BOSSEA MMXIII

CONGRESSO NAZIONALE

LA RICERCA CARSOLOGICA IN ITALIA

Frabosa Soprana (Cn) – Grotte di Bossea
22-23 giugno 2013

ATTI

LABORATORIO CARSOLOGICO SOTTERRANEO DI BOSSEA
STAZIONE SCIENTIFICA DI BOSSEA CAI CUNEO – COMITATO SCIENTIFICO CENTRALE DEL CAI

Atti del Convegno Nazionale "La ricerca carsologica in Italia", 22-23 giugno 2013, Laboratorio carsologico sotterraneo di Bossea, Frabosa Soprana (pubbl. 1 giugno 2016): 15-23.

A Naica (Messico) il più profondo laboratorio sperimentale ipogeo del mondo

PAOLO FORTI (*), FRANCESCO LO MASTRO (*)

RIASSUNTO

La Miniera di Naica è famosa perché ospita piccole cavità naturali in cui si sono sviluppati i cristalli di gesso più grandi al mondo. Nel 2006, grazie alla collaborazione tra La Venta Esplorazioni Geografiche, Speleoresearch & Films di Città del Messico e la Compagnia Peñoles, proprietaria della miniera di Naica, si è dato vita al "Projecto Naica" finalizzato all'esplorazione, documentazione e studio di queste incredibili grotte di miniera.
Nell'ambito di questo programma si è pensato di realizzare un laboratorio sotterraneo dove condurre un esperimento di crescita artificiale del gesso.
Il laboratorio è stato realizzato circa 590 metri sotto terra, nel primo luogo ove le acque termali zampillano naturalmente dalle pareti delle gallerie minerarie: è pertanto di gran lunga il più profondo laboratorio sperimentale ipogeo mai realizzato al mondo.
La localizzazione del laboratorio è stata scelta perché esattamente e solo in quel posto le acque che scaturivano dalla roccia davano luogo a un intenso concrezionamento con la formazione di speleotemi complessi di gesso, calcite e aragonite, dimostrando così di essere debolmente sovrasature rispetto al solfato di calcio, condizione imprescindibile per la realizzazione dell'esperimento. Il luogo, però, era caratterizzato da condizioni ambientali proibitive (51°C e 100% di umidità relativa) tanto da valergli il nome confidenziale di "inferno": i suoi parametri ambientali, infatti, rendevano a rischio la sopravvivenza stessa degli operatori, che non potevano trattenersi più di pochi minuti al suo interno.
Il Laboratorio è rimasto in funzione per tre anni solari e, grazie ai cristalli che vi si sono formati, è stato possibile confermare che i più grandi gessi della Cueva de los Cristales avevano avuto bisogno di almeno 250.000-300.000 anni per raggiungere le loro dimensioni.
A fianco di questa ricerca nel medesimo laboratorio ne sono state condotte anche altre, per lo studio dell'equilibrio solfato – carbonato di calcio in presenza di anidride carbonica e sulla diagenesi precoce del sistema calcite-aragonite.
Nel 2010 tutte le attività nel laboratorio sono state sospese a seguito della decisione unilaterale della Miniera di non concedere più ai ricercatori impegnati nel Projecto Naica accesso alla stessa.

KEY WORDS: *Grotte di miniera, laboratorio sotterraneo, cristalli di gesso, sistema gesso-calcite, diagenesi aragonite-calcite*

ABSTRACT

The deepest underground experimental laboratory of the world realized in the Naica Mine (Mexico)

Naica Mine (Chihuahua, Mexico) is world renown because it intersected some natural cavities in which the largest gypsum crystals of the world have grown.
In 2006 La Venta Esplorazioni Geografiche, Speleoresearch & Films of Mexico City and Peñoles Company, which is the owner of the Naica mine, decided to settle up and international multidisciplinary project, named "Proyecto Naica", to explore, document and study these incredible mine caves. In the framework of this project, an experiment of gypsum crystal' artificial grow was settled up starting from the same thermal water, which induced the development of the giant crystals. The idea was to measure the growth speedy of the new crystals to determine that of the natural ones , thus defining their age.
Of course this experiment needed the water, which in the past filled up the Naica caves: but since thirty years this water disappeared because the piezometric level was artificially lowered by mine dewatering and today it is present only very deep in the mine. So we were obliged to create a underground natural laboratory 590 m below the mine entrance in the first place in which thermal waters spontaneously spill out from small karst voids intersected by mine galleries. Its location made this laboratory the deepest natural underground laboratory in the world.
The lab site was selected because only there the spilling waters induce a widespread development of complex speleothems, consisting of gypsum, aragonite and calcite, thus proving that they were slightly supersaturated with respect to calcium sulphate, which was a needed pre-condition to try to perform an experiment of artificial growth of gypsum crystals. Unfortunately the lab site was characterized by deadly environmental parameters (51°C and 100% of relative humidity) so that it was confidentially named "The Hell". Its temperature and relative humidity made extremely hard and even deadly the permanence of the scientists, who could no longer than a few minutes inside the lab. Moreover the same environmental conditions heavily affected most of the scientific instruments which had to be installed inside. Once solved the environmental problems, the experiment started by planning and building an peculiar vessel, inside which boundary conditions, as close as possible to those existing in the Naica caves during the development of the giant gypsum crystals, were reproduced and maintained. After 6 months from the beginning of the experiment, the first analyses performed on the samples stored within the vessel demonstrated that small euhedral gypsum crystals with the same shape of the giant natural ones were growing. The experiment was successful. The artificial growth lasted four years and thanks to the developed crystals it was possible to evaluate that the biggest natural ones reached their incredible size in no less than 250.000-300.000 years. This result is in perfect agreement with the ages of different samples of the natural gypsum crystals of the Naica caves, obtained by the classical radiometric dating (U/Th).
Beside this research, the underground laboratory of Naica was also used to study the calcium sulphate-carbonate equilibrium in presence of dissolved carbon dioxide and the early diagenesis in the calcite-aragonite system. At the beginning of 2010 all the activities within the laboratory were obliged to stop, because the owner of the Mine suddenly decided not to tolerate any further presence of scientists from the "Projecto Naica" within the mine.

KEY WORDS: *Mine caves, underground laboratory, gypsum crystals, calcite-gypsum system, calcite-aragonite diagenesis*

(*) La Venta Esplorazioni Geografiche

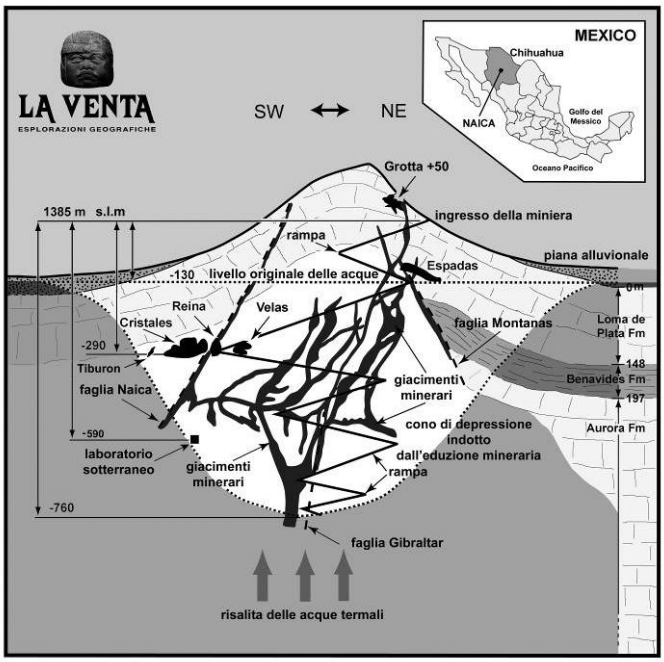

Fig. 1 – Schema geologico della Sierra de Naica con evidenziate le grotte e il laboratorio sperimentale a -590 (da SANNA E FORTI, 2010, modificato)

INTRODUZIONE

La miniera di Naica si trova in un territorio semidesertico circa 100 chilometri a SE di Chihuahua (Messico). I lavori minerari hanno attualmente raggiunto una profondità di 800 metri, quasi 700 al di sotto dell'originario livello piezometrico e quindi per poter procedere con lo sfruttamento del giacimento è necessario pompare all'esterno circa 1 m^3/s di acqua termale.

Sin dall'inizio del suo sfruttamento, la miniera si è subito rilevata una delle più ricche d'argento della terra. La sua fama internazionale, comunque, aumentò moltissimo quando, nel 1910, i lavori minerari, , intercettarono una grotta (la "Cueva de las Espadas") alla profondità di 120 metri dall'ingresso, completamente tappezzata da cristalli di gesso che raggiungevano anche due metri di lunghezza.

Questa grotta venne rapidamente spogliata di buona parte dei sui tesori, che ancor oggi fanno bella mostra di sé in molti dei più importanti musei mineralogici del mondo (HILL & FORTI, 1997). Nel 2000, 170 metri più in basso, sono state intercettate altre 4 cavità naturali con cristalli di gesso giganteschi e trasparentissimi, che, nella "Cueva de los Cristales" raggiungono dimensioni di oltre 12 metri di lunghezza e quasi due metri di diametro (Fig. 1).

In tre delle quattro grotte i cristalli di gesso ricoprono quasi completamente le pareti delle cavità trasformandole in giganteschi geodi; solo nella Cueva de los Cristales una gran parte della volta non è scoperta. Questa grotta è anche quella che presenta gli individui di maggiori dimensioni: si tratta di un centinaio di cristalli prismatici, raramente geminati a coda di rondine, molto allungati che si sviluppano dal pavimento fino al soffitto della cavità, superando spesso gli 8 metri di lunghezza. Sorprende il relativamente basso numero di cristalli presenti che può essere giustificato da una velocità di nucleazione estremamente lenta, conseguenza a sua volta di una sovrasaturazione minima che si è necessariamente mantenuta costante per tutto il tempo di accrescimento dei cristalli maggiori.

Il loro sviluppo, infatti, si è interrotto soltanto di recente quando, meno di 20 anni addietro, l'eduzione mineraria li ha improvvisamente privati dell'acqua termale in cui si accrescevano.

Lo studio delle caratteristiche chimico-fisiche dell'acquifero termale ha permesso di evidenziare l'esistenza di un meccanismo assolutamente nuovo che ha controllato la genesi e l'evoluzione dei giganti di gesso (GARCÍA RUIZ *et alii*, 2007), meccanismo basato sulla differenza della solubilità relativa tra gesso ed anidrite in funzione della temperatura (Fig. 2). Nel 2006, la Società Peñoles, proprietaria della Miniera, assieme a C/Producciones di Città del Messico e a La Venta Esplorazioni Geografiche ha dato vita al *Proyecto Naica*, con lo scopo di coagulare attorno a queste incredibili grotte il migliore team internazionale possibile al fine di esplorarle, documentarle e studiarene gli aspetti salienti, prima di tutto i suoi giganteschi cristalli (FORTI & SANNA 2010). Per cercare di definire in maniera accurata il tempo che è stato necessario ai cristalli di Naica per raggiungere le dimensioni attuali si è utilizzato ovviamente il metodo radiometrico (U/Th), oramai ben testato. Si sono datati campioni provenienti da posizioni vi via più interne dei cristalli. In questo modo si è riusciti a stimare un'età compresa tra i 200.000 e i 300.000 anni per i cristalli più grandi della Cueva de los Cristales (SANNA *et alii*, 2011, BADINO & FORTI, 2013).

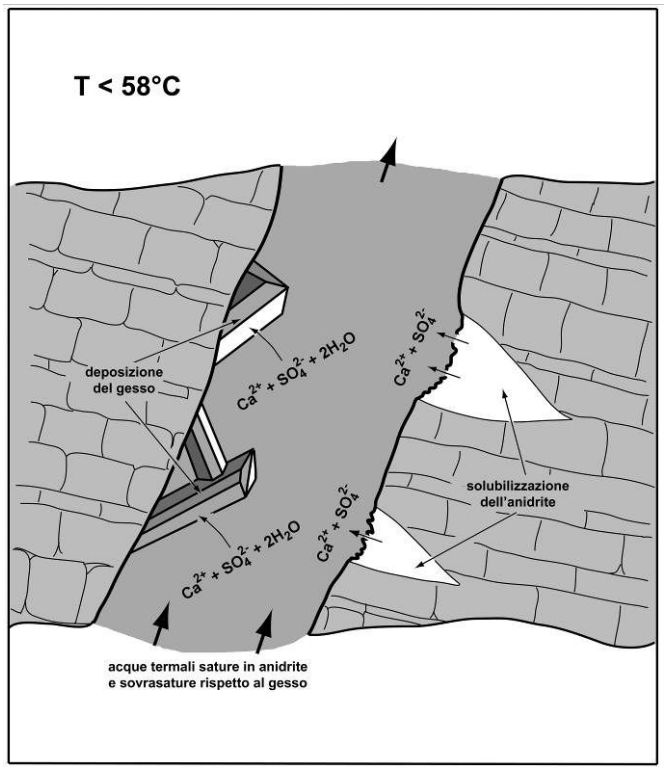

Fig. 2 – Il meccanismo che ha permesso l'evoluzione dei cristalli di gesso giganteschi (da SANNA E FORTI, 2010, modificato)

Il metodo però è intrinsecamente impreciso e quindi l'indeterminazione è elevata. Si è pertanto deciso di provare a raffinare questo dato utilizzando un metodo del tutto nuovo basato sulla velocità attuale di deposizione del gesso da parte delle acque termali che ancora circolano nella montagna di Naica, circa 300 metri più in basso delle grotte (FORTI & LO MASTRO, 2008).

Per fare questo è stato necessario realizzare un laboratorio sperimentale sotterraneo all'interno della Miniera di Naica, ove pianificare un esperimento di crescita artificiale del gesso.

Per poter realizzare tale esperimento, però, era necessario disporre dell'acqua termale che aveva permesso lo sviluppo dei gessi del livello -290. Ma da quasi 30 anni, a causa dell'abbassamento artificiale della falda operato dalla miniera, le acque termali hanno abbandonato le grotte di -290 e, attualmente, il primo posto in cui è possibile incontrarle è nel livello -590 ove vi sono varie scaturigini che affiorano sulle pareti di piccole cavità carsiche intercettate da due gallerie sub parallele attualmente lontane dai lavori minerari (Fig. 3).

L'ambiente di una di queste cavità, per il suo relativo confinamento, che garantiva stabilità dei parametri ambientali, si prestava per tentare un esperimento di crescita artificiale in condizioni il più simili possibili a quelle che esistevano nelle grotte di -290 prima che la Miniera procedesse con l'abbassamento della falda freatica. Il posto del laboratorio, però, era caratterizzato da condizioni ambientali proibitive (51°C e 100% di umidità relativa) tanto da valergli il nome confidenziale di "Inferno": i suoi parametri ambientali, infatti,

Fig. 3 – Una delle scaturigini termali a quota -590: si noti il concrezionamento carbonatico al suo contorno

rendevano estremamente complessa e a rischio la sopravvivenza stessa degli operatori, che non potevano trattenersi più di pochi minuti al suo interno, per non parlare poi dei problemi relativi agli strumenti scientifici che vi si dovevano installare.

IL LABORATORIO "INFERNALE"

L'acqua che fuoriesce dalle fratture delle gallerie a -590 è

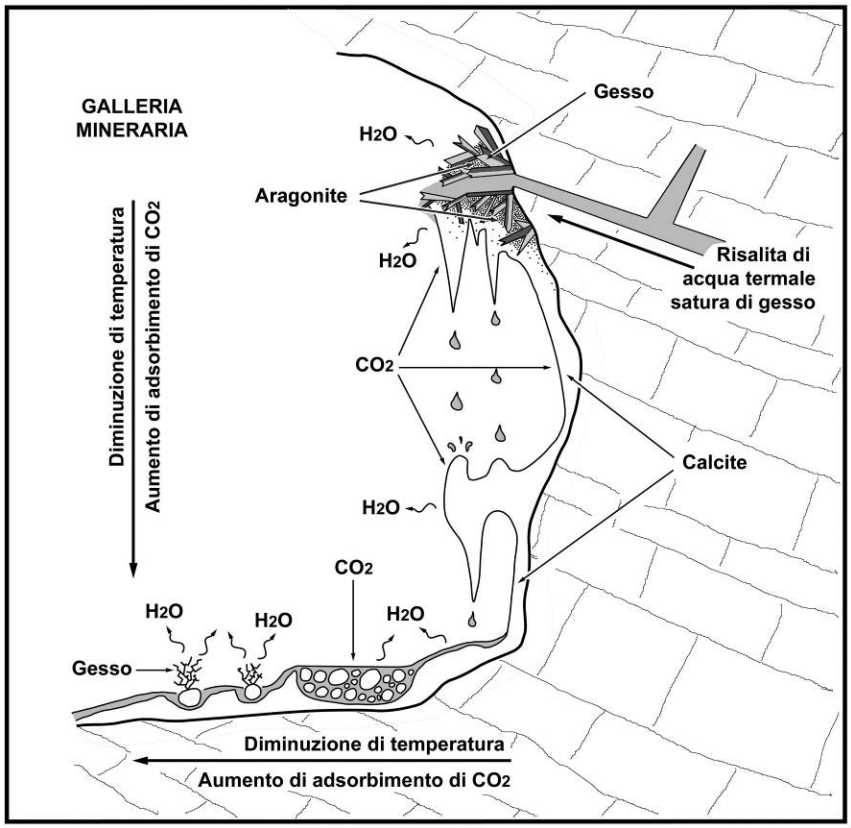

Fig. 4 – Schema evolutivo delle concrezioni che si stanno sviluppando a livello -590 (da FORTI *et alii*, 2008)

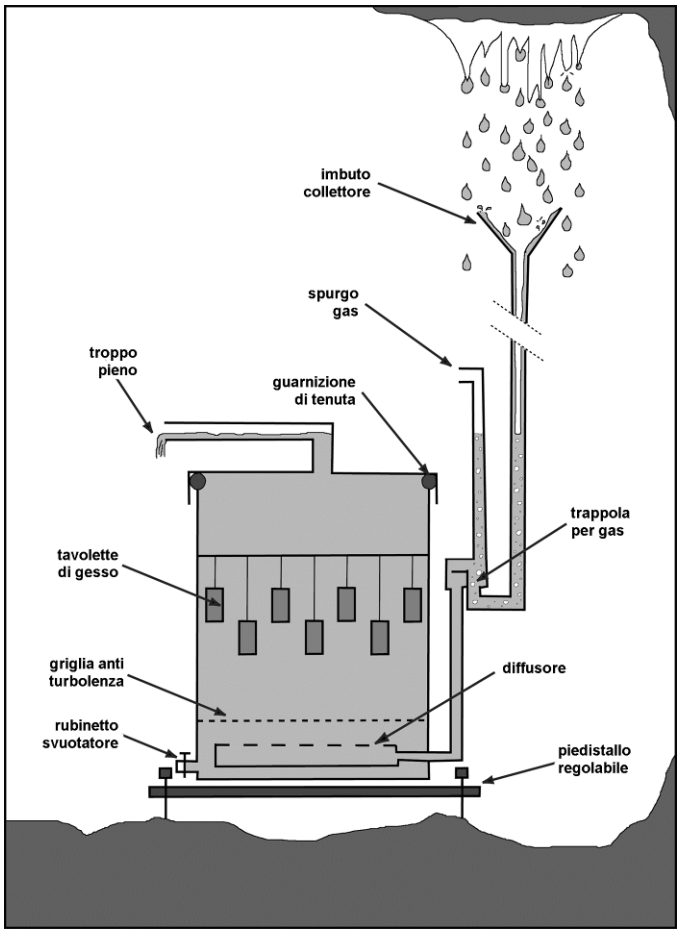

Fig. 6a – Schema del bidone progettato per l'esperimento di formazione artificiale di cristalli di gesso (da FORTI *et alii* 1998 modificato)

praticamente la stessa che, per centinaia di migliaia di anni, ha favorito lo sviluppo dei megacristalli di gesso delle grotte di Naica (GAROFALO *et ali*., 2008). Se la temperatura alle scaturigini è molto variabile (da 47 a oltre 54°C) (FORTI *et alii* 2008), la composizione chimica delle acque termali (leggermente sovrasaturate rispetto al gesso) è rimasta praticamente invariata rispetto a quella che un tempo circolava nelle grotte.

Tutta l'area è poi interessata da un intenso fenomeno di concrezionamento con deposizione prevalente di calcite e aragonite a causa della diffusione della CO_2 dall'atmosfera e, solo nelle immediate vicinanze delle scaturigini, anche di gesso (Fig. 4). Qui lo sviluppo del gesso è rapido a causa di due fattori assenti nelle grotte di -290: la diminuzione di temperatura dai 57-58°C misurati nelle inclusioni fluide dei gessi delle grotte (FORTI, 2008), a circa 51-52°C attuali nel caso delle sorgenti più calde) e l'evaporazione.

La scelta della grotticella da utilizzare per l'installazione del laboratorio si è basata essenzialmente su tre fattori: la temperatura delle sue acque, la facilità della captazione e la massima adiabaticità possibile dell'ambiente circostante.

Sulla base di tutte queste condizioni la scelta è caduta su una venuta d'acqua molto abbondante (alcuni litri/secondo) che affiorava sul soffitto di un piccolo diverticolo laterale, il cui ingresso era parzialmente chiuso da un tamponamento in muratura.

Una volta identificata la sorgente di acque termali da utilizzare per l'esperimento, sussisteva comunque il problema di riportare il sistema nelle stesse condizioni di totale assenza di aria (e quindi di CO_2) presenti nelle grotte di -290 prima che c'eduzione le prosciugasse: questo per evitare che la precipitazione di carbonato di calcio alterasse i valori di deposizione del gesso. Pertanto, per ripristinare le condizioni di saturazione si è progettato (Fig. 5, 6) e realizzato uno strumento in grado di raccogliere l'acqua che zampilla dalla scaturigine e convogliarla rapidamente dentro un contenitore a tenuta stagna al cui interno l'acqua rimane del tutto fuori dal contatto con l'atmosfera.

La dimensione del contenitore (un normale bidone industriale di plastica, con chiusura ermetica) è stata scelta in modo da garantire un volume d'acqua tale (circa 70 litri) da rendere poco importanti gli scambi termici con l'atmosfera esterna che, ovviamente, è 3-4 °C inferiore a quella della

Fig. 6b – Il bidone al momento del suo posizionamento all'interno del laboratorio (Foto Laura Sanna)

scaturigine.

Sul fondo del bidone, poi, vi è un rubinetto che ha la funzione di regolare il flusso all'interno del contenitore per evitare che sia turbolento. Il flusso all'interno del contenitore era infatti uno dei parametri ritenuti "critici": se è troppo basso, infatti, lo scambio di calore con l'ambiente diviene non trascurabile, se è troppo elevato si crea turbolenza mai esistita nelle grotte di -290 ove i flussi idrici erano controllati semplicemente da moti convettivi lenti. Per lo stesso motivo sul fondo dello strumento sono state posizionate due griglie forate di acciaio inox, che avevano lo scopo di permettere una alimentazione diffusa omogeneamente su tutta l'area di base dello strumento.

Nonostante tutte queste precauzioni, pur avendo ricostruito un ambiente molto "simile" a quello esistente nelle grotte prima dell'inizio dell'eduzione mineraria, non è stato possibile ripristinare in tutto e per tutto le condizioni naturali: infatti, temperatura delle acque termali è inferiore di 5-6 °C rispetto a quella originaria, mentre il suo flusso più rapido di quello naturale di un tempo.

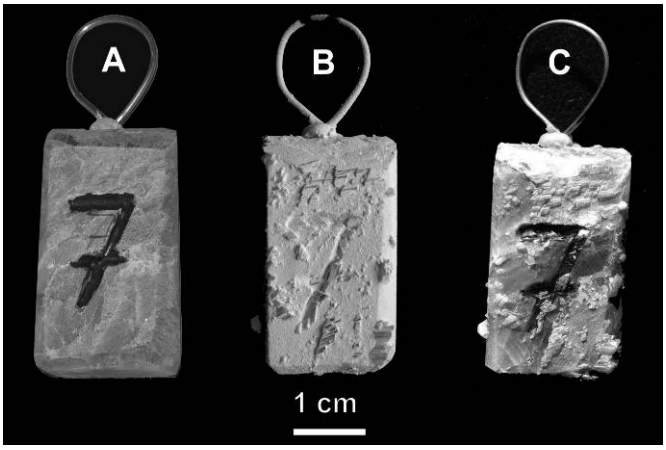

Fig. 7 – Una tavoletta di gesso prima di essere inserita nel bidone (A), al suo recupero il 3/02/2010 (B) e dopo aver asportato chimicamente tutto il carbonato di calcio (C)

Queste differenze hanno certamente una influenza sulla velocità di deposizione dei cristalli di gesso: per la temperatura è stato possibile valutarne quantitativamente l'impatto (SANNA *et alii*, 2010), mentre si è deciso di trascurare l'effetto della diversa velocità di flusso, data la sua scarsa rilevanza.

Una volta sistemato lo strumento all'interno del laboratorio si sono introdotte al suo interno 11 tavolette di gesso (Fig. 7) di cirica 66 cm^2, accuratamente pesate (v. Tab. 1).

Dopo poco più di 4 mesi è stata recuperata una prima tavoletta (5 di Tab. 1) sulla cui superficie si erano effettivamente sviluppati piccoli cristalli di gesso. Le analisi al microscopio ottico, e al microscopio elettronico a scansione (Fig. 8), poi, hanno evidenziato che i cristalli in formazione erano effettivamente euedrali e tutti isoorientati: avevano in pratica le stesse caratteristiche cristallografiche di quelli giganteschi naturali. Da quel momento ogni volta che si effettuava una nuova spedizione veniva recuperata un'altra tavoletta: è stato così possibile, dimostrare che l'aumento in peso delle stesse era proporzionale al tempo di immersione nell'acqua termale (Fig. 9).

Tabella 1

Tempo di permanenza, dati sperimentali di crescita di peso delle tavolette, di crescita annuale corretta per il temperatura e crescita radiale (mm). Gli asterischi si riferiscono alle tavolette recuperate il 3 Febbraio 2010, quando il bidone è stato rivenuto aperto, per cui la data di prelievo è stata fatta coincidere con quella presunta di apertura dello stesso (03/13/2009) (da SANNA *et alii*, 2011, modificata)

N	immissione	recupero	giorni	Δp(g)	Δg/yr	Δh/yr
1	18/11/06	03/12/09	1103	*1,877	0,604	0.040
2		18/05/07	191	0,382	0,730	0.048
3		28/02/08	485	0,780	0,587	0.038
4		03/12/09	1103	*2,003	0,738	0.048
5		27/03/07	139	0,234	0,614	0,040
6		06/09/07	302	0,524	0,633	0,041
7		03/12/09	1103	*2.210	0,711	0.047
8		03/12/09	1103	*1.989	0,640	0.041
9		persa				
10		03/12/09	1103	*1,878	0,600	0,038
11		03/12/09	1103	*1,892	0,608	0.039

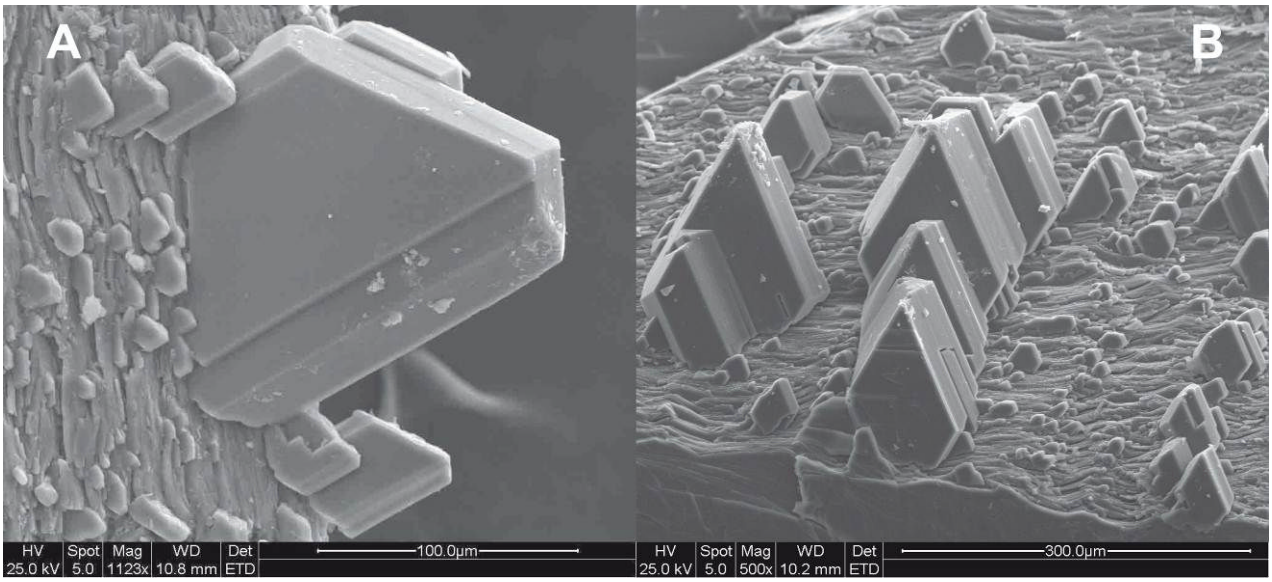

Fig. 8 – Immagini SEM della Tavoletta n.5 prelevata il 27/03/2007: A- un cristallo singolo di gesso di neoformazione; B- accrescimenti paralleli di cristalli di gesso

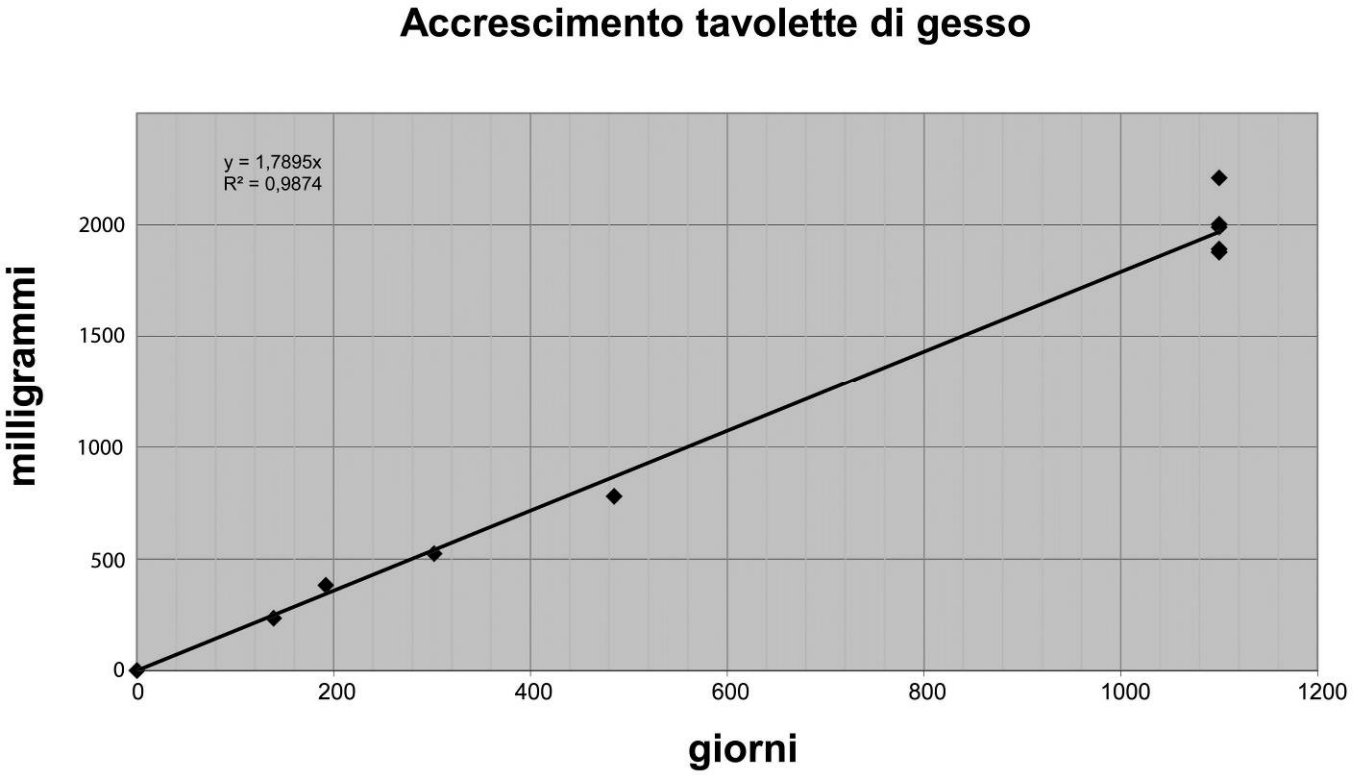

Fig. 9 – Didascalia della figura. (Stile: Didascalie figure) Se possibile posizionare le figure in alto o in basso alla pagina

Come precedentemente accennato, lo scopo principale degli esperimenti condotti nel laboratorio di -590 era quello di valutare il tempo necessario per lo sviluppo naturale dei cristalli di gesso più grandi e, dato che il loro sviluppo era ancora in atto al momento dello svuotamento delle grotte di -290 circa 20 anni fa, risalire anche a quando era iniziato il loro sviluppo.

Per ottenere questo risultato è stato necessario fare alcune assunzioni: la principale è stata quella di ritenere che lo sviluppo dei grandi cristalli sia avvenuto a velocità costante. Tale assunzione è abbastanza ragionevole dato che lo studio della temperatura delle inclusioni fluide all'interno dei cristalli delle grotte di -290 (GAROFALO *et alii*, 2008) ha dato valori molto stabili attorno ai 55-57 °C. Ora, poiché la precipitazione del gesso (Fig.10) all'interno delle grotte di Naica è avvenuta per il disequilibrio nella solubilità tra gesso e anidrite al di sotto dei 59°C (GARCIA RUIZ *et alii* 2007), il grado di sovrasaturazione è funzione della temperatura e quindi se quest'ultima è rimasta costante anche la sovrasaturazione e conseguentemente la velocità di deposizione non è variata.

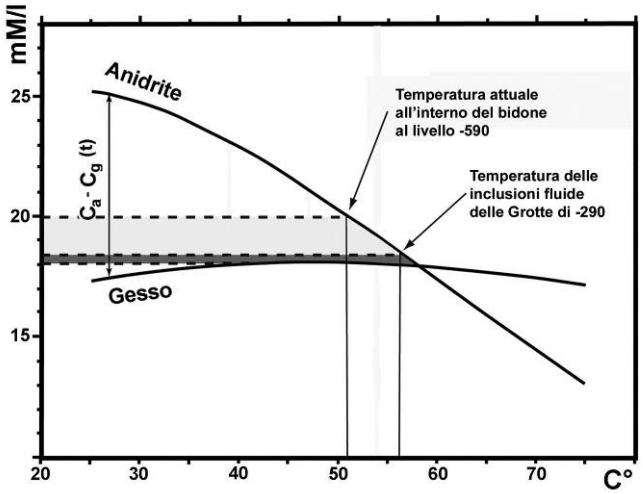

Fig. 10 – Disequilibrio nella solubilità di gesso in funzione della temperatura della soluzione: la temperatura nel bidone è inferiore a quella delle inclusioni fluide dei megacristalli (51° invece di 57°C). Questo fatto influenza la velocità di crescita per un fattore di circa 11 (modificato da GARCIA RUIZ *et alii*, 2007).

Partendo dal valore di accrescimento medio annuo ottenuto di 0,0,042 mm/anno, il tempo necessario per lo sviluppo dei cristalli più grandi, nelle condizioni esistenti all'interno del laboratorio, sarebbe stato di 21.400 anni. Bisogna però tenere presente che alla temperatura di 51° (quella delle acque all'interno del laboratorio) la sovrasaturazione del gesso rispetto all'anidrite è di ben 11 volte superiore di quella a che esisteva all'interno delle grotte di -290 ove la temperatura era vicino ai 57°C: pertanto il valore di accrescimento deve essere corretto di oltre un ordine di grandezza, risultando 0.004 mm/anno. Sulla base di questo dato, l'età per i più grandi cristalli di gesso di Naica risulterebbe dell'ordine di 200.000-250.000 anni.

Se poi consideriamo che altri fattori (quali la salinità della soluzione, e il moto turbolento della stessa) hanno influenzato, anche se in maniera molto inferiore, la velocità di deposizione nel senso di un suo piccolo aumento (FORTI & LO MASTRO 2008), è probabile che l'età dei cristalli più grandi sia un poco superiore : tra i 240.000 e i 270.000. In ogni caso questi valori

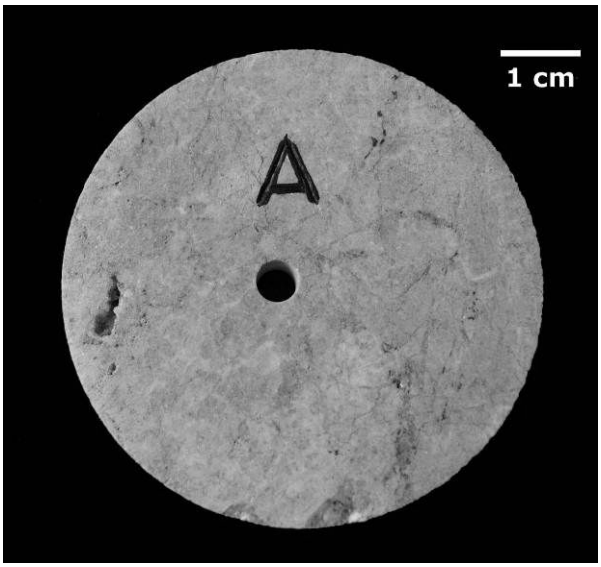

Fig. 11 – La tavoletta di calcare dolomitico utilizzata per l'esperimento di crescita del gesso nel laboratorio di -590

sono in perfetto accordo con quelli desunti dalle prime datazioni U/Th fatte sui cristalli di Naica (SANNA *et alii*, 2011).

Visto che l'esperimento di crescita dei cristalli per epitassia su substrato di gesso funzionava, sei mesi dopo l'inizio della sperimentazione, si è deciso di introdurre nel bidone anche 4 tavolette di calcare dolomitico prelevato dalla parete della Cueva de los Cristales (Fig. 11). Lo scopo era quello di verificare che effettivamente la deposizione avvenisse anche sulla roccia che costituisce le pareti delle cavità di -290. Anche in questo caso l'esperimento ha avuto successo (Tab. 2) e

Fig. 12 – Febbraio 2010: recupero del le tavolette dal bidone privo di coperchio e concrezionato di carbonato di calcio anche all'interno

Tabella 2
Tempo di permanenza e dati sperimentali di crescita di peso e spessore dell'unica tavoletta di calcare che è stato possibile analizzare

N.	immissione	recupero	giorni	Δp(g)	Δg/yr	Δh/yr
C	20/05/07	28/02/08	283	0,058	0,074	0,0043

inoltre ha dimostrato che la natura del supporto è di fondamentale importanza soprattutto nel primissimo periodo di sviluppo dei germi cristallini di gesso. Lo sviluppo per epitassia richiede infatti che la deposizione avvenga in continuità col reticolo cristallino della roccia ed evidentemente questo non poteva avvenire con un supporto di calcare, dove la deposizione può iniziare solo per nuova nucleazione, processo assolutamente poco favorito quando la sovrasaturazione è bassa.

La misura effettuata su una delle tavolette di calcare recuperata dopo 283 giorni (Tab. 2) ha confermato tutto questo: infatti il gesso depositato (per nuova nucleazione) era circa un decimo di quello che si era invece si era formato in un analogo lasso di tempo ma per epitassia, sul substrato gessoso.

L'esperimento avrebbe dovuto continuare per almeno uno o due altri anni solari, per poter vedere anche sperimentalmente come, di mano in mano che i cristalli di gesso crescono, parallelamente l'effetto inibente imputabile al processo di nuova nucleazione diminuisce.

Purtroppo, prima che fosse stato effettuato un secondo prelievo di una tavoletta di calcare, alla fine del 2009, il bidone è rimasto privo del coperchio stagno e quindi le tavolette si sono incrostate di carbonato di calcio (Fig. 12).

A differenza delle tavolette in gesso, che è stato possibile recuperare eliminando tutto il calare che vi si era depositato sopra, in questo caso ovviamente questa operazione non era possibile e quindi l'esperimento non è stato concluso.

ALTRE RICERCHE EFFETTUATE NEL LABORATORIO

Il ritrovamento di concrezioni di calcite, aragonite e gesso (FORTI *et alii*, 2008, GAZQUEZ *et alii*, 2011) avvenuto nella parte terminale e più profonda della Cueva de las Espadas, dove è evidente che ha stazionato per un lungo intervallo di tempo un laghetto di acque termali, ha spinto i ricercatori a cercare di definirne la genesi, che si supponeva correlata alla

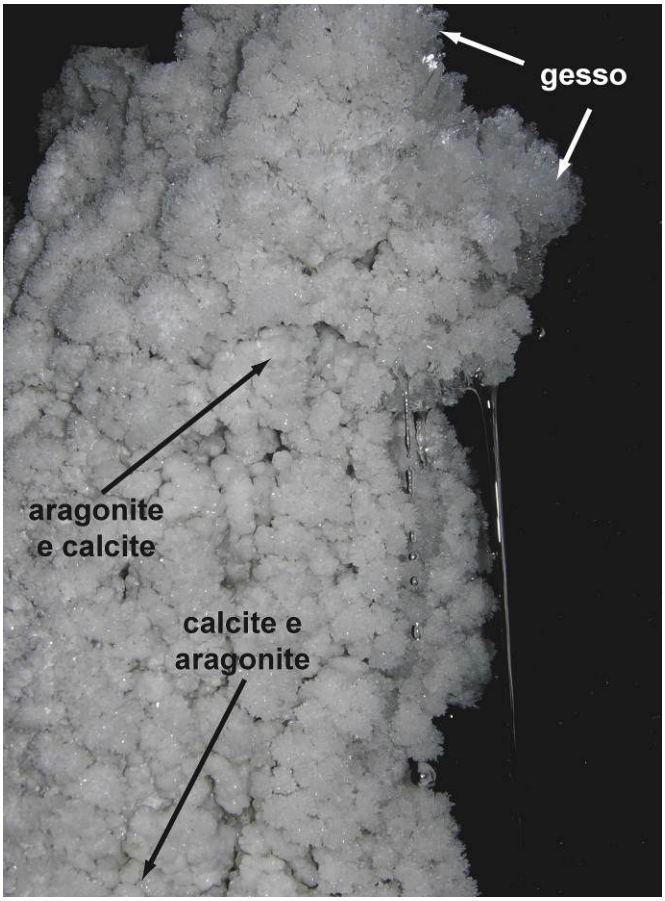

Fig. 13 – Concrezione naturale presente nel laboratorio di -590 che mostra tutta la sequenza deposizionale da parte delle scaturigini di acqua termale

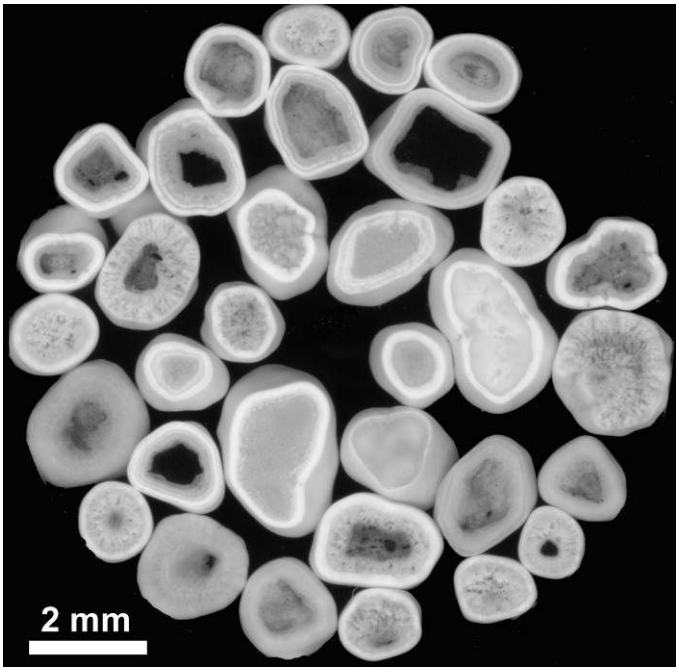

Fig. 14 – Sezione lucida delle pisoliti di livello -290: sono evidenti i differenti nuclei di gesso, calcare e dolomia

presenza CO_2 verso la soluzione satura di gesso, con conseguente precipitazione del carbonato di calcio meno solubile.

Anche in questo caso è stato fondamentale il laboratorio sotterraneo di -590, ove è stato possibile avere una verifica diretta di questo meccanismo genetico osservando i processi di deposizione chimica attivi in tutte le zone in cui si ha scaturigine di acqua termale (FORTI *et al.,* 2008). In particolare è stato possibile rilevare la formazione di gesso macrocristallino al contatto con le fuoriuscite di acqua calda che, rapidamente, non appena diventa attivo il processo di

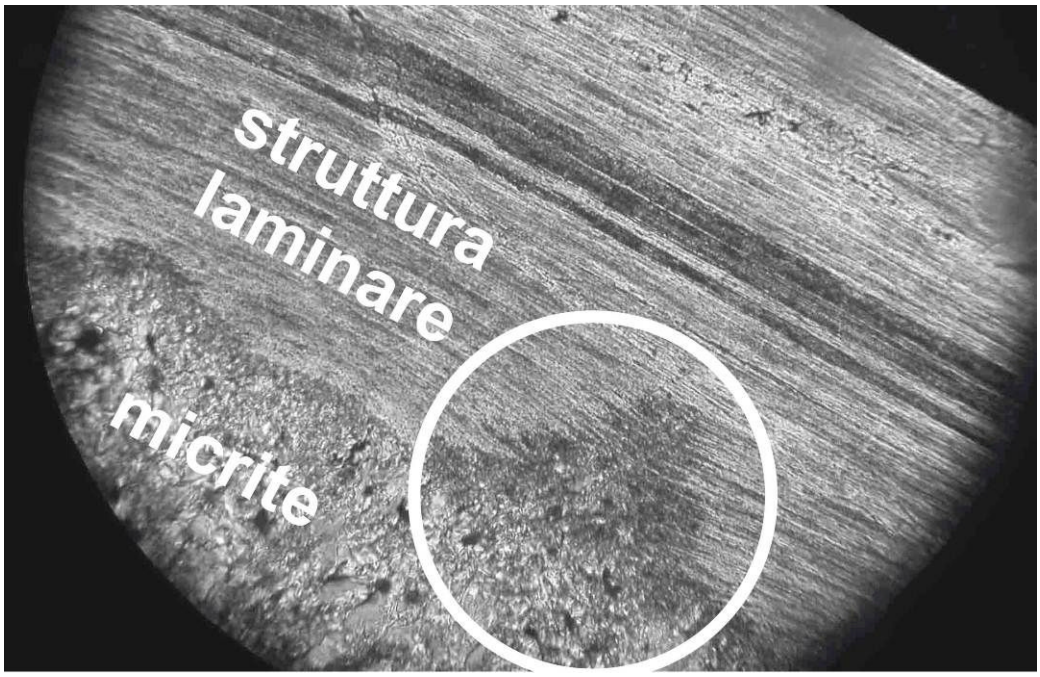

Fig. 15 –All'interno del cerchio è evidente ol fenomeno di "cannibalismo" da parte della struttura micritica sulla struttura laminare delle pisoliti di livello -590

diffusione della CO_2 dall'atmosfera alla soluzione, viene sostituito dalla formazione di aragonite e successivamente, con il progressivo raffreddamento della soluzione, da quella della calcite (Fig. 13).

Molto interessanti sono risultate le pisoliti di neo-formazione (<50 anni) (Fig. 14) sul pavimento della galleria mineraria fino ad una distanza di 10-20 metri dalla scaturigine termale del laboratorio: il loro nucleo, infatti è costituito da cristalli di gesso, o da frammenti di roccia calcarea, mentre la parte esterna è formata da sottilissime bande di calcite o di calcite associata a scarsa aragonite, come era logico aspettarsi a seguito del processo dovuto all'adsorbimento della CO_2 nella soluzione.

Particolarmente evidenti poi sono i fenomeni di "cannibalismo" da parte dei cristalli di calcite presenti all'interno delle pisoliti sulle sottilissime bande di accrescimento che caratterizzano la porzione più esterna delle pisoliti stesse (Fig. 15). Questo fenomeno ha permesso per la prima volta di stabilire sperimentalmente che la diagenesi da aragonite a calcite e da calcite microcristallina a calcite macrocristallina alle temperature del laboratorio (50-51°C) è estremamente veloce.

CONCLUSIONI

Il laboratorio sperimentale ipogeo "l'inferno", posizionato all'interno di una piccola cavità -590 metri all'interno della miniera di Naica (Chihuahua, Messico), pur avendo funzionato solo per poco più di quattro anni nel periodo 1996-2000, ha permesso di effettuare studi e ricerche particolari che non si sarebbero potute effettuare in nessun altro posto al mondo.

Purtroppo a causa di una imprevedibile decisione unilaterale presa alla fine del 2009 dalla compagnia Peñoles non è stato possibile completare tutti gli studi che inizialmente erano stati previsti.

A parte gli studi che vi sono stati condotti, resta comunque il fatto che questo laboratorio è stato, per un breve lasso di tempo, il più profondo al mondo.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la compagnia Peñoles per aver consentito l'accesso alla Miniera di Naica e per aver aiutato tutti gli scienziati coinvolti nello studio. Si ringrazia anche la S&F Speleoresearch and Film di Città del Messico per l'aiuto logistico e per il materiale fotografico.

BIBLIOGRAFIA

BADINO G., FORTI P., 2013 - *Naica caves: perhaps the most important mine caves of the world.* Atti Congresso Nazionale di Speleologia, Trieste, in stampa.

FORTI P., LO MASTRO F., 2008 - *Il laboratorio sperimentale di -590 nella Miniera di Naica (Chihuahua, Mexico)*: Mondo Sotterraneo, XXI (1-2): 11-26.

FORTI P., SANNA L., 2010 - *The Naica Project: a multidisciplinary study of the largest gypsum crystal of the world.* Episodes, 33 (1): 1-10.

FORTI P., GALLI E., ROSSI A., 2008 - *Il sistema Gesso-Anidrite-Calcite: nuovi dati dalle concrezioni della miniera di Naica (Messico).* Congresso Nazionale di Speleologia, Iglesias, Aprile 2007: 139-149.

GÁZQUEZ F., CALAFORRA J.M., FORTI P., RULL F., MARTÍNEZ-FRÍAS J., 2012 - *Gypsum-carbonate speleo-thems from Cueva de las Espadas (Naica mine, Mexico): mineralogy and paleoenvirnomental implications,* International Journal of Speleology, 41(2): 210-220.

GARCÍA-RUIZ, J.M., VILLASUSO, R., AYORA, C., CANALS, A., OTÁLORA, F., 2007 - *The Formation of Gypsum Megacrystals*: Geology v. 35, no. 4: 327-330.

GAROFALO, P.S., FRICKER, M., GÜNTHER, D., FORTI P., MERCURI, A. M., LORETI, M., CAPACCIONI, B., 2009 - *Climatic control on the formation of the gigantic gypsum crystals of the Naica caves (Mexico)?* Earth and Planetary Science Letters, 289 (3/4): 260-269.

HILL C.A., FORTI P., 1997 - *Cave minerals of the World*. National Speleological Society, Huntsville.

SANNA L., FORTI P., LAURITZEN S.E., 2011 - *Preliminary U/Th dating and the evolution of gypsum crystals from Naica Caves (Mexico)*. Acta Carsologica, 40 (1): 17-28.

E. Lana digit. VI.2016