di pisoliti. Le pisoliti sono molto comuni nelle grotte dei gessi in ambiente temperato umido, dove possono ricoprire interi pavimenti di gallerie anche grazie alla progressiva ossidazione del materiale organico presente nella soluzione, che mantiene attivo il processo di dissoluzione incongruente del gesso (Foto: Ivano Fabbri).





Grotta di Santa Ninfa (Sicilia): eccentrica che si è appena trasformata in cannula a causa di un aumento dell'alimentazione che ha causato l'inizio del gocciolamento dal suo apice. Il suo intenso colore rossiccio è dovuto alla presenza di acidi umici e fulvici intrappolati nella struttura della concrezione, mentre i macrocristalli all'interno della goccia apicale sono trasparenti, o comunque molto meno colorati, per il fatto che la cristallizzazione lenta tende ad espellere le impurezze dal lattice cristallino del carbonato di calcio (Foto: Marco Vattano).



In alto: Grotta di Santa Ninfa (Sicilia):
eccentrica di calcite: la struttura eli-
coidale è una conseguenza della pro-
gressiva rotazione in senso antiorario
dell'asse c dei cristalli di calcite che
ne costituiscono la struttura (Foto:
Marco, Vattano).

A sinistra: Barbarossa Hohle (Germa-
nia): sui laghetti, per evaporazione,
si formano veli galleggianti di calcite
flottante che, sedimentando al fon-
do, contribuiscono a formare le co-
siddette "polveri di dolomite" (Foto:
Stephan Kempe).



Abisso Peroni (Vena del Gesso romagnola): grandi vasche di carbonato di calcio lungo il fiume sotterraneo. I tratti suborizzontali delle grotte in gesso sono normalmente le aree più concrezionate, non tanto a causa dell'efficienza del meccanismo della dissoluzione incongrua, ma per la progressiva ossidazione del materiale organico, trasportato dal fiume sotterraneo, che fornisce la CO_2 necessaria (Foto: Fabio Liverani).



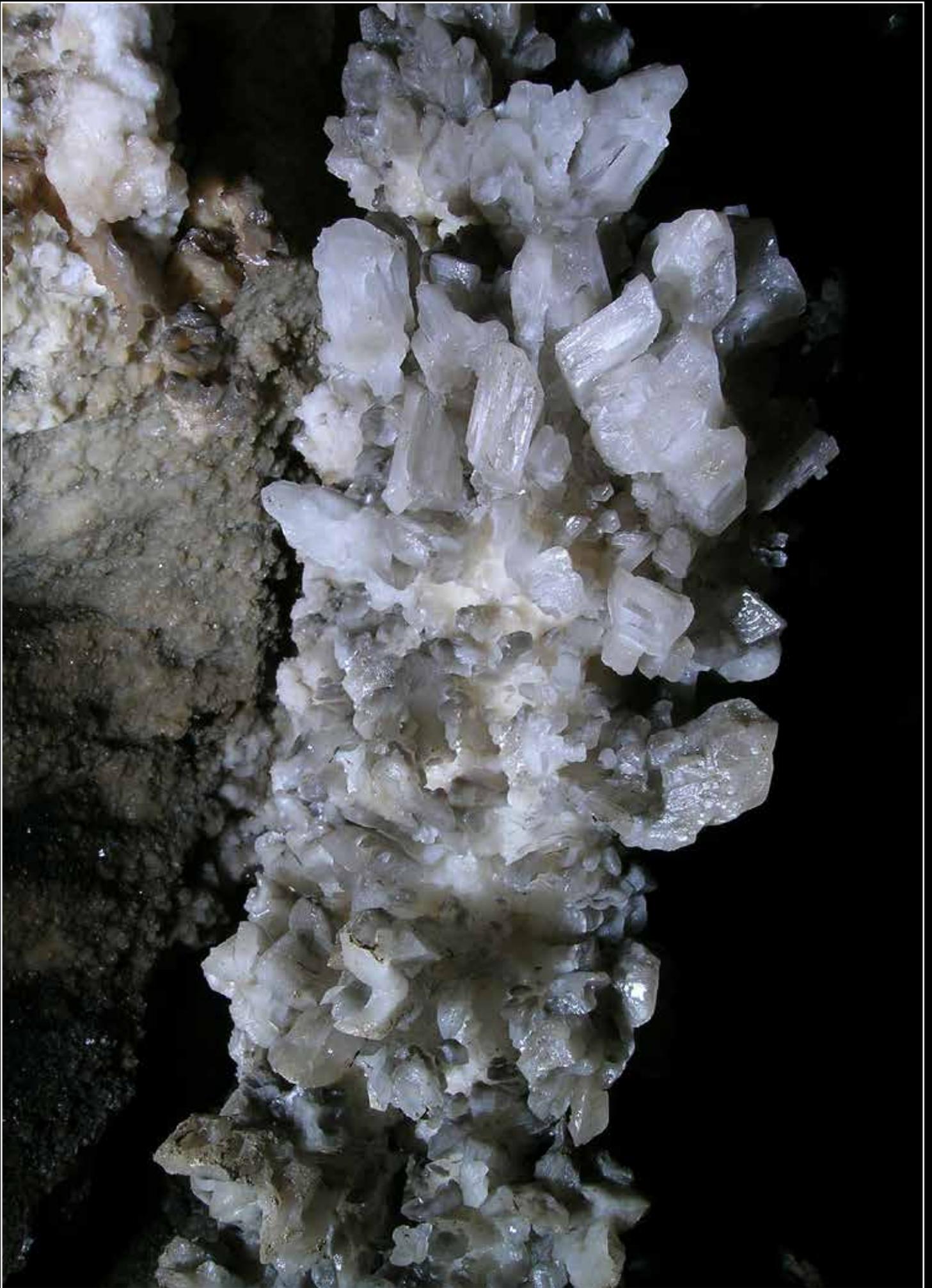
Sima Rambla, Sorbas (Spagna): stalattiti di gesso che coprono completamente il soffitto della cavità. Molte di queste concrezioni però non sono delle vere stalattiti, dato che il loro canalicolo centrale è quasi sempre occluso dal gesso che si deposita durante i lunghi periodi di siccità: quindi il loro sviluppo è dovuto esclusivamente all'acqua che fluisce sulla loro superficie esterna (Foto: Paco Hoyos).



A sinistra: Sima del Cumpleaños II, Sorbas (Spagna): un grande bathtub formato da infiorescenze gessose su un substrato plastico al di sotto di una rootsicles, da cui cade una grande quantità d'acqua durante i forti temporali. Questa concrezione (attualmente unica del suo genere in grotte in gesso) è la prima che viene segnalata al di fuori delle grotte calcaree in aree tropicali (Foto: Paco Hoyos).

In basso: Grotta El laminador, Sorbas (Spagna): sulla sinistra una parete completamente ricoperta da una colata botroidale di gesso microcristallino, mentre sulla destra c'è una stalagmite di gesso a palma. La formazione di queste concrezioni è controllata dalla presenza di acqua nebulizzata durante i rari ma intensi temporali (Foto: Paco Hoyos).





Inghiottitoio Serre di Ciminna (Sicilia): stalagmite costituita da aggregati di macro-cristalli di gesso il cui sviluppo è stato possibile per la risalita capillare, e successiva lenta evaporazione, che permettevano esclusivamente la crescita per epitassia (Foto: Marco Vattano).



In alto: Grotta Salinella (Licodia Eubea, Sicilia): in primo piano grande stalattite di gesso macrocristallino deflessa contro vento. Più in basso sono visibili altre stalattiti più piccole sempre inclinate contro vento dato che la loro deposizione è dovuta all'evaporazione (Foto: Marco Vattano).

A sinistra: Cueva del Leon (Argentina): eccentrica di gesso formata da fasci di cristalli aciculari che si accrescono dalla base. Le curvature dello speleotema sono la conseguenza del fatto che la velocità di crescita è diversa da fibra a fibra e quindi, per restare connesse, devono obbligatoriamente curvarsi (Foto: Paolo Forti).



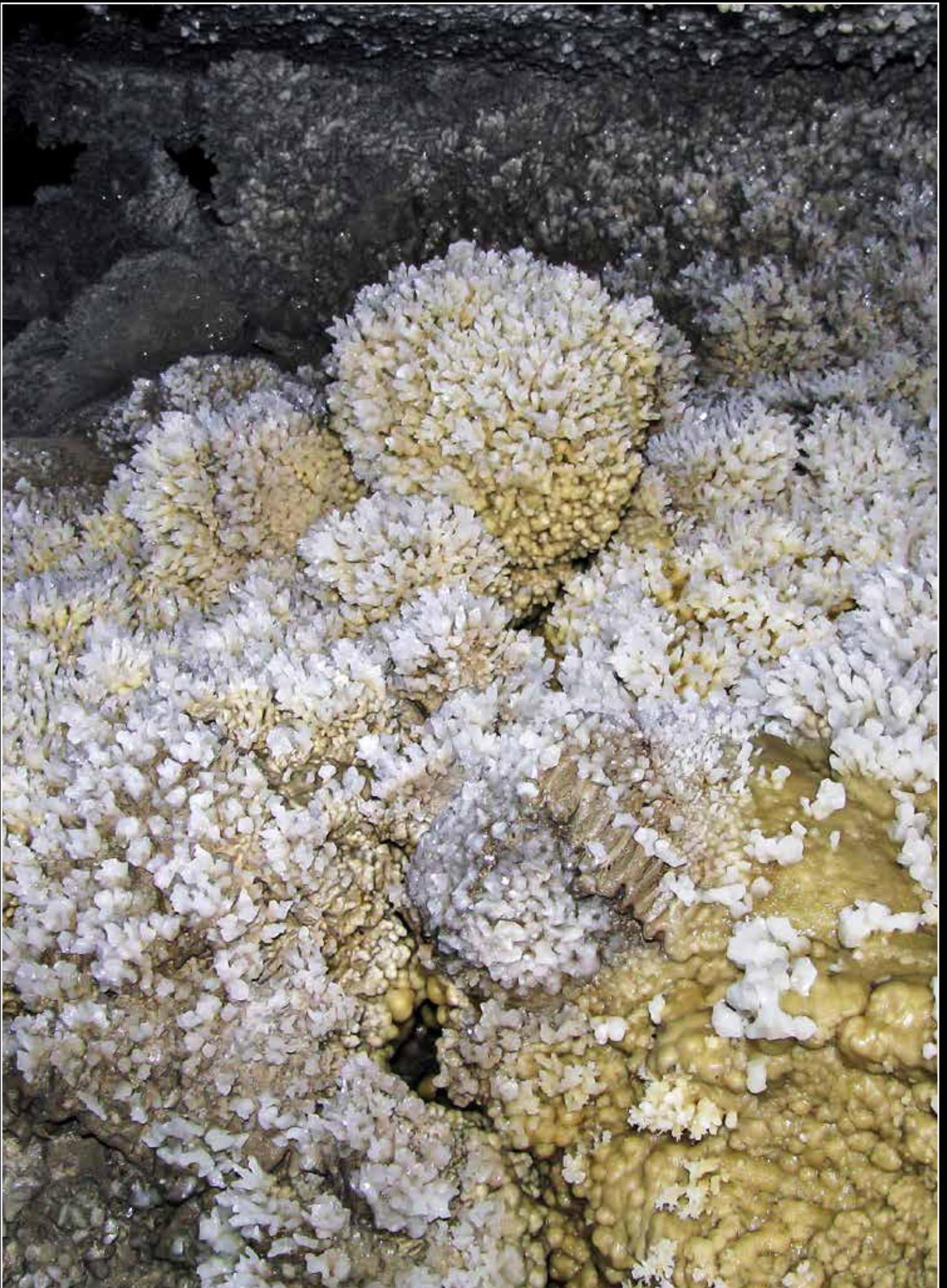
Grotta Salinella (Licodia Eubea, Sicilia): pendente a "zampa di elefante" sulla cui sommità si sono sviluppati, per capillarità ed evaporazione lenta, grandi cristalli euedrali di gesso (Foto: Marco Vattano).



Grotta Salinella, (Licodia Eubea, Sicilia): parete ricoperta da aggregati macrocristallini emisferici di gesso prismatico che formano strutture simili ai "ricci di mare" (FORTI, 2017): sino ad oggi simili strutture erano state segnalate solo in una grotta calcarea delle Filippine, dove però erano costituite da aragonite (Foto: Marco Vattano).



Buco Mucho Strettu (Vena del Gesso romagnola): rim di gesso microcristallino che ha quasi obliterato la faccia di un macrocristallo di gesso che è posizionato esattamente al centro di una strettoia (CHIARINI *et al.*, 2019) (Foto: Stefano Zauli).



Grotta Risorgente del Rio Basino (Vena del Gesso romagnola): infiorescenze di gesso macrocristallino che crescono per risalita capillare ed evaporazione al di sopra di una concrezione di carbonato di calcio che si sviluppa per dissoluzione incongruente (Foto: Piero Lucci).



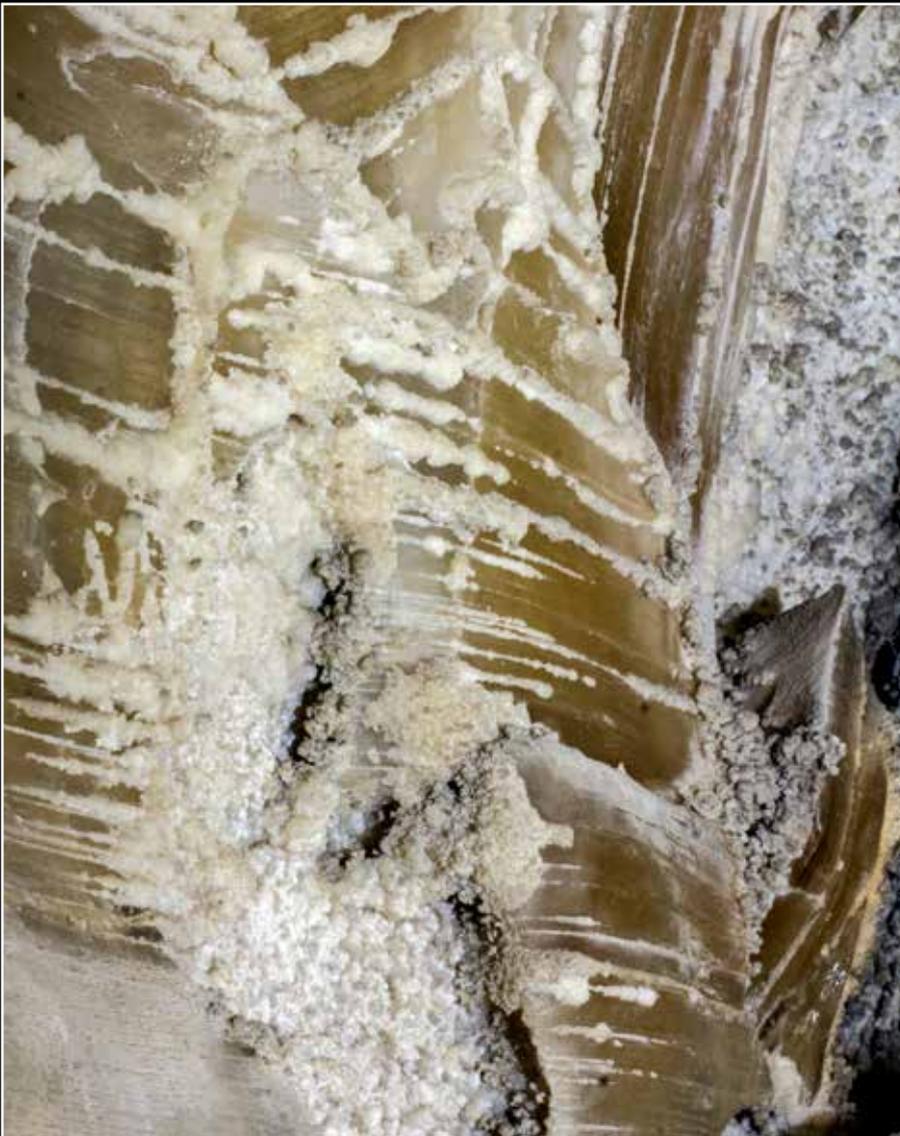
Sima de los Pinos, Sorbas (Spagna): il forte stillicidio presente durante un temporale è responsabile per l'alimentazione delle infiorescenze gessose (Foto: Paco Hoyos).





Sistema Covadura (Galleria del Bosco), Sorbas (Spagna): mammelloni di gesso in cui le infiorescenze gessose hanno bordato i piani di contatto tra i vari cristalli di gesso che li formano (Foto: Paco Hoyos).





In alto: Grotta Inferno (Cattolica Eraclea, Sicilia): le infiorescenze, che si sono formate a partire dai piani di discontinuità dei cristalli, si sono sviluppate a tal punto da permettere la formazione di strutture dendritiche al di sopra dei cristalli stessi (Foto: Piero Lucci).

A sinistra: Grotta a nord di Pederzeto (Vena del Gesso romagnola): le infiorescenze di gesso microcristallino hanno bordato i piani di sfaldamento leggermente scollati di un grande geminato a ferro di lancia (Foto: Piero Lucci)



Grotta sotto il Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): particolare dei cristalli di gesso cresciuti sott'acqua. Il loro sviluppo è stato controllato dall'epitassia perché la sovrassaturazione al loro livello era troppo bassa per permettere il fenomeno di nuova nucleazione (Foto: Jo De Waele)



Grotta di Baena (Spagna): grandi cristalli euedrali di gesso ialino con la superficie parzialmente sciolta e ricristallizzata per epitassia a causa dell'abbondante condensa che caratterizza questa grotta (Foto: José Antonio Mora Luque).



Grotta del Re Tiberio (Vena del Gesso romagnola): geminati a coda di rondine con morfologia pseudoesagonale che vengono estrusi progressivamente dal substrato fangoso dove avviene la loro alimentazione per capillarità ed evaporazione: per questo, progressivamente, si allungano alla base di mano in mano che il geminato si accresce (Foto: Claudio Pollini).



Grotta dei Panni, (Ciminna, Sicilia): cristalli singoli di gesso ialino che si sono sviluppati all'interno di un sedimento sabbioso-argilloso incoerente. Il processo di cristallizzazione è stato sufficientemente lento da permettere ai cristalli di non inglobare nessun granulo estraneo mentre si andavano accrescendo (Foto: Marco Vattano).



Grotta del Ragno (Gessi bolognesi): rosette di cristalli pinacoidali di gesso ialino che si sono formati all'interno di lenti di argilla (Foto: Sergio Gnani).



Grotta del Ragno (Gessi bolognesi): cristalli di gesso scheletrico che si sono formati all'interno di lenti di argilla a causa dell'insufficiente energia di cristallizzazione (Foto: Sergio Gnani).



In alto: Grotticella dei cristalli (Vena del Gesso romagnola): grande aggregato di lenticolari di gesso, spesso geminati a ferro di lancia, che danno luogo a una classica "rosa di gesso". Il colore grigio è dovuto alla dispersione nel reticolo cristallino di fango e argilla che ha potuto essere inglobato dato che la velocità di cristallizzazione era sufficientemente elevata (Foto: Piero Lucci).

A sinistra: Grotta di Entella (Sicilia): la rottura accidentale dei livelli superficiali di questa colata ha messo in evidenza le alternanze di calcite (marron chiaro), ossidi di ferro e manganese (nero) e gesso microcristallino (bianco) che evidenziano come anche minime variazioni nella composizione e nella quantità di alimentazione possano modificare drasticamente il minerale che precipita (Foto: Marco Vattano).





Grotta di Kungur (Russia): nel periodo primaverile, quando il permafrost inizia a fondere, si sviluppano le classiche stalagmiti di ghiaccio a "mazza ferrata", il cui diametro apicale è nettamente maggiore di quello sottostante. Nell'estate buona parte delle stalagmiti fonde e quindi all'inizio dell'inverno rimangono solo piccoli moncherini, da cui riparte lo sviluppo di queste stalagmiti (Foto: Paolo Forti).



A sinistra: Grotta di Baena (Spagna): cicli di dissoluzione superficiale e ricristallizzazione causata dalla alternanza di condensazione ed evaporazione hanno causato la cristallizzazione frazionata del gesso che, conseguentemente, ha espulso le impurezze di ossidi-idrossidi di ferro che si sono concentrati lungo i piani di contatto tra un geminato pseudo-esagonale a coda di rondine e gli altri cristalli di gesso (Foto: José Antonio Mora Luque).

In basso: Grotta Risorgente SEMPAL (Vena del Gesso romagnola): frammento di concrezione calcare fluidata e quindi sepolto in una lente di argilla dove le acque ossigenate hanno fatto precipitare sulla sua superficie ossidi-idrossidi idrati di ferro e manganese (Foto: Stefano Zauli).



A destra: Grotta del Bules (Gessi della Romagna orientale): la condensazione di acqua ricca di acido solfidrico, e la sua successiva ossidazione sulle stalattiti di gesso, aumenta l'energia di cristallizzazione (FORTI & LUCCI, 2016) e quindi causa lo sviluppo di cristalli prismatici (Foto: Piero Lucci).

In basso: Grotta al Sasso della Civetta (Gessi della Romagna orientale): la condensazione e la successiva ossidazione dell'acqua ricca di acido solfidrico sul soffitto della grotta ossidandosi abbassa molto il pH, tanto che diventano attivi i microorganismi che ossidano lo ione solfuro a zolfo elementare, che si deposita sotto forma di polvere microcristallina gialla (Foto: Piero Lucci).





José-Maria Calaforra

Professore di Geodinamica all'università di Almeria (Spagna). È presidente della Società Spagnola di Speleologia e Scienze del Carsismo (SEDECK). Autore di più di 300 pubblicazioni scientifiche e divulgative sul carsismo, la geomorfologia, l'idrogeologia e la speleogenesi, tra cui è fondamentale la sua tesi dottorale sulla "Carsologia del Gesso"



Paolo Forti

Già Professore di Speleologia all'Università di Bologna e presidente dell'Unione Internazionale di Speleologia, ha studiato per oltre 50 anni le grotte in gesso di tutto il mondo e in particolare i loro depositi chimici. In questo lasso di tempo ha pubblicato sull'argomento oltre 200 lavori scientifici.

