



**“LE GROTTI DI NAICA: ESPLORAZIONE, DOCUMENTAZIONE, RICERCA”**

## **RIASSUNTI**

A cura di  
Paolo Forti



Sabato 15 Dicembre 2007  
Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali  
Università di Bologna  
Via Zamboni 67



## PROGRAMMA

### **Ore 8.30 Registrazione dei partecipanti**

- 9.15 *Parole di Benvenuto.* (Pierluigi Rossi, Direttore del dipartimento) ..... p. 7
- 9.20 *Introducing La Venta Esplorazioni Geografiche* (Antonio De Vivo) ..... 9

### **Relazioni Scientifiche**

- 9.30 1- *The Naica Project* (Antonio De Vivo, La Venta) ..... 11
- 9.45 2- *Geologia e idrogeologia di Naica* (Italo Giulivo, Marco Mecchia, Leonardo Piccini, Francesco Sauro, La Venta e Università di Firenze e Padova) ..... 15
- 10.00 3- *L'organismo umano e le Grotte di Naica* (Giuseppe Giovine, CNSAS e La Venta) . 19
- 10.15 4- *Il sistema di sopravvivenza nella Cueva de los Cristales, Naica* (Giovanni Badino e Giuseppe Casagrande, Università di Torino e La Venta) ..... 23

### **Ore 10.30-11.00 Pausa**

- 11.00 5- *Documentare le Grotte di Naica: le foto e i film* (Tullio Bernabei La Venta e Speleoresearch & Films, Mexico City) ..... 25
- 11.15 6- *Il rilievo con tecnologia laser scanner* (Roberta Tedeschi, Virtualgeo e La Venta) . 29
- 11.30 7- *Micro-meteorologia della Cueva de los Cristales, Naica*(Giovanni Badino, Università di Torino e La Venta) ..... 33
- 11.45 8- *The geochemistry of Naica Waters and their links with the mineral assemblages* (Sandra Briceño-Prieto, Raymundo G. Martínez-Serrano Juan Pablo Bernal, UNAM, Messico; Bruno Capaccioni, Università di Bologna) ..... 35
- 12.00 9- *Speleogenesi delle Grotte di Naica* (Paolo Forti, Università di Bologna e La Venta) 37
- 12.15 10- *Mineralogia delle Grotte di Naica* (Ermanno Galli, Antonio Rossi, Università di Modena - Paolo Forti, Università di Bologna e La Venta) ..... 39

### **Ore 12.30-14.00 pausa pranzo**

- 14.00 11- *Difetti strutturali e storia di crescita dei cristalli di gesso di Naica* (Eugenio Scandale, Università di Bari) ..... 43
- 14.15 12- *Crystal of Naica and immunology* (Emilio Jirillo, Università di Bari) ..... 45
- 14.30 13- *Il laboratorio sperimentale a -590 m nella Miniera di Naica* (Paolo Forti & Francesco Lo Mastro, La Venta e Università di Bologna) ..... 47

- 14.45 14- *Chronology and growth rate of the Naica gypsum crystals* (Stein Erick Lauritzen, Silviu Constantin, Università di Bergen, Norvegia, Paolo Forti Università di Bologna) ..... 49
- 15.00 15- *Fluid inclusion data from the Caves of Naica* (Paolo Garofalo, Università di Bologna, Fricker Mattias & Dettlef Gunther, ETH, Zurigo) ..... 51
- 15.15 16- *Estudio isotópico del yeso de Naica (Chihuahua, Méjico)* (Antonio Delgado, CSIC, Granada, José Maria Calaforra, Università di Almeria, Stein Erik Lauritzen, Università di Bergen, Paolo Forti, Università di Bologna) ..... 53
- 15.30 17- *Polline e spore di Cueva de Los Cristales e Cueva de Las Espadas* (Anna Maria Mercuri, Mara Loreti e Isabella Massamba N'siala, Università di Modena,) ..... 55

***Ore 15.45-16.00 pausa***

- 16.00 18- *Naica Geobiology project* (Penelope Boston, Università del Nuovo Messico ) .... 59
- 16.15 19- *¿Cual puede ser el futuro de las Cuevas de Naica?* (Josè Maria Calaforra, Università di Almeria, Giovanni Badino, Università di Torino, Paolo Forti Università di Bologna, Stein Erik Lauritzen, Università di Bergen, Antonio Delgado, CSIC Granada) ..... 61
- 16.30 *Discussione generale/General discussion* (modera Paolo Forti, Università di Bologna e La Venta)
- 17.30 **Chiusura del Convegno**

***Durante la giornata di studio sarà attiva nell'atrio del Dipartimento una postazione attrezzata per la visione in stereoscopia dei cristalli di Naica ad opera della Virtualgeo s.r.l.***

## **PARTECIPANTI**

(al 10 Dicembre)

**Abiuso Roberto**  
**Agolini Graziano**  
**Anghieri Alessandro**  
**Ayub Soraya**  
**Badino Giovanni**  
**Bellagamba M. Teresa**  
**Bernabei Tullio**  
**Bettega Stefano**  
**Boccanegra Valentina**  
**Boschin Walter**  
**Bottichiari Barbara**  
**Brun Clarissa**  
**Calaforra José Maria**  
**Canevese Erminio**  
**Camporeale Corrado**  
**Capaccioni Bruno**  
**Capella Walter**  
**Casagrande Giuseppe**  
**Castelli Enzo**  
**Chiesi Mauro**  
**Chignola Roberto**  
**Colalongo Luigi**  
**Colalongo Maria**  
**Chiara**  
**Columbu Andrea**  
**Conca Corrado**  
**Contarini Renzo**  
**Contessotto Mara**  
**Costa Paolo**  
**Cremonini Stefano**  
**Cucchi Franco**  
**Cucco Antonio**  
**Dal Rio Giorgio**  
**Dal monte Claudio**  
**Delgado Antonio**

**Dettlef Gunther**  
**De Vivo Antonio**  
**De Waele Jo**  
**Domenici Davide**  
**Donati Cristina**  
**Emiliani Giancarlo**  
**Ercolani Massimo**  
**Fabbri Pier Luigi**  
**Felice Gianluigi**  
**Ferrieri Paolo**  
**Finocchiaro Furio**  
**Forti Paolo**  
**Fregola Anna**  
**Gaddi Emanuele**  
**Galeazzi Carla**  
**Galli Ermanno**  
**Garofalo Paolo**  
**Gasparetto Paolo**  
**Gazquez Fernando**  
**Germani Carlo**  
**Giovine Giuseppe**  
**Giulivo Italo**  
**Grani Sergio**  
**Grimandi Paolo**  
**Gruber Natasha**  
**Jirillo Emilio**  
**Klotz Sophieein Erick**  
**Liverani Massimo**  
**Lo Mastro Francesco**  
**Loreti Anna**  
**Lucci Piero**  
**Mancini Claudia**  
**Marchesi Gianpietro**  
**Mecchia Marco**  
**Melone Nicola**

**Mercuri Anna Maria**  
**Mileca Adriana**  
**Montanino Daniela**  
**Naseddu Angelo**  
**Neuroni Fabio**  
**Pagliara Antonio**  
**Pasini Giancarlo**  
**Piancastelli Serena**  
**Pavanello Aurelio**  
**Pavarotti Alberto**  
**Pedrelli Romano**  
**Perissinotto M. Luisa**  
**Piccini Leonardo**  
**Pinna Giampiero**  
**Ponzoni Gabriele**  
**Rabbi Ernesto**  
**Razzuoli Massimo**  
**Roncoroni Maurizio**  
**Rossi Antonio**  
**Rossi Pierluigi Maria**  
**Sanna Laura**  
**Santini Antonella**  
**Savino Giuseppe**  
**Sauro Francesco**  
**Silvestro Chiara**  
**Sivelli Michele**  
**Tedeschi Roberta**  
**Todini Giuseppe**  
**Turina Alice**  
**Vai Giovanbattista**  
**Visentin Luca**  
**Zenegaglia Nucci**  
**Zick Tobias**  
**Zini Luca**



## PAROLE DI BENVENUTO

E' un grande piacere per me dare il benvenuto nel Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università di Bologna a tutti i partecipanti alla giornata di Studio sulle "Grotte di Naica: esplorazione, documentazione e ricerca".

In particolare ringrazio i relatori che, in alcuni casi, hanno affrontato un lungo viaggio per essere oggi presenti qui e condividere con noi le ricerche che stanno portando avanti.

Il Dipartimento da me diretto ha deciso da subito di appoggiare in toto questa manifestazione per vari motivi.

Innanzitutto la consapevolezza dell'attualità e dell'importanza del tema trattato: infatti, dalla loro scoperta nel 2000, attorno a questi eccezionali monumenti geologici si è manifestato un grande interesse mediatico cui è necessario rispondere anche in termini di scienza e conoscenza, ed è quello che si sta cominciando a fare organicamente proprio con la riunione di oggi.

A questo si aggiunge poi il giusto orgoglio di sapere che, in questo progetto, la ricerca geologico-mineralogica è coordinata, e in parte anche effettuata, da personale di questo Dipartimento.

Vi è poi il fatto, non secondario, che il carsismo e la speleologia, da sempre, hanno costituito un aspetto importante delle nostre attività: a cominciare da Capellini nell'ultima parte del 1800 per proseguire con Gortani nella prima metà del '900 e con gli accordi che, alla fine del secolo scorso, hanno portato alla realizzazione del Centro di Documentazione Speleologica "F.Anelli" e a fissare proprio presso di noi la sede ufficiale della Società Speleologia Italiana. Inoltre è sempre stata l'Università di Bologna nel 1984, prima in Italia, ad istituire un corso universitario di Speleologia.

Tornando al tema della Giornata di oggi, a mio parere, va posto l'accento sulla modernità e attualità di questo studio: si tratta infatti di un progetto "globale", multidisciplinare, non limitato all'ambito delle Scienze della Terra, che mira anche a dare un futuro stabile e certo a queste incredibili grotte, aspetto questo che è stato molto apprezzato quanto, nello scorso Ottobre, è stato presentato ufficialmente all'UNESCO.

Un altro aspetto che ritengo debba essere evidenziato è come questo progetto non sia stato predisposto e finanziato secondo i normali canali della ricerca, ma sia tutto merito di una Associazione, che, su basi assolutamente volontaristiche, ha ideato prima e coordinato poi i vari aspetti del progetto, trovandone anche, in buona parte, i finanziamenti necessari attraverso canali "non convenzionali". Credo che tutto questo debba essere ponderato attentamente e, in un certo senso, preso ad esempio da quanti, in futuro, vorranno continuare a fare studi di eccellenza anche in un periodo che vede i finanziamenti specifici per la ricerca ridursi sempre di più.

Con questo rinnovo il mio ringraziamento ai relatori e a quanti hanno reso possibile la riunione di oggi.

Buon lavoro,

Pierlugi Maria Rossi  
Direttore del Dipartimento  
di Scienze della Terra e  
Geologico-Ambientali  
dell'Università di Bologna



## INTRODUCING LA VENTA-ESPLORAZIONI GEOGRAFICHE

La Venta is an Italian no profit association that also includes explorers from Argentina and Mexico. Founded in 1990, La Venta organizes and carries out geographical and speleological multidisciplinary research projects all over the world. Since its foundation it has organized more than 50 expeditions, involving hundreds of cavers, researchers and experts in different fields. Throughout the years the group has grown to reach international recognition thanks to its successes, achieved in the course of research projects in remote areas of the Planet, at different latitudes and climate conditions.

The main projects carried out until now:

Samarkand Project, Uzbekistan

Rio La Venta Project, Mexico

Cuatro Ciénegas Project, Mexico

Ice caves Project, European glaciers, central Asia, Patagonia, Antarctica

Puerto Princesa Subterranean River, Philippines

Quartzite Project, Venezuela

The leading idea of La Venta is to widen the horizon of caving into a “geography of the underground world”. From the initial focus on caves, La Venta's explorations turn into complex endeavors that see the participation of large numbers of researchers. This leads to move from a single exploration expedition to a multidisciplinary project, that may take years to be completed.

La Venta's mission may be summarized into four main steps:

- **Exploration**, structured into:

- preliminary surveys
- technical and logistical planning
- exploration missions

- **Research**, including:

- cave mapping
- geology and hydrology
- mineralogy
- hypogeal climate
- archaeology
- medicine

- **Documentation and communication**, based upon:

- scientific papers
- popular magazines
- multi-language books
- photography
- documentaries
- collaboration with international producers and broadcasters

Producing high-quality documentation has always been one of the main aims of the Association; this has led to the publication of reportages on the most renowned national and international

---

<sup>1</sup> President of La Venta

journals, to the publication of five large-format books, to the making of two multimedia CD-ROMs and to the filming of numerous documentaries that have been broadcast all around the world.

- **Conservation, aiming at:**

- collaborating with local authorities
- contributing to the protection of natural reserves and endangered areas

La Venta often works in protected areas, national parks, Unesco World Heritage sites. In some occasions, as is the case of the *Reserva El Ocote* in Chiapas, Mexico, or the *Área Natural Protegida de Cuatro Ciénegas*, in Coahuila, La Venta's data have given local authorities the opportunity to obtain the widening of the sites and further resources. In other cases, La Venta's research and documentation work cast a light on unknown aspects of protected sites, i.e. the Puerto Princesa Subterranean River, Palawan, Philippines.

Further info at [www.laventa.it](http://www.laventa.it)



Fig. 1 – Dots locate the main areas in which La Venta made explorations and research

De Vivo A.<sup>2</sup>

## THE NAICA PROJECT

Naica is a typical mining centre in the state of Chihuahua, northern Mexico (latitude 27°52'00"N – longitude 105°26'15"W – altitude 1500 m asl). The name Naica seems to derive from the *tarahumara* words *nai* (place) and *ka* (shade), that is “*place in the shade*”, probably due to the shade cast by the isolated sierra on the surrounding plain.

The history of Naica is strictly connected to its mining activity, dating back to the end of the 18<sup>th</sup> century. Since 1998 the mine is property of the Compañía Minera Peñoles. The mine produces silver (second most productive in Mexico), gold, lead, zinc, copper.

In 1910, at a depth of 120 m, some miners discovered an 80 m long cave covered with 2 m long selenite crystals, Cueva de las Espadas.

In April 2000, the brothers Eloy and Francisco Javier Delgado, during an excavation at the depth of 300 m, discovered Ojo de la Reina, a small cave with big crystals. A few days later the miners discovered Cueva de los Cristales, hosting giant selenite crystals Fig. 1).

The environmental conditions were extreme (almost 50 °C, 100 % humidity) and the survival time did not exceed a few minutes.

In January 2001 a first visit to the cave was carried out by Carlos Lazcano, Claude Chabert, Enrique Alejandri Escoto and Carlos Valles Carrillo.

In May 2002 a first visit was carried out by La Venta: Tullio Bernabei, Antonio De Vivo, Italo Giulivo and Carlos Lazcano reached the bottom of the chamber filming and shooting photos.

In October 2002 a second visit organized by La Venta saw Giovanni Badino, Paolo Forti, Carlos Lazcano and Paolo Petrigiani. The first environmental measurements gave a temperature of 47.38 °C and humidity close to 100 %.



Fig. 1 – General view of Cueva de los Cristales (photo La Venta and Speleoresearch & Films)

---

<sup>2</sup> President of La Venta,

In the period 2004-2006 La Venta studies and produces specific equipment and exploration protocols for the cave extreme environmental conditions, which may be summarized into:

- Refrigerated suits
- Refrigerated breathers (heat exchangers)
- Communication devices
- Medical support and protocols
- Logistical support
- Rescue protocols

In 2006 a joint agreement for the study and documentation of the cave is signed by La Venta with Speleoresearch&Films, C/Producciones and Peñoles Mining Company (Fig. 2)

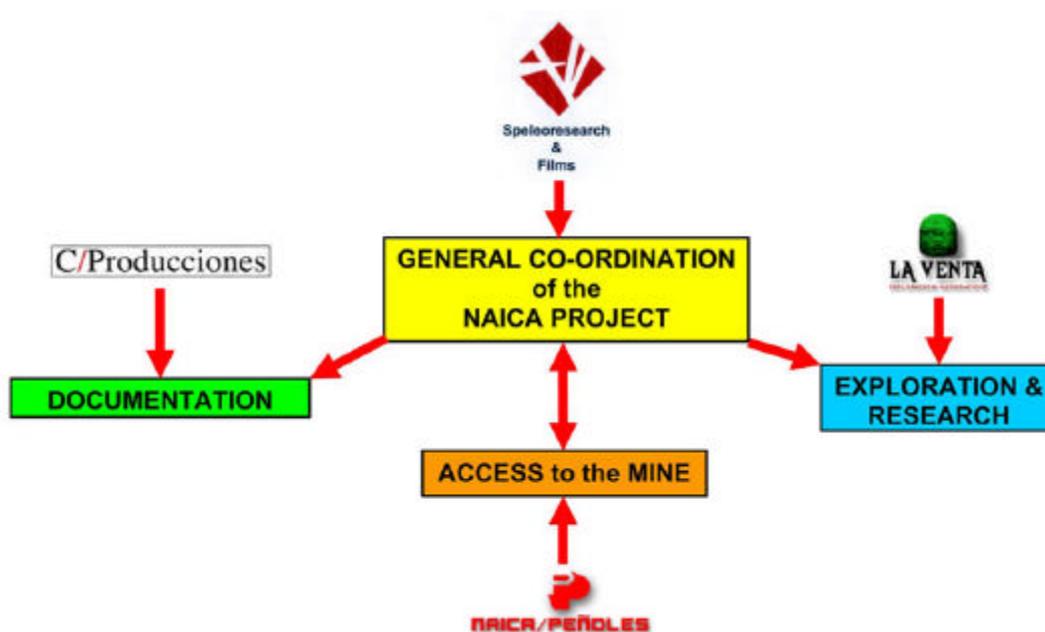


Fig. 2 – The structure of the Naica Project

The Project aims at giving an answer to the following main questions:

1. Why did such big crystals grow?
2. When did this happen?
3. How long did it take?
4. Which relationship exists between the ore deposit and the crystals?
5. Was the crystals evolution at least partially influenced by micro-organisms?
6. Did the evolution of the gypsum crystals lead to the formation of new shapes?
7. What was the speleogenetic evolution of the Naica caves?
8. Apart the gypsum crystals, what kind of speleothems are present in the natural caves of Naica?
9. What is the evolution of the caves now?
10. What is the impact of human activity?
11. How to preserve the caves of Naica and at the same time allow their public fruition?

For this reason a multidisciplinary team has been organized (Fig. 3)

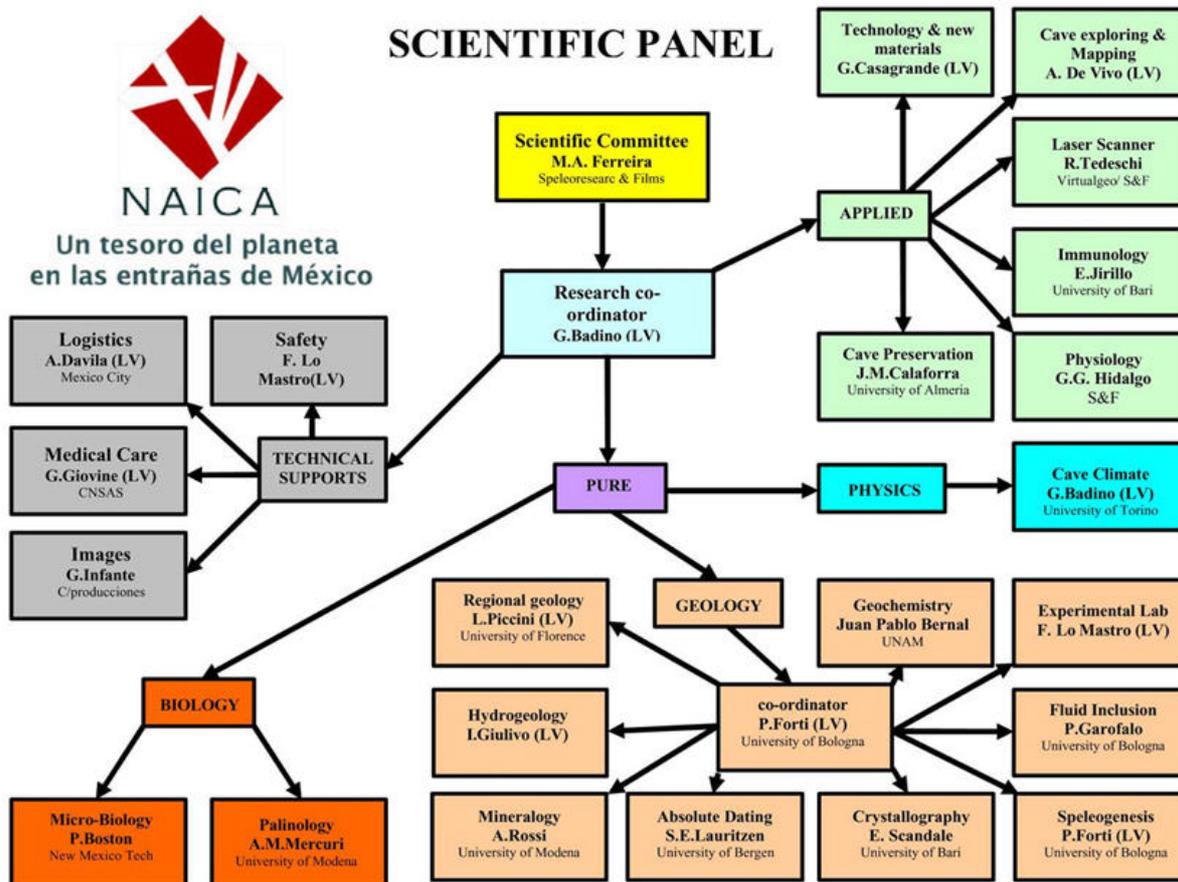


Fig. 3 – The scientific panel

*Involved universities and/or laboratories:*

- Università di Torino, Dip. Fisica Generale
- Università di Bologna, Dip. Scienze della Terra
- Università di Modena e Reggio Emilia, Dip. Scienze della Terra, Dip. di Paleobiologia
- Università di Firenze, Dip. Scienze della Terra
- Università di Bari, Dip. Geomineralogico, Dip. di Medicina Interna e Immunologia
- Politecnico di Milano, Polo Reg. Lecco, Laboratorio Sensibilab
- Virtualgeo srl, Sacile/PN, Venezia, Terni
- Universidad de Almeria, Spagna, Dep. de Hidrogeologia y Quimica Analitica
- Estacion Experimental del Zaidin - CSIC, Granada, Spagna
- Università di Bergen, Norvegia, Dept. of Earth Science
- ETH Zurich, Svizzera
- New Mexico Tech, Socorro, USA
- New Mexico University, Albuquerque, USA, Dept. of Biology
- Universidad Nacional Autonoma de Messico, Città del Messico, Instituto de Geologia

*Sponsors and technical supports*

- |                |                      |            |
|----------------|----------------------|------------|
| Electrolux     | G&D Cucine           | GTLIne     |
| Napajjiri      | Garmond              | Testo      |
| Livenza Viaggi | Driesen+Kern         | Set-in     |
| Ferrino        | Grotte di Castellana | VirtualGeo |
| Laura Ochner   |                      |            |



## L'ORGANISMO UMANO E LE GROTTI DI NAICA

L'uomo possiede un meccanismo capace di garantire l'*omeostasi termica* in condizioni di ampia variabilità della temperatura ambientale, di modo che possa essere garantita l'ottimale temperatura corporea di 37°C (in questa esposizione prenderò in considerazione, per ovvie ragioni, unicamente le variazioni relative all'incremento della temperatura). Tale processo va sotto il nome di *termoregolazione*, ovvero meccanismo capace di garantire un equilibrio fra riscaldamento e dissipazione del calore.

Il *riscaldamento*, consegue alla produzione endogena da parte dei processi metabolici, sia quelli di base che secondari all'esercizio fisico o condizioni patologiche, oltre che alla trasmissione al corpo del calore ambientale. A riposo, i processi metabolici di base producono circa 1kcl/kg/h, potendo così incrementare la temperatura corporea di 1,1 °C/h, se i processi di controllo della temperatura non funzionassero. In corso di attività fisica, la produzione di calore può incrementare più di 10 volte i livelli basali raggiungendo le 1000 kcal/h e oltre.

La *dissipazione*, segue la fisica della perdita di calore per conduzione, convezione, irraggiamento ed evaporazione. L'uomo rilascia calore nell'ambiente esterno tramite la traspirazione del sudore (*evaporazione*), l'irraggiamento (*radiazione*), tramite flusso d'aria e trasporto di calore in essa e nel vapore acqueo (*convezione*) ed ancora attraverso il contatto con superfici fredde (*conduzione*). Fra tutti questi meccanismi solo i primi due sono ad elevato rendimento ed efficacia. L'irraggiamento (di onde elettromagnetiche) può disperdere fino al 65% del calore in eccesso, ma è possibile laddove sia presente un gradiente termico fra il corpo e l'ambiente ( $t_{\text{ambiente}} < 35^{\circ}\text{C}$ ). L'evaporazione cutanea, con la sudorazione e la salivazione, può consentire la dispersione fino al 30% del calore, sempre che via sia una percentuale di umidità nell'aria tale da consentire l'evaporazione stessa. Pertanto: *quando la temperatura ambientale supera i 35°C*, l'unica modalità di dispersione del calore resta l'evaporazione, ma *quando l'umidità ambientale sfiora il 100%* anche l'evaporazione non è più efficace. In queste condizioni *il corpo perde totalmente capacità di dissipare calore*.

L'aumento della temperatura corporea determina delle modificazioni della circolazione sanguigna, finalizzate ad allontanare, dall'interno verso l'esterno, il sangue riscaldato per favorirne il raffreddamento. In questo modo gli organi vitali sono protetti dal surriscaldamento. Si verifica infatti una dilatazione dei vasi in periferia ed una costrizione di quelli centrali; il cuore aumenta la sua frequenza con un'accelerazione importante dei battiti ed un aumento considerevole della portata (quantità di sangue pompato nel tempo). Ci saranno cellule che inizieranno a soffrire di questa situazione: saranno così prodotti elementi tossici per l'organismo, ma al tempo stesso anche delle importanti *proteine ad azione protettiva*. La produzione di queste proteine protettive è funzione di un eventuale periodo di acclimatazione al regime di temperatura ed umidità, oltre che dalla presenza di malattie, debilitazione, età avanzata. E' pertanto fondamentale *acclimatarsi*, per adattarsi ad un clima caldo umido, soprattutto se in condizioni estreme. L'acclimatazione richiede da alcuni giorni ad 1-2 settimane per produrre i seguenti effetti:

- la sudorazione inizia più precocemente, in quantità maggiore ed a più basso contenuto di sali minerali. Un individuo non acclimatato produce circa 1 lt/h di sudore a mezzo del quale può disperdere 580 kcal. Un individuo bene acclimatato può arrivare a produrre 2-3 lt/h di sudore con una dissipazione di oltre 1700 kcal. Eseguendo un lavoro particolarmente pesante in una giornata di intenso calore, un individuo può arrivare a produrre 8-10 lt di sudore
- cardiovascolari: aumentano la gittata cardiaca e le performances cardiovascolari. La quantità di sangue che raggiunge la periferia del corpo, può arrivare fino ad 8 lt/min

---

<sup>1</sup> La Venta Exploring Team – Medico Speleologo

- endocrinologici: garantiscono il risparmio di sali minerali ed espandono il volume plasmatici
- renali, con un aumento delle capacità di filtrazione
- produzione delle proteine protettive nei confronti delle sostanze tossiche prodotte dalle distruzioni tissutali

E' bene ricordare che molte proteine, costituenti essenziali dell'organismo vivente, sono denaturate a temperature superiori ai 45°, perdendo la loro struttura tridimensionale, quindi le loro funzioni. Permanenze a 45° per tempi fra i 45' e le 8h sono causa di danni cellulari, che possono determinare la morte di tessuti.

Esistono due gradi diversi di *patologia da calore: lo sfinimento ed il colpo di calore.*

Lo sfinimento da calore si manifesta con valori di temperatura interna non superiori ai 41°C. i sintomi di accompagnamento sono vari e non specifici: affaticamento, debolezza intensa, senso di svenimento, nausea, vomito, cefalea, crampi e dolori muscolari, irritabilità psichica, tachicardia che non recede col riposo.



Fig.1- uno speleologo con sacchetti di ghiaccio sotto la nuca e le acelle per favorire la discesa della temperatura corporea (Archivio La Venta e Speleoresearch & Films)



Fig. 2- controlli dei parametri vitali dopo una lunga permanenza all'interno della Cueva de los Cristales (Archivio La Venta e Speleoresearch & Films)

Il colpo di calore si presenta con temperatura interna maggiore di 41°C. si manifesta soprattutto con disturbi psichici: perdita di coscienza, della capacità di giudizio, rallentamento dell'ideazione, allucinazioni, confusione, disorientamento, fino al coma. Ma anche con insufficienza cardiaca e shock, aumento della coagulabilità ematica, insufficienza renale ed edema polmonare.

Pertanto, al fine di migliorare le performances fisiche, ma soprattutto per ridurre le probabilità di patologia da calore è consigliato:

- effettuare un training di preparazione, che permetta un'acclimatazione ottimale. Per almeno una settimana occorre condurre un allenamento di circa 60-90 minuti al giorno, ad intensità crescente, ma soprattutto in condizioni di elevata temperatura ambientale
- fare precedere l'attività a rischio, da una doccia o un bagno caldo
- bere circa 400-500 ml di liquidi freschi, prima dell'esposizione. E' meglio che non sia semplice acqua, ma una soluzione a bassa concentrazione salina (circa 200mOsm/lit), come lo sono molti preparati per attività sportive
- controllare il peso corporeo prima e dopo l'esposizione, in quanto indice accurato della quantità di liquidi persi: perdite di peso inferiori al 3% non comportano alcun problema: previa reidratazione, si può continuare il lavoro. Perdite del 5-6% sono già a rischio: le perdite devono essere reintegrate, ma si può continuare praticando solo lavoro leggero, non trasportando pesi ad esempio. Perdite di oltre il 7% sono ad elevato rischio, si deve reidratare, ma si deve anche sospendere immediatamente l'attività e riposare

Inoltre l'attività deve essere immediatamente sospesa al comparire anche solo di uno dei sintomi sopra elencati.

E' opportuno gestire correttamente anche la fase di recupero, a termine dell'attività condotta all'interno della grotta, favorendo il raffreddamento corporeo:

- il corpo è meglio raffreddato se bagnato con acqua tiepida nebulizzata, sotto il flusso diretto di un potente ventilatore
- applicare sacchetti di ghiaccio a livello della nuca, delle ascelle e delle regioni inguinali
- *in caso di malessere grave nessun trattamento deve ritardare il trasferimento in ospedale*
- l'immersione diretta in acqua fredda è da evitare, perché causerebbe vasocostrizione periferica con un'inversione del flusso di sangue riscaldato, direttamente e massivamente, verso il centro del corpo. Comparirebbe tremore, quindi ulteriore innalzamento della temperatura corporea e perdita totale del sistema di controllo.

#### BIBLIOGRAFIA

Yarbrough B, Bradham A. Heat illness. In: Emergency Medicine: Concepts and Clinical Practice. 4th ed. St. Louis, Mo.: Mosby Year Book;1998:986-1002.

Robert S Helman, Heatstroke, eMedicine, Article Last Updated: Nov 9, 2007

Masterton J.M, Richardson F.A: 1979. Humidex, a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity, CLI 1-79. Environment Canada, Atmospheric Environment Service, Downsview, Ontario

A.I.E.S. Associazione Italiana Educazione Sanitaria, sezione Liguria. Prof.G.S.Badolati. Elementi di Educazione Ambientale



## GEOLOGIA E IDROGEOLOGIA DI NAICA

La miniera di Naica si trova nello stato di Chihuahua, nel Messico settentrionale, in un'area dal clima semiarido, con precipitazioni annue dell'ordine dei 400 mm. Da un punto di vista morfologico l'area è caratterizzata da una serie di basse dorsali, allungate in direzione NW-SE, costituite da strutture plicative e da thrust NE vergenti. La miniera si apre sul fianco settentrionale della sierra de Naica, una modesta dorsale anticlinalica, costituita da rocce carbonatiche, orientata NW-SE, lunga 12 chilometri e larga 7, che affiora da una vasta pianura alluvionale.

A livello regionale la sequenza carbonatica è costituita da calcari, calcari dolomitici e dolomie carbonatiche, a volte intervallate da interstrati lutitici, depositatesi su una sequenza evaporitica dell'Aptiano, che non è stata incontrata durante i lavori minerari, né con i carotaggi che si sono spinti oltre 1 chilometro di profondità. Attualmente quindi tutti i lavori minerari interessano solo parte della sequenza carbonatica.

Più in dettaglio, nell'area di Naica, la sequenza stratigrafica comprende, dal basso verso l'alto:

**Formazione Aurora (KiA)** - Si tratta della unità stratigrafica più antica affiorante nell'area. Sono calcari di piattaforma che raggiungono uno spessore di almeno 900 metri. Nell'area della miniera tale formazione è stata suddivisa in tre membri in base al grado di metamorfismo dovuto non solo all'originale natura della roccia ma anche alla vicinanza dei centri di mineralizzazione: *Membro inferiore*: non affiora nell'area ma s'incontra esclusivamente nelle zone profonde della miniera. Si tratta di un marmo grigio scuro in cui non si riconosce la stratificazione, probabilmente obliterata dal metamorfismo.

*Membro intermedio*: esposto in superficie sui versanti della Sierra de la Mina e nella miniera. Si tratta di un marmo grigio chiaro con stratificazione metrica ben preservata. Questo Membro ospita la totalità dei macrogeodi di selenite conosciuti.

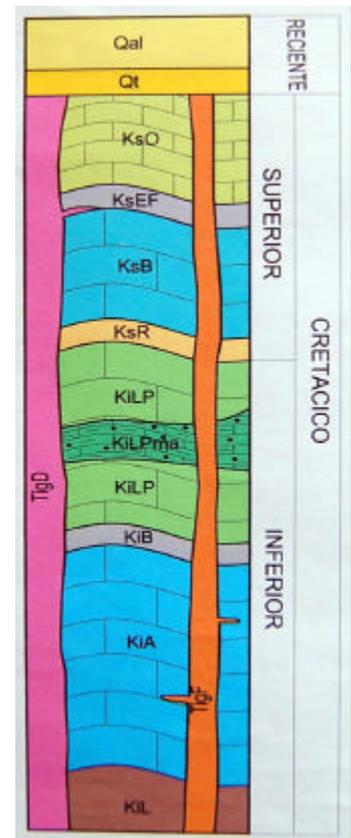
*Membro superiore*: s'incontra nelle zone sommitali della Sierra, non presenta marmorizzazione e consiste di un calcare fossilifero ricco di rudiste, gasteropodi e foraminiferi.

**Formazione Benevides (KiB)** - Lutiti calcaree e marne fossilifere di colore giallo oca, ricche di fossili. Affiora nella parte sommitale della Sierra de la Mina.

**Formazione Loma de Plata (KiLP)** - Affiora nel settore nord della Sierra de La Mina e in tutte le altre zone della Sierra di Naica. Si tratta di calcari a stratificazione massiva (da 0,6 a 2 metri) ricchi di fossili, con alcune intercalazioni argillose, ha uno spessore di circa 450 metri.

**Formazione del Rio (KiR)** - Non affiora nella Sierra de la Mina ma solo nella Sierra di Enmedio e del Monarca. E' un sottile strato di 30 metri di spessore costituito da lutiti di colore grigio chiaro.

**Formazione Buda (KsB)** - Calcari di colore grigio, di stratificazione media, con lenti argillose e strati fossiliferi alternati con orizzonti ricchi di noduli di selce. Non è presente nella Sierra de la Mina.



<sup>1</sup> Associazione Geografica La Venta

<sup>2</sup> Università di Firenze

<sup>3</sup> Università di Padova

Nella Sierra de La Mina s'incontrano dicchi felsitici con tessitura afanitica. Tali intrusioni si sono messe in posto attraverso un antico sistema di fratture orientato NW-SE o attraverso giunti di stratificazione. Le intrusioni sono state datate (K/Ar) a 26,2-25,9 My.

Molti autori hanno sottolineato l'importanza di tali dicchi nella genesi del giacimento minerario. In taluni casi si riconoscono, al nucleo dei corpi mineralizzati, dei residui della primitiva intrusione successivamente sostituiti da endoskarn.

Un rilievo magnetometrico ha evidenziato un'importante anomalia magnetica a circa a 1 km di profondità sotto alla sierra de La Perla. L'anomalia si estende sotto alla sierra de Enmedio fino alla valle che la separa dalla Sierra de la Mina. Recenti carotaggi nella Valle del Tiro Naica hanno incontrato un corpo igneo a circa 1140 metri di profondità. Confermando l'ipotesi che

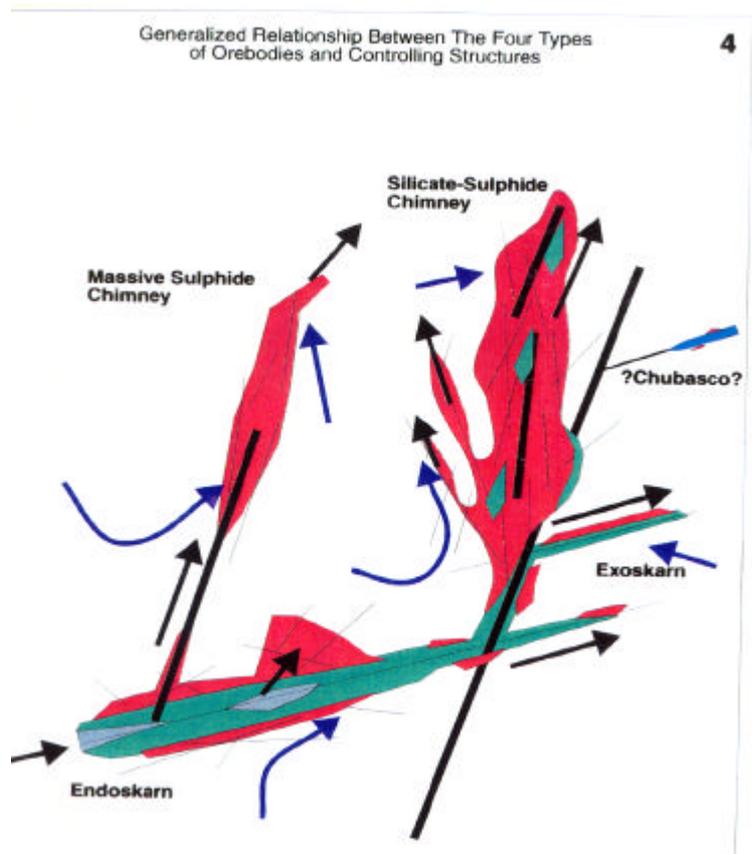
l'anomalia magnetica sia dovuta alla presenza di un batolite in raffreddamento tuttora allo stadio idrotermale. Tutta l'area mineraria è infatti ancora sotto anomalia termica: l'acqua che fuoriesce nelle gallerie minerarie ha una temperatura prossima a 53 °C, mentre uno studio recente ha evidenziato come queste acque siano d'infiltrazione meteorica con un circuito abbastanza lento, tanto che il loro tempo di residenza nell'acquifero è attualmente di oltre 50 anni.

La mineralizzazione a solfuri di Pb, Zn e Ag si è formata a seguito della circolazione idrotermale indotta dai dicchi terziari. I giacimenti, che assumono spesso la forma a "camino" si sono sviluppati sia all'interno dei dicchi sia nelle formazioni carbonatiche ospitanti: queste ultime, di conseguenza, sono molto alterate e in parte trasformate in calcosilicati. I principali minerali presenti nel giacimento sono: pirite, pirrotina, blenda, galena e calcopirite, mentre vene di quarzo, calcite e anidride si sono formate successivamente all'interno del giacimento, quando i fluidi idrotermali avevano perso parte della loro temperatura.

Il controllo strutturale sulla localizzazione delle masse mineralizzate è stato esercitato da due differenti famiglie di faglie, di cui rispettivamente le più importanti sono la faglia Gibraltar e la faglia Naica. Queste due faglie hanno da sempre controllato la circolazione idrotermale: anche oggi sono queste strutture che convogliano la quasi totalità delle acque nelle gallerie minerarie profonde e, non a caso, tutte le grotte incontrate dalla miniera sono in stretta connessione con loro.

Da un punto di vista idrogeologico, le sezioni tratte dalla carta geologica del Messico e lo schema paleogeografico del Cretaceo indicano che l'affioramento calcareo di Naica appartiene ad una grande piattaforma carbonatica del Cretaceo, che affiora su una vasta area in numerosi piccoli rilievi. Nonostante le deformazioni subite dopo la deposizione, i calcari sembrano avere continuità sotto i depositi alluvionali e vulcanici, e probabilmente anche collegamento idrico.

In mancanza di dati ed informazioni di dettaglio, possiamo considerare l'acquifero carbonatico come continuo e relativamente omogeneo. Dalle sezioni geologiche disponibili, lo spessore dei calcari può superare anche i 3000 m. Dove i calcari non affiorano la copertura può raggiungere spessori molto elevati. Per esempio, fra le sierra del Pajarito e Camargo il tetto della formazione

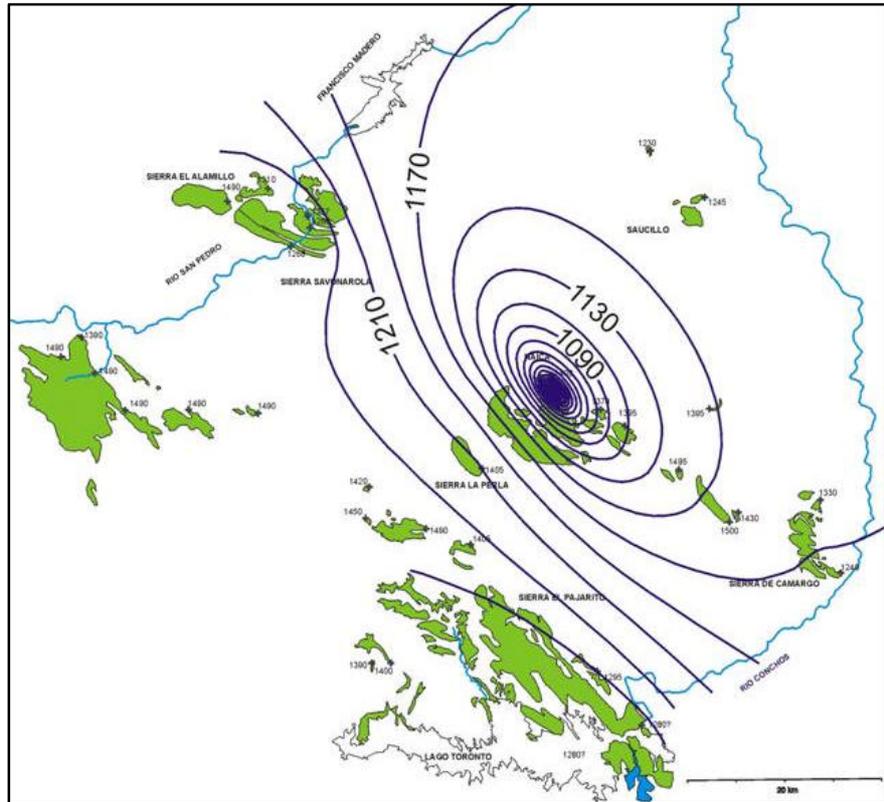


calcareo è a circa 1300 m di profondità, con inevitabili conseguenze sullo scorrimento delle acque sotterranee.

La regione compresa fra il Rio San Pedro e il Rio Conchos, al centro della quale si trova Naica, è caratterizzata da numerosi piccoli affioramenti di calcari, che emergono dalla pianura alluvionale formando una serie di colline (nella carta a fianco sono riportati solo gli affioramenti calcarei).

I lavori minerari hanno attualmente raggiunto una profondità di -760 metri, quindi 640 m sotto all'originario livello piezometrico: per procedere con l'estrazione dei minerali è necessario pompare circa 1 m<sup>3</sup>/s d'acqua.

Il pompaggio determina un abbassamento della superficie piezometrica il cui effetto sull'assetto idrogeologico a scala regionale può al momento solo essere ipotizzato sulla base di un modello approssimato dell'acquifero, ipotizzando che l'acquifero sia limitato alle sole rocce carbonatiche, considerate un mezzo omogeneo e continuo, e caratterizzato da una anisotropia con permeabilità preferenziale orientata come le principali famiglie di fratture, cioè in direzione NW-SE, in cui  $K_{max}$  è circa  $1 \times 10^{-5}$  m/s e  $K_{min}$   $2,5 \times 10^{-6}$  m/s. In questo quadro il cono di depressione avrebbe una forma allungata, parallelamente a quella delle strutture, ed un raggio di circa 30 km in direzione NW e SE, di 15 km in direzione SW e di 20-25 km in direzione NE.



### *Bibliografia*

- Erwood, R.J., Kesler, S.E., and Cloke, P.L., 1979; Compositionally distinct, saline hydrothermal solutions, Naica Mine, Chihuahua, Mexico: *Economic Geology*, v. 74, p. 95-108.
- Lang, J.R., 1995; A geological evaluation of the Naica deposit, Chihuahua, Mexico: Internal Report of Compañia Fresnillo. 109 pp.
- Megaw, P.K.M., Ruiz, J., and Tittley, S.R., 1988; High-temperature, carbonate-hosted Pb-Zn-Ag (Cu) deposits of northern Mexico: *Economic Geology*, v. 83, p. 1856-1885.
- Stone, J.G., 1959; Ore genesis in the Naica District, Chihuahua, Mexico: *Economic Geology*, v. 54, p. 1002-1034.



## **Il sistema di sopravvivenza nella Cueva de los Cristales, Naica**

La temperatura misurate nella Cueva de los Cristales, di per sé, non paiono eccezionalmente elevate, tanto che in certe zone esterne può essere largamente superata: i più alti valori di temperatura misurati in atmosfera libera sono stati di 58°C a El Aziz, in Libia, nel 1922 e di 57°C nella Death Valley, in California, nel 1913.

Il fatto, però, è che l'aria in quelle condizioni è estremamente secca e dunque il corpo umano può mantenere una temperatura cutanea normale grazie ad una continua evaporazione che permette la sopravvivenza anche per tempi relativamente lunghi, se si ha a disposizione acqua da bere.

Se invece l'aria si arricchisce di vapor d'acqua la situazione cambia in modo radicale. Da una parte il meccanismo di evaporazione cessa di funzionare e dunque diventa impossibile liberarsi del calore. Dall'altra, più gravemente, la pelle e l'interno dei polmoni risultano "pareti fredde" su cui il vapor d'acqua prende a condensare rilasciando il calore latente di evaporazione.

In pratica l'inibizione dei processi d'evaporazione fa sì che lo stare in un'atmosfera satura di umidità a temperature superiori a 35-37°C equivalga ad essere immersi in acqua corrente con quella temperatura, e perciò provoca in breve tempo un colpo di calore per l'impossibilità di smaltire il calore di base prodotto dal nostro corpo.

A temperature appena superiori, alla produzione di calore basale si aggiunge il calore ricevuto dall'ambiente e poi, al di sopra dei 42 °C la possibilità di ustioni perché si è superata la temperatura di denaturazione delle cellule.

La situazione è dunque che, se l'evaporazione cutanea è inibita, una temperatura ambientale al di sopra di 32-35 °C è fatale in tempi che dipendono dall'attività fisica ma che sono comunque relativamente brevi, dell'ordine dell'ora, mentre al di sopra dei 42 °C è fatale entro una quindicina di minuti e, inoltre, si ha il rischio di ustioni, soprattutto a livello polmonare e degli occhi.

Sin dall'inizio abbiamo escluso sistemi di condizionamento attivi. Avrebbero prodotto gas nocivi, la serpentina di scambio avrebbe dovuto lavorare a temperature alte in modo inaccettabile, c'erano problemi rilevanti per lo scambio termico col corpo ma soprattutto si sarebbe dipeso dal buon funzionamento di sistemi complessi, che sappiamo benissimo che in grotta non funzionano mai...

Abbiamo quindi optato per un sistema il più possibile passivo, in pratica utilizzare le enormi capacità di assorbimento di calore del ghiaccio in fusione: l'acqua è infatti la sostanza che ha di gran lunga le maggiori capacità di assorbimento di calore in fase di fusione. La massa di ghiaccio deve avere un doppio ruolo:

- 1) agire da schermo verso le alte temperature esterne;
- 2) assorbire il calore prodotto dalla nostra attività fisica.

Questo ha implicato delle scelte abbastanza complesse nel tipo d'accoppiamento termico fra il ghiaccio e la nostra pelle, da una parte, e fra il ghiaccio e l'ambiente esterno, dall'altra. Di fatto abbiamo dimostrato che le schermature ottimali verso la pelle e verso l'esterno dipendevano dalla nostra attività fisica molto più di quanto ci aspettassimo. In condizioni di riposo il corpo produce circa 100 W, ma in fase di lavoro dentro Cristales si andava verso i 3-400 W, superiori a quanto veniva incamerato direttamente dall'ambiente. Inoltre il flusso di calore sviluppato tende a concentrarsi in certi punti e quindi la distribuzione del ghiaccio ha richiesto numerose prove.

In pratica il sistema di protezione (denominato Tolomea, e realizzata dalla ditta Ferrino) ha una conformazione ormai abbastanza precisa ma che può essere modificata a seconda del tipo di attività prevista e delle preferenze personali.

---

<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Torino e La Venta

<sup>2</sup> La Venta



Fig 1 – A sinistra la tuta “Tolomea” e a destra il sistema di respirazione Sinusit (foto Archivio La Venta e Speleoresearch & Films)

Il sistema di respirazione (denominato Sinusit) ha pure un doppio ruolo:

- 1) permettere di respirare aria fredda;
- 2) soffiare aria fredda sugli occhi.

Il primo punto è fondamentale, perché l’aria di Cristales è probabilmente capace di provocare edema polmonare acuto se respirata per troppi minuti. Inoltre permette di liberarci del calore interno, soprattutto per evaporazione nell’aria espirata (20-30 W in condizioni normali) e sulla faccia.

L’apparecchio è basato sul flussaggio dell’aria esterna su un sistema passivo raffreddato dal ghiaccio. Purtroppo esso ha necessariamente delle parti attive, e quindi è stato quello che ci ha dato più problemi (ne abbiamo realizzato quattro versioni principali), che in alcuni casi sono stati drammatici.

Abbiamo cercato di semplificare al massimo il sistema, ma i problemi tecnici incontrati e superati sono stati davvero notevoli: ottimizzazione delle sezioni di scambio e di flusso dell’aria, eliminazione delle acque di condensazione, forma, massa del capacitore, tipi di ventole, tipi di maschere. Finalmente il risultato è soddisfacente e si presta ad ulteriori sviluppi ed impieghi.

Allo stato attuale con Tolomea e Sinusit possiamo contare su un’autonomia “al freddo” di circa 50 minuti con attività fisica pesante; la permanenza che può allungarsi di altri 20 minuti in condizioni però progressivamente più disagiati.

Con attività fisica molto limitata e adattamento al caldo pensiamo che si possa superare ampiamente il record attuale (80 minuti) arrivando al limite delle due ore.

Concludiamo ricordando che nei primi mesi di sviluppo tenevamo riservato il modo di funzionamento di tute e respiratori per evitare che altri potessero copiarli e utilizzarli per estrarre cristalli dalle grotte di Naica. In realtà, col tempo, ci siamo accorti che i veri segreti di questi sistemi di sopravvivenza non stanno nelle meravigliose proprietà delle fasi dell’acqua, ma nei dettagli costruttivi.

Bernabei T.<sup>1</sup>

## DOCUMENTARE LE GROTTI DI NAICA: LE FOTO E I FILM

Fin dalle prime entrate conoscitive nella Cueva de los Cristales e nelle altre cavità calde scoperte all'interno della miniera di Naica (Chihuahua, Mexico), iniziate nell'anno 2002, apparvero evidenti due elementi fondamentali: da un lato la necessità di documentare in modo rigoroso e qualitativo questi gioielli unici del mondo ipogeo; dall'altro le grandissime difficoltà tecniche e logistiche che avremmo dovuto superare per farlo.

Il clima interno della Cueva de los Cristales e della Cueva de las Velas (in misura molto minore quello dell'Ojo de la Reina), caldissimo e umido, pone infatti a chi si proponga di fare documentazione in questi ambienti delle problematiche oggettivamente complesse.

La prima è la condensa che si forma su qualsiasi apparecchio foto o video (sia corpo che ottiche), difficile da eliminare e che manda spesso in allarme anche i sensori antiumidità; la seconda è la resistenza delle macchine a lunghe esposizioni in un ambiente caldo-umido estremo; vi è poi il problema generale del poter rimanere all'interno delle grotte il tempo sufficiente ad illuminarle in modo idoneo, realizzare le immagini e verificarne la qualità finale.

E' stato necessario circa un anno di tempo, con 4 missioni, per arrivare ad una soluzione ragionevole di questi problemi. Soprattutto nella parte video-cinematografica si sono rivelati fondamentali le ricerche, i test e lo sviluppo tecnologico realizzati dalla società produttrice messicana C/Producciones, incaricata dalla Speleoresearch&Film (proprietario dei diritti d'immagine) della gestione di questi aspetti.

Si delineano qui i principali risultati cui si è giunti, allo stato attuale del progetto, nel campo della documentazione foto e video.

Le problematiche tecniche legate al clima caldo umido e alla condensa sono state fondamentalmente risolte con il preriscaldamento delle apparecchiature mediante la loro immissione nell'ambiente della grotta all'interno di custodie ermetiche. Ciò ha consentito il riscaldamento progressivo senza gli effetti di condensa sul corpo e sulle ottiche, nonché una sorta di "acclimatazione" che ha permesso alle varie macchine di resistere per molte ore di lavoro continuativo senza manifestare particolari problemi. In due anni di sperimentazioni sono state "persi" soltanto un paio di telecamere e un apparecchio fotografico, a fronte di alcune centinaia di ore di lavoro in ambienti estremi con l'impiego di moltissime attrezzature..

Superato questo primo ostacolo di base, la sfida è stata la realizzazione di foto e riprese nonostante i brevi tempi di permanenza interna a disposizione dell'uomo. Fin dall'inizio è stato chiaro che, ferme restando le possibilità di foto d'azione e reportage scattate durante le incursioni umane, il grosso del lavoro avrebbe dovuto essere svolto da uno o più robot.

La C/Producciones ha realizzato allo scopo diversi prototipi, perfezionati nel corso del tempo sino agli attuali due, denominati "Aktun" e "Aktuncito", basati su un sistema di movimento a cinghiaggio guidato da motori elettrici di derivazione astronomica.

I robot (fig. 1), che possono montare sia fotocamere che videocamere o cineprese, sono in grado di ruotare di 360° sul piano orizzontale e di quasi 180° su quello verticale. Vengono comandati via cavo da una centrale di controllo posta nella galleria all'esterno della grotta, mediante un software appositamente sviluppato.

Naturalmente l'intervento umano rimane necessario sia per lo spostamento all'interno delle cavità dei robot stessi, montati su pesanti cavalletti, sia per l'illuminazione delle scene. A quest'ultimo

---

<sup>1</sup> La Venta, Speleoresearch & film, Mexico City



Fig. 1 – il robot per le riprese foto.cinematografiche (Archivio La Venta e Speleoresearch & Films)

aspetto è stata dedicata una particolare attenzione vista l'unicità ma anche la complessità dei soggetti da riprendere.

In generale per le riprese d'azione, realizzate dall'uomo, sono stati utilizzati flash fissi (o poco decentrati) sulle fotocamere e illuminatori standard per le videocamere, sfruttando le luci d'ambiente di base installate dalla compagnia concessionaria della miniera, la Peñoles.

Per le foto e riprese da robot sono state utilizzate, oltre a quanto sopra, anche deboli luci diffuse a base di led. Nelle scene complesse si è arrivato al posizionamento di 10-12 punti luce.

Le sequenze robotizzate più impressionanti, con panoramiche molto ampie sui vari settori della Cueva de los Cristales, sono in realtà una lunga sequenza di fotografie ad alta definizione, scattate in automatico con medie-lunghe esposizioni ogni 6 secondi e dopo uno spostamento del robot di 1/16 di grado lungo una rotta prestabilita a tavolino. Con questa tecnica, decisamente innovativa nel campo della documentazione sotterranea e non solo, si è realizzata in circa 5 ore di lavoro una media di 1.200 scatti a 10 megapixel cadauno.

Mediante un software dedicato le foto sono state unite, esattamente come i fotogrammi di un video, fino ad ottenere straordinarie sequenze di movimenti lenti e continui della durata di 10-20 secondi ciascuna. L'unico difetto, se così può essere chiamato, è che con questo sistema non è evidentemente possibile utilizzare modelli umani.

Per comprendere la complessità e laboriosità di tali operazioni è necessario pensare che per una singola sequenza video sono indispensabili: un'ora per il posizionamento del cavalletto; 1-2 ore per

il posizionamento delle luci, realizzato da 2-3 tecnici con brevi entrate-uscite della durata di 10' ciascuna; infine 5 ore di lavoro del robot. Ciò equivale a dire che per 15" di video di altissima qualità è necessaria almeno mezza giornata di lavoro di una equipe di 6-8 persone, in un ambiente che – giova ricordarlo – è ampiamente fuori dagli standard di sopravvivenza umana.

Allo stesso modo, per ottenere foto di alto livello è stato necessario, per ogni fotogramma riuscito, un impegno di alcune ore e almeno 5-6 persone.

Complessivamente al novembre 2007 sono state realizzate nell'ambito del Progetto Naica oltre 150 ore di filmato, delle quali più del 50% in grotta; scattate circa 30.000 fotografie, prevalentemente digitali e anche con tecniche stereoscopiche. Sono stati realizzati anche esperimenti di foto panoramiche, da perfezionare, e l'illustrazione fotografica di quasi tutte le battute del rilievo topografico di dettaglio (fig. 2).



Fig. 2 Documentando il rilievo topografico (Archivio La Venta e Speleoresearch & Films)

Il frutto e la qualità della documentazione hanno consentito pubblicazioni su magazine della massima importanza sia in Italia che all'estero. In particolare la rivista italiana ed europea GEO ha dedicato nel 2007 molto spazio alle nostre missioni, mentre il National Geographic magazine si appresta a farlo nel corso del 2008.

Dal punto di vista del video la straordinarietà del soggetto e dell'ambiente che lo circonda, cioè una miniera attiva e una cittadina che ruota attorno ad essa, hanno creato i presupposti per la realizzazione di un lungometraggio destinato alle sale cinematografiche (produzione gennaio 2008) e di un documentario scientifico internazionale (National Geographic Channel, Discovery Channel, Arte France, produzione febbraio 2008).

La nostra speranza è che in ultima analisi l'imponente lavoro di documentazione e di "racconto" di queste grotte meravigliose e delle nostre ricerche sia il presupposto per la loro conservazione, senza asportazione di macrocristalli, anche in vista della fine dell'attività estrattiva. E allo stesso tempo un veicolo di promozione e creazione di alternative occupazionali per i minatori e per la gente di Naica.



Roberta Tedeschi<sup>1</sup>

## **IL RILIEVO CON TECNOLOGIA LASER SCANNER**

La Cueva de los Cristales e la Cueva de las Espadas sono le più grandi tra le cavità presenti tra i 180 e i 300 metri di profondità all'interno della miniera di Naica, città mineraria a 130 km sud-est da Chihuahua, nel Messico settentrionale. Le cuevas sono rivestite di cristalli di selenite, formati da lamine composte in forme incredibili che danno origine ai toponimi delle cavità.

Nel quadro delle indagini riguardanti lo studio della topografia delle grotte, l'intervento di Virtualgeo nel Progetto Naica è consistito nel rilievo con laser scanner delle Cuevas de los Cristales e de las Espadas. La fase di campagna del rilievo si è svolta nel maggio 2007, in occasione della prima spedizione ufficiale nella grotte della miniera di Naica, in collaborazione con Speleoresearch & Film, La Venta e C/Producciones. Il rilievo è finalizzato alla produzione di modelli digitali 3D di elevata precisione, completi di colore, della morfologia e dell'aspetto delle grotte e dei cristalli. I modelli 3D sono destinati a scopi scientifici (studio "a distanza", monitoraggio ambientale, simulazioni e valutazioni di ipotesi per la conservazione delle grotte) e divulgativi (accessibilità virtuale e semi-immersiva – stereoscopia – per il vasto pubblico, valorizzazione e promozione del sito).

La criticità del rilievo per gli ambienti ipogei è legata all'irregolarità delle superfici verticali e orizzontali, difficili da acquisire con un alto livello di dettaglio, misurare, confrontare, visualizzare con le tecniche tradizionali di rilievo, quali il rilievo topografico e fotogrammetrico. Risulta difficile individuare un metodo di rilievo morfometrico valido per tutti questi tipi di ambiente che sia il più possibile automatizzato e che soddisfi i requisiti di ogni tipo di applicazione, minimizzando le incertezze della misura, riducendo tempi e costi delle operazioni in campagna e in fase di elaborazione dei dati, incrementando nel contempo la quantità e la qualità dell'informazione acquisita. In tale direzione il rilievo con strumentazione laser scanner dà riscontro per la rapidità con cui rileva la morfometria di vaste superfici complesse, per la densità, la precisione e la completezza dei dati acquisiti rispetto alla strumentazione topografica tradizionale.

Le grotte di Naica presentano in aggiunta, rispetto ad altri ambienti ipogei, caratteristiche peculiari che rendono difficoltoso il rilievo, con qualunque strumentazione venga effettuato.

Le operazioni di rilievo nelle grotte di Naica si sono svolte in condizioni ambientali sfavorevoli sia per la fisiologia degli operatori sia per il funzionamento della strumentazione laser scanner (48°C di temperatura e umidità vicina al 100% nella Cueva del los Cristales).

Il funzionamento del laser scanner impiegato viene infatti garantito dal produttore per temperature comprese tra i 5° e i 40°C e in assenza di condensa per quanto riguarda il grado di umidità tollerabile. Inoltre, l'attrezzatura necessaria al rilievo (laser scanner, laptop, cavi, dispositivi per l'alimentazione elettrica, etc.) doveva essere spostata e installata su una pavimentazione non rettilinea e non libera da ingombri, bensì irregolare e coperta di cristalli. Il microclima proibitivo, unito alla mobilità limitata e rischiosa tra i cristalli, ha avuto ricadute anche sull'operatività dei tecnici che hanno potuto lavorare solo indossando tute e calzature appositamente predisposte per l'intera spedizione da La Venta e muovendosi tra i cristalli con estrema cautela.

Il laser scanner impiegato per il rilievo delle grotte di Naica è a tempo di volo (TOF, time of flight): calcola la distanza dell'oggetto rilevato misurando i tempi di andata e ritorno dell'impulso luminoso inviato. L'emissione di impulsi laser con passi angolari costanti, orizzontali e verticali, produce una griglia di misura regolare la cui densità determina la risoluzione del rilievo. L'intensità della radiazione luminosa riflessa dipende dalla distanza del punto misurato oltre che dal tipo di materiale e dallo stato della superficie riflettente. È la riflettanza del materiale, data dal rapporto tra intensità di radiazione riflessa e intensità di radiazione incidente, a fornire dunque informazioni sulle superfici misurate e sui materiali costituenti.

---

<sup>1</sup> Direttore Tecnico Virtualgeo srl & La Venta, e-mail: [roberta.tedeschi@virtualgeo.it](mailto:roberta.tedeschi@virtualgeo.it)

I mega-cristalli di selenite di Naica sono dei solidi caratterizzati da trasparenza translucida, singoli o geminati e in genere molto allungati. Le macro dimensioni dei cristalli, e in particolare il grosso spessore, li rendono pertanto rilevabili con strumentazione laser scanner.

Il laser scanner impiegato per il rilievo delle grotte di Naica (fig. 1) sfrutta la tecnologia “phase shift” che calcola la distanza dell’oggetto rilevato per “confronto” di tre impulsi di ritorno aventi differenti lunghezza d’onda



Fig. 1- Un momento dell’acquisizione dati all’interno della Cueva de los Cristales (Archivio La Venta & speleoresearch & Films)

Sono state eseguite in tutto 4 scansioni all’interno della Cueva de las Espadas e della Cueva de los Cristales acquisendo le coordinate spaziali e il valore cromatico RGB (questo grazie alla fotocamera incorporata al laser scanner che ha effettuato nel contempo 40 riprese fotografiche, 10 per ogni scansione) di oltre 43 milioni di punti. La permanenza all’interno delle grotte per tutte le operazioni necessarie al rilievo è stata complessivamente di 3 ore (distribuite in 2 giornate di lavoro), di cui 15 minuti impiegati per effettuare le scansioni.

Il post-processamento dei dati acquisiti, previo allineamento delle scansioni della Cueva de las Espadas, è stato condotto con software proprietario di Virtualgeo in ambiente AutoCAD® (CloudCUBE 2008) e ha comportato un accurato lavoro di “pulitura” e filtraggio delle nuvole di punti per eliminare il “rumore” e i punti non significativi. La successiva fase di lavoro è consistita

nella modellazione 3D in ambiente AutoCAD® della morfologia della Cueva de los Cristales e dei suoi cristalli con software CloudCUBE 2008.

#### Le scansioni: i numeri

	Cueva de los Cristales	Cueva de las Espadas
Numero scansioni acquisite	1	3
Numero punti acquisiti	13.180.893	30.032.525
Numero immagini 2D acquisite	10	30
Quantità dati laser acquisiti	1 gigabyte	3 gigabyte
Quantità immagini 2D acquisite	45 megabyte	135 megabyte

#### La strumentazione: specifiche

Modello laser scanner	CAM2 LS 880	
Distanza	0,6 m-76 m	
Velocità di misura	120.000 punti/secondo	
Errore di distanza lineare	±3 mm a 25 m	
Campo visivo verticale	320°	
Campo visivo orizzontale	360°	
Durata della scansione	2 milioni di punti in 20 secondi	
Peso	14,5 kg	
Modello fotocamera incorporata	Nikon D70	
Pixel	6.1 M	

La ricostruzione 3D della Cueva de los Cristales è il risultato di un'indagine pilota che partendo dalla necessità di documentare nel modo più completo possibile delle superfici complesse ha trovato una soluzione praticabile, anche alla luce delle criticità del contesto specifico, nella tecnologia laser scanner e nell'approccio metodologico del reverse modelling. Un risultato che è estensibile agli altri ambienti: i modelli digitali 3D permetteranno ai ricercatori di effettuare studi geomorfologici delle cavità, svincolandoli dall'obbligo di esservi fisicamente presenti e avendo a disposizione un database geometrico tridimensionale di alta precisione.

Oltre a un fondamentale supporto documentario d'interesse specialistico, i modelli 3D potranno essere impiegati per la divulgazione al pubblico, ad esempio attraverso applicazioni per la fruizione virtuale e stereoscopica delle cuevas: una possibile soluzione al conflitto tra la necessità di far conoscere l'unicità del fenomeno delle grotte di Naica e le restrizioni imposte dalle esigenze di conservazione e dalle condizioni ambientali.



G. Badino<sup>1</sup>

## MICRO-METEOROLOGIA DELLA CUEVA DE LOS CRISTALES, NAICA

Lo studio micro-meteorologico della Cueva de los Cristales, ed in generale delle grotte di miniera di Naica, è assolutamente fondamentale per la protezione di queste meraviglie della natura, ma è particolarmente difficile da condurre.

Le condizioni ambientali sono veramente ostili per gli operatori, ma pongono problemi ardui anche alle attrezzature che devono essere condizionate prima delle misure e analizzate in dettaglio per capirne il comportamento in un ambiente di questo genere.

Il problema più grave è però di un tipo più fondamentale: a differenza della massima parte delle grotte conosciute, le grotte di Naica non sono in stato di equilibrio, cioè in uno stato stazionario, ma sono in una fase transiente.

Il loro stato naturale è a 170 m di profondità in acqua a circa 55 °C, ben diverso dalla situazione attuale. I processi che vi avvengono sono quindi fortemente dipendenti dal tempo, e questo rende molto difficile sia le misure che, soprattutto, la loro interpretazione.

Le inclusioni fluide nei cristalli hanno permesso di determinare le temperature di formazione (55-56 °C) mantenuta sino a circa il 1990; noi abbiamo realizzato misure puntuali nel 2002 e poi in modo abbastanza sistematico a partire dall'inizio del progetto (gennaio 2006) anche se proprio le condizioni ambientali ci hanno obbligato a diverse ristrutturazioni dei sistemi di acquisizione. In pratica la Cristales è stata monitorata con venti sensori termometrici, cui se ne sono aggiunti 12 nell'estate del 2007) e sei di umidità, e questo ci ha permesso di apprezzare la complessità dei processi fisici che vi avvengono (Fig. 1).

Fig.1 – Alcune fasi del montaggio del sistema di monitoraggio in continuo (Foto archivio La Venta e Speleoresearch & Films)



<sup>1</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Torino & La Venta

La prima osservazione che possiamo fare è relativa alla temperatura complessiva: essa sta scendendo al rateo di circa  $0.52\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ , per cessione di calore verso le zone circostanti della miniera, raffreddate, in particolare verso la zona Ovest e lungo la galleria di accesso.

All'interno della grotta ci sono forti sedimentazioni termiche. Essa è assimilabile ad una trappola di aria calda, che è però soggetta a movimenti giornalieri piuttosto importanti (abbassamento durante il pomeriggio e innalzamento all'inizio della mattina) probabilmente in qualche modo correlato con la temperatura esterna che provoca correnti d'aria e variazioni di volume in altre trappole d'aria all'interno della miniera.

La bolla stessa è comunque ben più estesa di quanto conosciamo. Dalla zona NE arriva un'alimentazione di aria più calda e fortemente umida che sta provocando una notevole condensazione sui cristalli siti più in alto. Inoltre la relativa lentezza del raffreddamento, se confrontata con la capacità termica "visibile" e i valori teorici di perdita di calore, mostra che il capacitore che sta mantenendo calda la grotta è molto massiccio, i cristalli e le superfici esposte conosciute sono solo il 2-4% della capacità termica totale.

Occasionalmente, ma sempre in ore notturne, abbiamo misurato arrivo d'aria più fredda e secca che ha provocato discreti abbassamenti di umidità nelle zone alte e raffreddamenti misurabili in quella basse.

La connessione termica con l'esterno è facilmente misurabile ma varia da punto a punto e pare soprattutto responsabile di movimenti della bolla d'aria calda.

La grotta è inoltre connessa con altra parte della miniera, come si vede dalle onde di pressione provocate dalle esplosioni di coltivazione (alcune creano una netta fuoriuscita d'aria dalla grotta) e dal fatto che a porte aperte la grotta soffia fra 50 e 100 litri di aria al secondo. La misura della pressione motrice di questo flusso (con manometro differenziale Testo) ha fornito un valore di 5-10 Pa e ci ha permesso di dedurre che il punto di aspirazione dell'aria è fra 10 e 15 metri più in basso dell'ingresso noto.

Tutto pare indicare che esistano altri ambienti verso NE.

In conclusione possiamo dire che le grotte di Naica sono in una fase transiente e stanno evolvendo dallo stato originario ad uno nuovo che non ha nulla a che vedere con le loro condizioni di formazione. Noi possiamo probabilmente influenzare sia l'evoluzione sia stabilire un ottimale punto d'arrivo, una grande responsabilità che ci possiamo assumere solo acquisendo una conoscenza davvero molto accurata dei processi in corso.

Possiamo tuttavia già affermare quanto segue:

- 1) la grotta presenta un debole contatto termico con l'atmosfera esterna, anche a porte chiuse;
- 2) essa ha estensioni nella roccia circostante per qualche decina di metri in dislivello;
- 3) la grotta si sta raffreddando al ritmo di circa  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ ;
- 4) a porta aperta si forma un flusso d'aria più calda e molto umida che sbilancia in modo radicale l'energetica e che soprattutto provocherà danni ai cristalli. Esso non è utilizzabile per impedire il raffreddamento della grotta perché sfrutta la stessa sorgente di calore, la roccia a NE;
- 5) all'interno della grotta ci sono netti processi di sedimentazione termica;
- 6) la meteorologia della grotta si è dimostrata di grande complessità proprio per il fatto di essere in un generale stato di non-equilibrio ed essere stata osservata soprattutto nel corso di attività disturbanti.

Sono richiesti notevoli approfondimenti, ma già appare chiaro che è necessario:

- 1) la realizzazione di una campagna di misure multiple a lungo termine in tutte le grotte di Naica, soprattutto in condizioni non disturbate;
- 2) l'installazione di una centralina meteo esterna;
- 3) mantenere le grotte il più isolate possibile, sia mantenendo chiuse le porte sia migliorandone l'isolamento termico.

## THE GEOCHEMISTRY OF NAICA WATERS AND ITS LINKS WITH THE MINERAL ASSEMBLAGES.

Cueva de los Cristales, hosted within the sulfide-rich Naica Mine, has been recognized as an unique site worldwide due to the selenite megacrystals present there. Current mineralogical and geochemical studies aim to unravel the physicochemical conditions prevailing at the time of crystallization. Efforts to establish a possible geochronological framework for their development, as well as the role of biological activity in crystal growth are underway. Despite extensive work from several multidisciplinary groups, the relationships between the present-day aqueous fluids with other S-rich mineral phases, such as the evaporitic and hydrothermal gypsum, the sulfide mineralization, and their mineral assemblages are yet to be fully established.

Using the Sr, Pb, and U isotopic composition and trace element composition from the fluids, the gypsum crystals, as well as other the soluble components (such as the carbonate host rock and the sulfide mineralization) we pretend to identify whether the crystals developed in a single- or multi-component system. Moreover, such information will also provide vital clues to understand the fluid-rock interactions that took place during the formation of the megacrystals, their possible relationship with the present-day fluids, and the observed mineral assemblages.

Fig. 1- Thermal water spilling out in the -590 gallery (photo La Venta and Speleoresearch & Films)



We present preliminary data from water samples collected during September 2007 at different mine levels (-760, -640 and -590 (Fig. 1)). Preliminary petrographic, XRD and Raman spectra from mineral fractions collected from different parts of the mine, including the red-crust (Fig. 2) on the walls of Cueva de los Cristales will be presented. The latter is of pivotal importance to fully understand the development of the crystals, as preliminary results suggests that it is composed by residual material deposited on the walls during crystallization.

The trace element composition of the groundwater suggests a meteoric rather than hydrothermal origin. Moreover, low Pb, Zn and Fe concentration (ppb to sub-ppb) also suggest that interactions between groundwater and the sulfide mineralization do not contribute significantly to

<sup>2</sup> Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

<sup>3</sup> Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México

the composition of the groundwater, ruling out a sulfide oxidation as one of the main sulfate sources.



Fig.2 – Cueva de los Cristales: general view of the wall covered by red material (photo La Venta and Speleoresearch & Films)

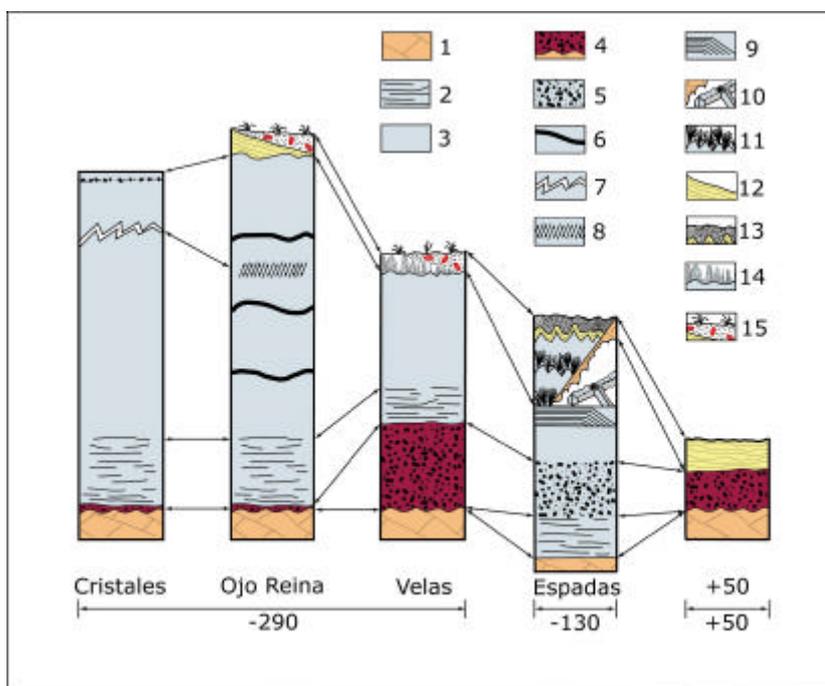
Petrographic analysis of the host-rock indicates that the Aurora formation is composed of biomicrites with a mesh of calcite veins, with some pyrite and probably anhydrite. An anhydrite sequence banded with dolomitic crystals suggest a possible source for the sulfates. Further  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and trace element analysis of the groundwater, gypsum and anhydrite samples will help to strengthen their potential links, pinpoint the source of material, and provide vital clues to establish an evolution model for Cueva de los Cristales

## SPELEOGENESI DELLE GROTTHE DI NAICA

Sin dal momento della messa in loco del plutone (circa 25 milioni di anni addietro) i fluidi termali di Naica sono stati caratterizzati da condizioni di sovrasaturazione tali da portare alla deposizione non solo dei giacimenti sfruttati, ma anche di tutta una serie di altri minerali, di mano in mano che la temperatura dei fluidi stessi si abbassava. Questi processi hanno fatto sì da un lato che la permeabilità complessiva delle rocce carbonatiche sia diminuita moltissimo e dall'altro che nessuna cavità carsica si sia potuta sviluppare. Solamente in epoche relativamente recenti, quando le temperature dei fluidi idrotermali era scesa a meno di 100°C (1-2 milioni di anni addietro(?)) una fase di attività tettonica, che ha dislocato i giacimenti minerari, ha anche portato all'apertura di fratture beanti, collegate a tre faglie principali (Naica, Gibraltar e Montañas) che tutt'ora permettono la risalita delle acque termali. Da quel momento, e per un intervallo evidentemente breve, le acque termali sono risultate essere leggermente aggressive rispetto alla roccia carbonatica dando così luogo, lungo le vie di risalita, a piccole cavità carsiche a livelli differenti (-290, -130, +50), in cui comunque è ancora evidentissima la loro origine tettonica (frattura o scollamento di strato).

La possibilità di ricostruire l'evoluzione di queste cavità, più che alle scarse forme di corrosione, è data dalla presenza al loro interno di potenti depositi chimici, che variano anche molto da grotta a grotta (v. Fig. 1). Grazie a questi depositi è stato possibile definire in un certo dettaglio l'evoluzione di ogni singola cavità, anche se ancora alcuni aspetti devono essere ancora approfonditi.

Fig. 1- Schema stratigrafico dei depositi presenti nelle differenti cavità di Naica e loro rapporti. 1- roccia calcarea; 2- gesso scheletrico con grandi inclusioni fluide; 3- gesso euedrale; 4- ossidi-idrossidi metallici; 5- inclusioni solide di ossidi metallici; 6- intercalazioni di ossidi metallici; 7- crolli ricristallizzati; 8- deformazioni plastiche; 9- gesso laminato; 10- dissoluzione del gesso e corrosione del calcare; 11- formazione di aragonite; 12- sviluppo di croste calcistiche; 13- deposizione di silt; 14- sviluppo delle "vele" di gesso; 15- deposizione di ossidi e solfati.



Il quadro che si ricava è di un complesso susseguirsi di processi, governati di volta in volta da agenti differenti, che hanno interessato prima ambienti freatici profondi, quindi zone epifreatiche e infine ambienti completamente aerati (Tab. 1): naturalmente non tutti i processi sono stati attivi in tutte le cavità e, anche quando lo sono stati, non è detto che siano risultati contemporanei.

<sup>1</sup> La Venta Exploring team & Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Bologna

Tab. 1 – Ambienti, e relativo effetto sulle temperature, agenti e processi speleogenetici che hanno caratterizzato l'area carsica di Naica

AMBIENTE	AGENTE	PROCESSI	CALO DI T°
Vadoso	Ossidazione inorganica	Formazione di ossidi & solfati, corrosione del calcare	molto rapida
	Condensazione	Dissoluzione del gesso /corrosione del calcare	
	Evaporazione	Sviluppo delle "vele"	
Epifreatico	Diffusione della CO <sub>2</sub>	Formazione di aragonite	lenta
Freatico profondo	Stress tettonici	Crollo &/o deformazioni plastiche dei cristalli di gesso	Estremamente lenta
	Ossidazione organica	Formazione di ossidi, corrosione del calcare	
	Disequilibrio gesso/anidrite	Formazione dei cristalli di gesso	
	Acqua termale	Dissoluzione	
	Stress tettonici	Apertura di fratture e scollamento di piani di stratificazione	

E' il caso per esempio della deposizione del gesso che, nella Grotta di +50 è del tutto assente, dimostrando così che l'acqua termale doveva aver abbandonato questa cavità già circa 500.000 anni addietro (età in cui, sulla base delle prime datazioni radiometriche e delle misure sperimentali del laboratorio di -590, si suppone che la temperatura dell'acqua termale sia scesa al di sotto dei 59°C, permettendo così l'inizio della deposizione del gesso stesso). Tale deposizione, poi, è evidentemente cominciata prima nella Cueva de las Espadas, dato che, trovandosi in condizioni epifreatiche, la maggior velocità di discesa della temperatura ha fatto sì che il disequilibrio gesso/anidride fosse raggiunto ben prima che nelle grotte di -290. A conferma di questo c'è anche il fatto che al suo interno non sono presenti depositi di ossidi al di sotto dei gessi, ma vi si trovano una grande quantità di inclusioni solide ben all'interno dei gessi le cui caratteristiche mineralogiche sono identiche ai depositi basali di ossidi delle grotte di -290. Inoltre le pareti di calcare di Espadas non presentano i segni di corrosione imputabili a questo evento, cosa che invece è presente nelle grotte di -290.

Un altro aspetto molto importante è l'influenza antropica sull'evoluzione delle grotte di Naica: infatti tutte le cavità presentano più o meno evidenti segni di trasformazione, anche rapida, conseguenza dell'abbassamento artificiale della falda termale avvenuto appena 20 anni addietro, ma che in pochi altri anni rischia di distruggere completamente la caratteristica peculiare di queste grotte: i cristalli giganti di gesso.

Senza alcun dubbio la grotta più interessante ed importante per lo studio speleogenetico è risultata essere la Cueva de las Espadas che, durante la sua evoluzione, ha attraversato tutti gli ambienti ed è stata teatro di tutti i processi che hanno caratterizzato Naica, vari dei quali sono stati attivi solamente dentro questa grotta.

Una volta terminato lo studio speleogenetico, i dati ottenuti, assieme a quelli che deriveranno dal laboratorio di -590, dalle datazioni assolute e da altri ancora permetteranno di ricostruire in dettaglio l'evoluzione dell'acquifero termale di Naica nell'ultimo milione di anni e probabilmente anche modellarne le caratteristiche una volta che l'attività mineraria sia terminata e quindi si realizzi la risalita delle acque termali fino al loro livello naturale.

## MINERALOGIA DELLE GROTTI DI NAICA

Le grotte di Naica sono conosciute nel mondo per i loro cristalli di gesso e pertanto gli studi mineralogici sono cominciati ancor prima che questo progetto iniziasse, proprio dall'analisi cristallografica di dettaglio dei gessi della Cueva de los Cristales (García Ruiz et al. 2007).

Anche la presente ricerca è partita dallo studio comparato dei cristalli di gesso presenti in tutte le grotte conosciute (Cristales, Reina, Velas ed Espadas).

Si è notata una differenza strutturale e composizionale tra i gessi della Cueva de las Espadas (fig. 1) e quelli di tutte le altre grotte di -290.

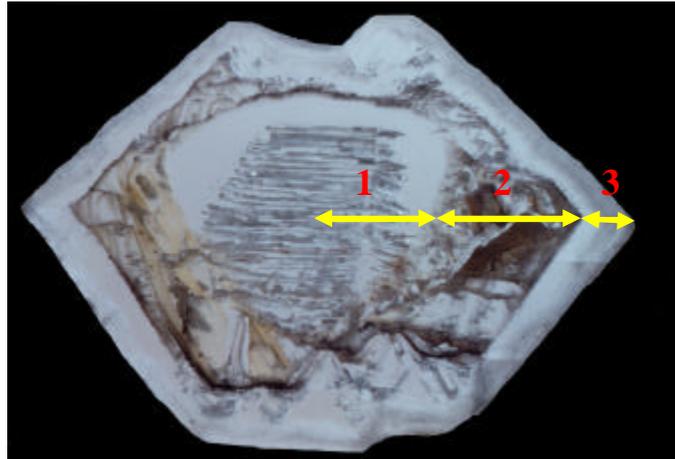


Fig. 1- Sezione di un cristallo di gesso di Las Espadas in cui sono evidenti 3 successivi stadi di evoluzione: 1 ricco di inclusioni fluide; 2 ricco di inclusioni solide, 3- laminato per l'oscillazione della falda termale

Queste differenze derivano dal fatto che la Cueva de las Espadas si è sviluppata esattamente a livello epifreatico mentre le altre in ambiente freatico profondo. Lo studio di queste differenze, assieme ad altri studi (quali quelli attualmente in corso sui pollini, sulle inclusioni fluide, e le datazioni assolute) permetterà di ricostruire in dettaglio l'evoluzione dell'acquifero termale di Naica durante l'ultimo periodo prima dell'inizio dell'attività mineraria.

E' stata scoperta una forma di gesso assolutamente nuova per la scienza (Forti 2006, Bernabei et al. 2007) e ristretta all'ambiente della Cueva de la Velas, la cui evoluzione è da mettere in relazione con i primissimi momenti di abbassamento artificiale della falda a livello -290. Si tratta quindi di forme cristalline evolutesi in pochi giorni o mesi circa 20 anni addietro.

Passando a considerare gli altri minerali di grotta, lo studio si è inizialmente focalizzato sulle inclusioni solide intrappolate all'interno dei cristalli di gesso e sui depositi minerali esistenti al di sotto degli stessi

E' stato effettuato uno studio mineralogico di dettaglio sia sulle inclusioni solide esistenti all'interno dei cristalli di gesso (Panieri et al. 2008), sia sui depositi presenti al di sotto degli stessi (Forti et al., 2007). Sono stati osservati 8 minerali di neoformazione di cui uno (la hectorite,) completamente nuovo per l'ambiente di grotta. Di tutti questi minerali si sono identificati i meccanismi minerogenetici che sono risultati tutti essersi sviluppati in ambiente freatico termale spesso attraverso la mediazione di batteri e/o microorganismi. In alcuni casi è stato anche possibile determinare la sequenza deposizionale (Fig. 2).

Grazie allo studio di alcune particolari pseudostalagmiti rinvenute al fondo della Cueva de las Espadas, costituite da una serie di alternanze di gesso e carbonato di calcio (aragonite e calcite) (Forti 2007) si è potuto stabilire che, prima dell'avvio dei lavori minerari, la falda termale è oscillata diverse volte con la parziale emersione della parte più alta della grotta. In questo modo si sono potuti spiegare anche i particolarissimi gessi ad uncino (Fig. 3), la cui evoluzione è stata causata essenzialmente dalla condensazione di vapor acqueo a temperature elevata (56-57°C).

<sup>1</sup> La Venta Exploring team & Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Bologna

<sup>2</sup> Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Modena e Reggio Emilia

Fig. 2- I cristalli di gesso “ad uncino” della Cueva de las Espadas: la loro particolare forma è dovuta all’azione combinata della condensazione e dell’accumulo del calore latente di condensazione



Fig. 3- Immagine al SEM di una porzione dei depositi di ossidi-idrossidi della Grotta de Las Velas: la sequenza deposizionale è iniziata con la formazione degli ossidi-idrossidi che sono stati quindi inglobati nella celestina e infine è iniziata la deposizione del gesso

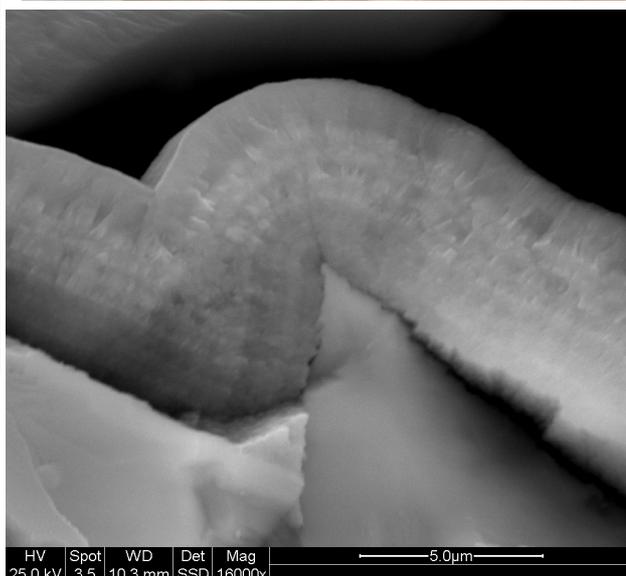
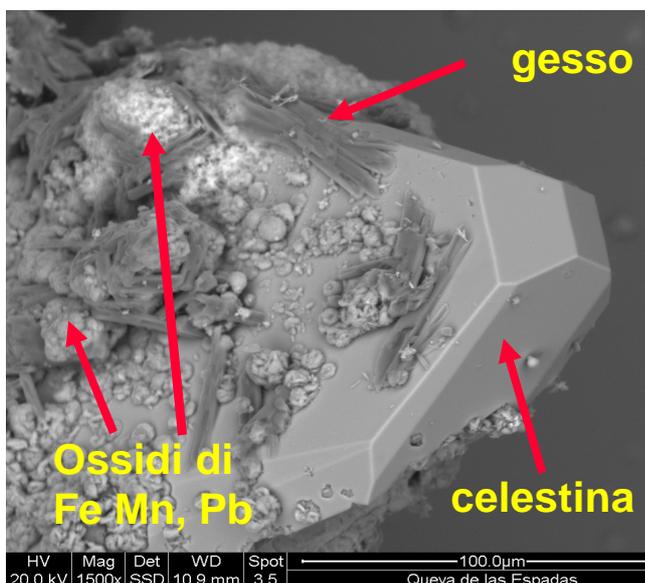


Fig. 4- Immagine SEM della crosta del minerale ancora non identificato che ricopre i cristalli di aragonite della pseudostalagmite della Cueva de las Espadas

Attualmente le pseudostalagmiti sono ancora oggetto di studio mineralogico mirato alla natura mineralogica di alcune sottili “croste” che rivestono i cristalli di aragonite, studio che potrebbe portare all’identificazione di un minerale del tutto nuovo (che contiene Si, Mg, Zn, O) (Fig. 4).

Infine si sono analizzate le efflorescenze che si sono cominciate a sviluppare per ossidazione dei minerali presenti nella roccia incassante in ambiente aerato dopo che l’eduazione mineraria ha trasformato le grotte di -290 da freatiche in vadose. A differenza delle reazioni minerogenetiche che hanno portato all’evoluzione dei depositi al di sotto dei cristalli di gesso e incapsulati al loro interno, in questo caso le reazioni minerogenetiche sono state esclusivamente inorganiche (Forti et al, 2007). L’ambiente aerato di queste grotte, come quello ancora in studio della Grotta +50, si è dimostrato essere il più interessante in assoluto avendo permesso lo sviluppo di ben 27 differenti minerali di grotta, di cui ben 6 (orientite, plumojarosite, starkeyite, szmolnokite, szmikite and woodruffite) segnalati per la prima volta come minerali di grotta.

In conclusione si può affermare che gli studi mineralogici sulle grotte di Naica sono in uno stadio molto avanzato e hanno già fornito risultati molto interessanti e in un certo verso insperati

**Tavola 1.** I minerali delle grotte di Naica (al 10/12/07)

Ambiente	Minerale	Formula Chimica
Ae - Ep	Aragonite	CaCO <sub>3</sub>
Ae	Anglesite	PbSO <sub>4</sub>
Ae-Ep	Apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (C,F,OH,Cl,O)
Ae	Bassanite	CaSO <sub>4</sub> · 1/2H <sub>2</sub> O
Ae	Bloedite	Mg SO <sub>4</sub> · Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Ae - Ep - Fr	Calcite	CaCO <sub>3</sub>
Ae - Ep - Fr	Celestina	SrSO <sub>4</sub>
Fr	Coronadite	Pb(Mn <sup>4+</sup> , Mn <sup>2+</sup> ) <sub>8</sub> O <sub>16</sub>
Ae- Ep - Fr	Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
Ae	Epsomite	Mg SO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O
Ae	Fluorite	CaF <sub>2</sub>
Ae - Fr	Goethite	a-Fe <sup>3+</sup> O(OH)
Ae - Ep - Fr	Gypsum	CaSO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O
Ae	Guanina	C <sub>5</sub> H <sub>3</sub> (NH <sub>2</sub> )N <sub>4</sub> O
Ae	Halite	NaCl
Fr	Hectorite	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Ae	Hematite	
Ae	Hexahydrite	Mg SO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O
Ae	Jarosite	K <sub>2</sub> Fe <sup>3+</sup> <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>12</sub>
Ae	Kieserite	MgSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O
Ae	Malachite	Cu <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub>
Fr	Opal	SiO <sub>2</sub> · nH <sub>2</sub> O
Ae	Orientite*	Ca <sub>2</sub> Mn <sup>2+</sup> Mn <sup>3+</sup> <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>4</sub>
Ae	Pirolusite	MnO <sub>2</sub>
Ae	Plumojarosite*	PbFe <sup>3+</sup> <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub> (OH) <sub>12</sub>
Fr	Quartz	SiO <sub>2</sub>
Ae	Rozenite	FeSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Ae	Starkeyite*	MgSO <sub>4</sub> · 4H <sub>2</sub> O
Ae	Szmikite*	MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O
Ae	Szmolnokite*	FeSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O
Ae	Woodruffite*	ZnMn <sub>3</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O

\* Nuovo minerale di grotta. Ae: aerato, Ep: epifreatico, Fr: freatico

### **.Bibliografia**

- BERNABEI T., FORTI P., VILLASUSO R. 2007 *A new type of gypsum speleothems from Naica (Chihuahua, Mexico): the sails* International Journal of Speleology 36(1) 23-30
- FORTI P. 2007 *Studio della struttura interna di una stalagmite della Grotta delle Spade (Naica, Messico)* Grotte e Dintorni 6(13), 3-20
- FORTI P., GALLI E., ROSSI A. 2007 *Preliminary data on the mineralogy of the Cueva de las Velas (Naica Mexico)* Congresso FEALC Portorico Agosto 2007, Acta Carsologia, in stampa
- 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, Memorie IIS, in stampa
- GARCÍA-RUIZ J.M., VILLASUSO R., AYORA C., CANALS A., OTALORA F., 2006 *The formation of natural gypsum megacrystals in Naica, Mexico.* Geology 35(4), 327-330
- PANIERI G., FORTI P., GASPAROTTO G., SOLIANI L. 2008 *Studio delle inclusioni solide della Grotta delle Spade (Naica, Messico)* Congresso Nazionale di Speleologia, Iglesias Aprile 2007 Memorie IIS, in stampa



## DIFETTI STRUTTURALI E STORIA DI CRESCITA DEI CRISTALLI DI GESSO DI NAICA.

La ricerca si prefigge di individuare e caratterizzare i difetti strutturali dei cristalli di gesso di Naica per ricostruirne la storia di crescita, i meccanismi operanti ed individuare i “marchi di crescita”, cioè i difetti reticolari che consentono di caratterizzare cristalli cresciuti nelle medesime condizioni e di distinguerli da altri cresciuti in condizioni differenti, anche se molto simili.

L'evoluzione della morfologia di cristalli di dimensioni centimetriche, provenienti dalla Grotta delle Spade, è stata studiata mediante microscopia ottica, in luce riflessa e trasmessa, mentre lo studio dei difetti strutturali, è stato effettuato mediante topografia RX in diffrazione, Metodo di Lang.

La Diffrattometria per polveri è stata largamente utilizzata ed ha consentito di individuare bassanite oltre che gesso.

I cristalli esaminati sono tutti fortemente allungati secondo l'asse **c**, probabilmente per crescita parallela, e risultano spesso geminati con piano di contatto **(1 0 0)**. Si osservano inclusioni, solide e fluide, queste ultime spesso bifasiche, raramente trifasiche, generalmente allineate secondo l'asse **c**. Numerose ed evidenti risultano le tracce di successive tappe di accrescimento, in particolare nei settori di crescita **{1̄ 1 1}**, nei quali si sviluppa prevalentemente la crescita, anche a causa di un forte effetto noto come “re-entrant corner effect”, negli individui geminati.

Al fine di procedere alle indagini mediante topografia RX sono state ricavate sezioni, dello spessore di circa 0,5 - 0,6 mm, parallele e perpendicolari all'asse di allungamento. Le prime per semplice clivaggio forniscono sezioni con superfici lucide già utilizzabili in Topografia, mentre le seconde ottenute utilizzando una sega diamantata forniscono sezioni che necessitano di una lappatura meccanica di entrambe le facce della sezioni con paste diamantate fino a ¼ µ.



Fig. 1 – Camera di Lang utilizzata per eseguire la tomografia assiale dei cristalli di Naica

L'analisi dei contrasti di diffrazione, ottenuti mediante Topografia RX, mostrano chiaramente forti disorientazioni esistenti tra le diverse regioni dei cristalli che appaiono come cristalli “mosaico” piuttosto che monocristalli. Come conseguenza di ciò, non è stato possibile, nonostante il gran numero di cristalli esaminati e di sezioni preparate, effettuare nessuna Topografia da piani **{0 0 1}** cioè normali alla direzione prevalente di crescita, mentre risultano possibili quelle riprese da piani **{h 0 0}**.

Le regioni in diffrazione sono alternate a regioni delimitate da forti contorni di Bragg, che ad una successiva indagine ottica, non sono risultati corrispondere né a lacune di cristallizzazione né a gradi inclusi, ma piuttosto a regioni cristalline fortemente disorientate reciprocamente.

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Bari

Inoltre ad una osservazione successiva, i contrasti di diffrazione preliminarmente interpretati come dislocazioni a vite parallele alla direzione  $[100]$ , che sembravano favorire la crescita laterale, dovranno essere riesaminate e valutate differentemente.

Pertanto al momento, la chiave per effettuare la ricostruzione della storia di crescita ed individuare l'evoluzione dell'ambiente di formazione è da ricercare nel collegamento tra i contrasti di diffrazione e le tappe di accrescimento, ipotizzabili otticamente.



Fig. 2 – ricostruzione morfologica e direzione dei vettori di sviluppo per un cristallo di Naica

È da segnalare infine che in un cristallo geminato esaminato si può osservare una lunga linea a contrasto invertito che separa e delimita gli individui geminati presenti, ma non può essere semplicemente interpretata come l'effetto relativo alla deformazione reticolare collegata al piano di contatto del geminato. Sono in corso approfondimenti che potrebbero essere di aiuto nella ricostruzione della storia di crescita, ove risultasse che la traccia a contrasto invertito corrisponde ad altri individui geminati. In questo caso infatti si potrebbero avanzare interessanti ipotesi sulla nucleazione dei cristalli oltre che sulla loro crescita, come già fatto nel caso di spinelli naturali.

Infatti l'alta frequenza di geminati ed il loro numero all'interno dei singoli campioni è ritenuta sicura indicazione di una crescita in condizioni di elevata saturazione, mentre altri autori che hanno studiato i parametri chimico-fisici delle grotte di Naica concludono il contrario. La questione sembra aperta alla discussione.

## CRYSTALS OF NAICA AND IMMUNOLOGY

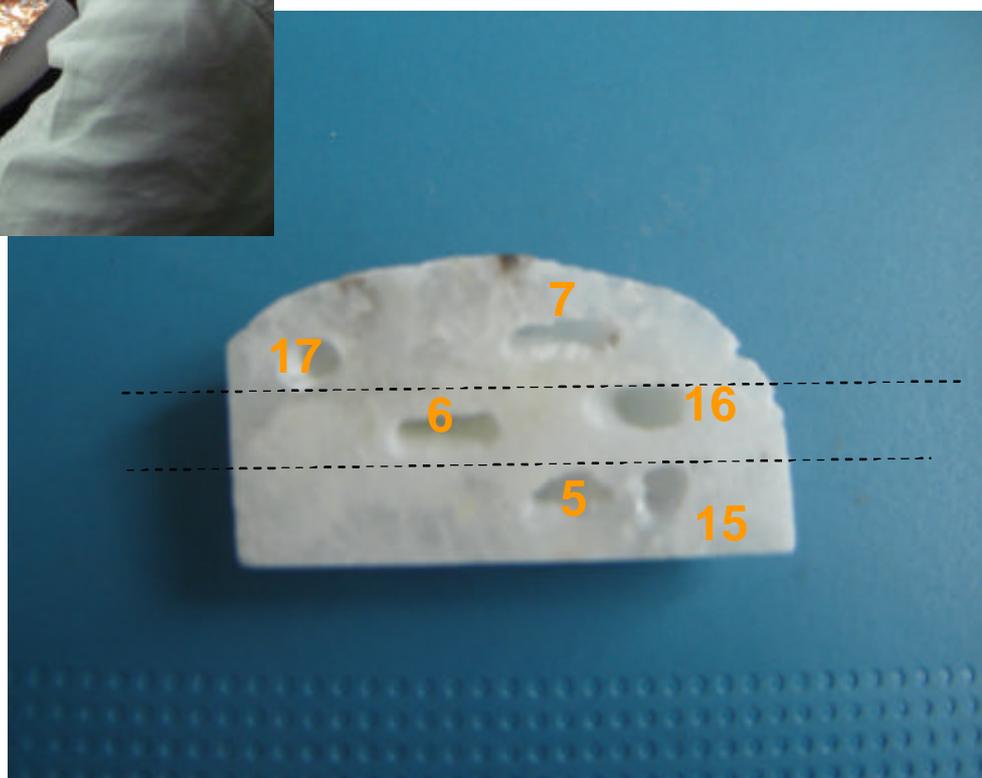
The signatures that microorganisms leave in the rocks may be very helpful in studying the history of life on earth, also elucidating evidence deriving from other planets.

Archaea are microorganisms which survive in uninhabitable environments such as at the extremes of pH, temperature, nutrient concentration, and pressure. Recent molecular studies have also revealed that Archaea, like bacteria, are commonly mesophilic. In this last respect, they share some characteristics with known pathogens and, therefore, can colonize the human host causing damage. Crystals derived from Naica's caves are located in an extreme habitat which may allow studies of BIOMINERALOGY. In particular, there is a large body of evidence that crystals induce immune activation such as monosodium urate, calcium phosphate, calcium pyrophosphate and talc which promote monocyte/macrophage survival and even proliferation.



Fig. 1 – Drilling the sample

Fig. 2 – location of the drillings and their chemical composition. Samples 5 and 7 gypsum with traces of aragonite and bassanite; sample 6: aragonite with gypsum traces



<sup>1</sup> University of Bari, Faculty of Medicine, Policlinico, 70124, Bari (Italy). E-mail: [jirillo@midim.uniba.it](mailto:jirillo@midim.uniba.it)

Various samples of Naica's crystals were obtained by drilling a given fragment at different positions moving from surface toward the inner part of it (fig. 1-2). Powders (fig. 3) recovered were incubated (Fig. 4) at different concentrations with human monocytes at 37 °C for 30 min and nitric oxide (NO) production was evaluated. Results indicate that the main chemical compounds of crystals, namely aragonite, calcite and gypsum are able to induce, even if at different extent, NO release from monocytes.

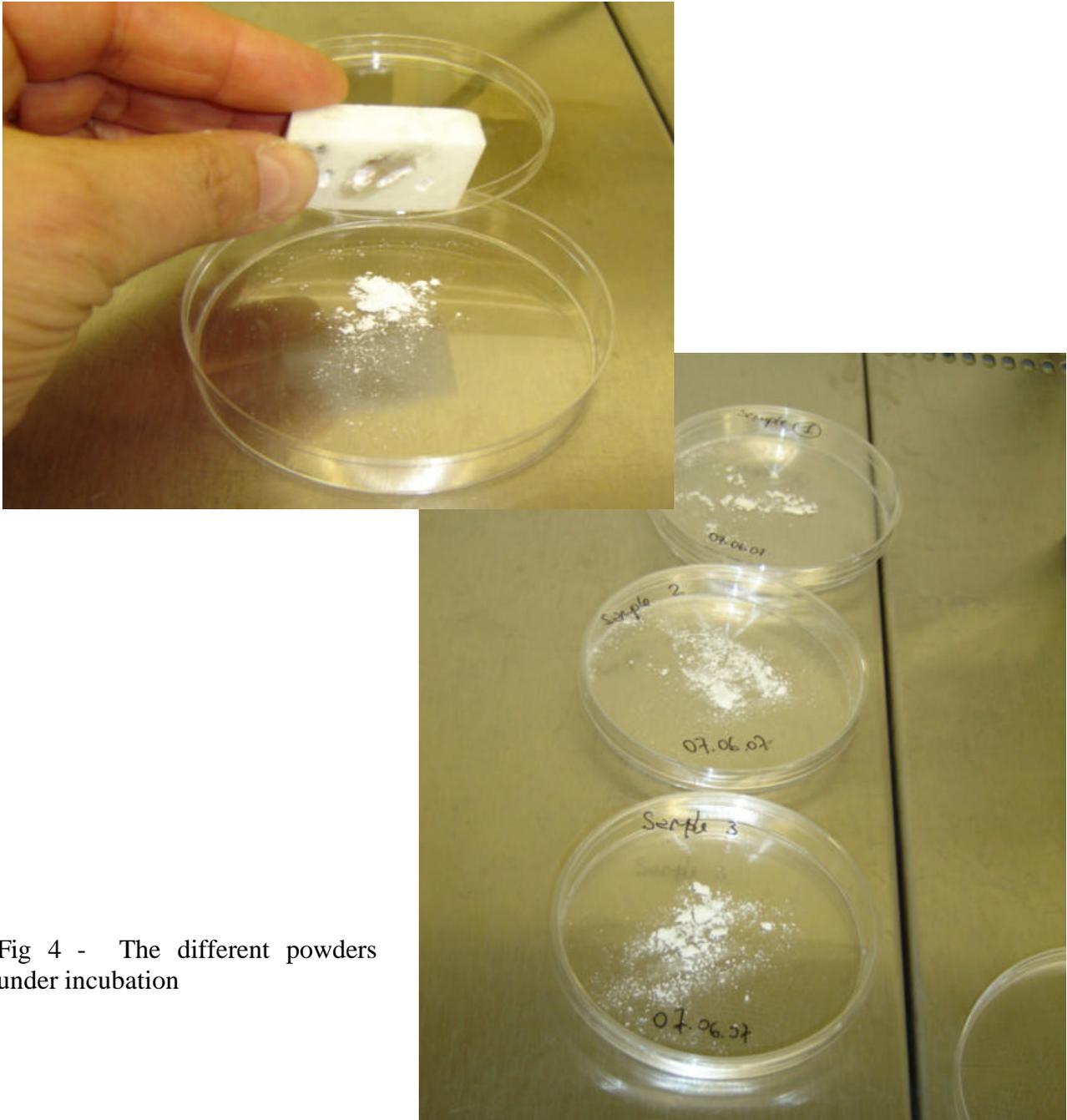


Fig 4 - The different powders under incubation

The next step of our investigation will be to evaluate the presence of bacterial toxins in powders and examine the content of fluids present in some cavities in the context of a given crystal.

In conclusion, the impact of Naica's crystals and related putative microbial constituents with living organisms may represent a suitable model to better decipher the origin of life.

## Il laboratorio sperimentale a -590 nella Miniera di Naica

Da circa 20 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 sulle pareti delle gallerie minerarie.

Tutta l'area è interessata da un intenso fenomeno di concrezionamento con deposizione prevalente di calcite e aragonite e, solo nelle immediate vicinanze delle scaturigini, anche di gesso. In realtà la composizione chimica delle acque termali è rimasta praticamente invariata rispetto a quella che circolava nelle grotte, presentando solo una leggera sovrasaturazione rispetto al gesso, ma la presenza di un'atmosfera permette alla CO<sub>2</sub> di diffondere nell'acqua stessa provocando la precipitazione del carbonato di calcio. La temperatura, invece, è diminuita di quasi 7 gradi (dai 57-8°C misurati nelle inclusioni fluide dei gessi delle grotte, a circa 51°C attuali).

L'ambiente di queste scaturigini si prestava per tentare un esperimento di crescita artificiale dei cristalli di gesso, al fine di misurarne sperimentalmente la velocità attuale di sviluppo in condizioni il più simili possibili a quelle che esistevano prima che la Miniera procedesse con l'abbassamento della falda freatica.

Questi dati poi, permetteranno di avere una conferma indiretta sull'età dei cristalli delle grotte e inoltre fornirà dati utili per modellizzare quali saranno le condizioni dell'acquifero quando cesserà l'attività mineraria.

Nel laboratorio, da circa un anno, è stato installato uno strumento ideato e realizzato all'Università di Bologna (fig. 1), per ricreare le condizioni esistenti nelle grotte al tempo dell'evoluzione dei cristalli: essenzialmente per riportare in condizioni di "freaticità", eliminando ogni contatto con l'atmosfera delle gallerie minerarie.

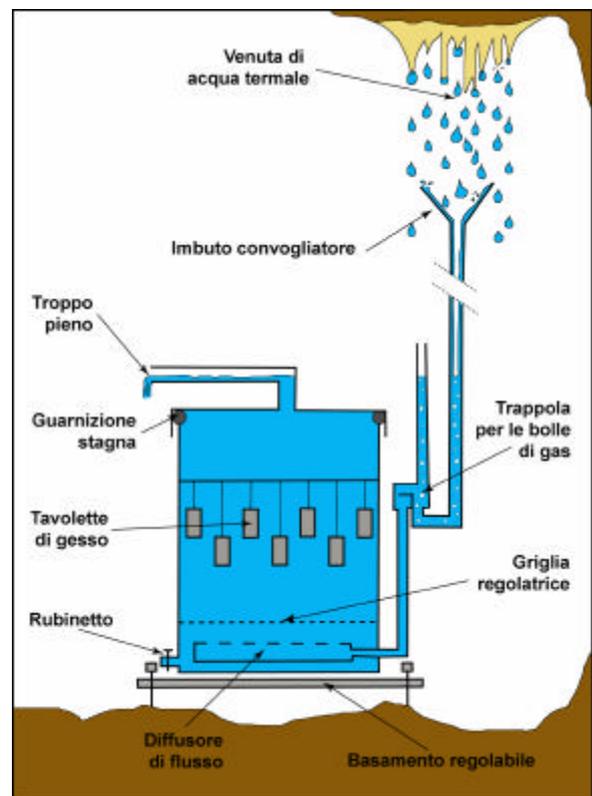


Fig. 1 – Strumento per la misura sperimentale dell'accrescimento dei cristalli di gesso

All'interno dello strumento sono state posizionate 12 tavolette di gesso e 3 tavolette di calcare, che vengono recuperate ad intervalli fissi. I dati di deposizione naturale del gesso vengono quindi controllati per via gravimetrica (tab.1). Al fine di rendere bassi gli errori strumentali e di aumentare la validità dei dati così ottenuti, è previsto che lo studio abbia una durata minima di 2 anni.

N.Tav	Data	Peso (g)	Data	Giorni	Peso	? w	?w/anno	?h/anno
2	18/11/06	109,969	18/05/07	191	110,351	0,382	0,730	0,048
5		105,130	27/03/07	139	105,364	0,234	0,614	0,040
6		110,742	06/09/07	302	111,263	0,524	0,633	0,041

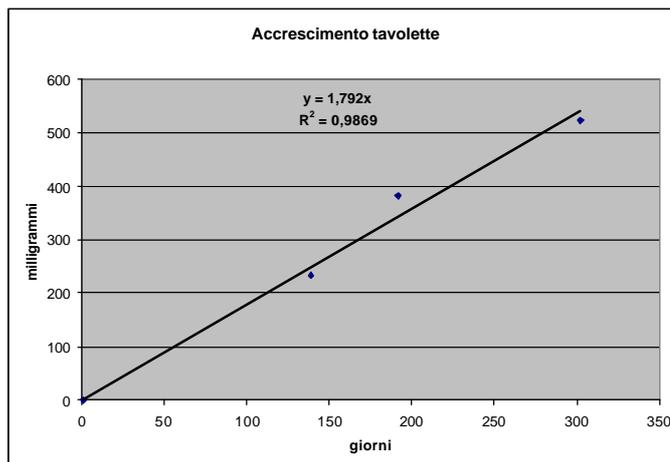
<sup>1</sup> La Venta Exploring team & Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Bologna

<sup>2</sup> La Venta Exploring Team

Le prime 3 tavolette recuperate hanno evidenziato come il processo di deposizione del gesso all'interno dello strumento sia assolutamente differente da quello che avviene attualmente sulle pareti del livello -590 e sia invece assolutamente simile a quello che ha caratterizzato in passato le grotte di Naica.

I minuscoli cristalli di gesso di neoformazione risultano infatti tutti paralleli tra loro tanto che col procedere nello sviluppo daranno luogo ad un singolo monocristallo. Inoltre i dati di accrescimento su base annua sono ben correlabili tra loro e danno un valore di 0,044 mm/anno (Fig. 2).

Fig. 2- Correlazione tra giorni di immersione nello strumento e accrescimento di gesso sulle tavolette



Tenendo però presente che alla temperatura di 51° la sovrasaturazione del gesso rispetto all'anidrite è di ben 11 volte superiore di quella a 57°C (Fig. 3), tale valore 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, in buon accordo con i dati desunti dalla prima datazione assoluta che indicherebbe un'età massima di 600.000 anni.

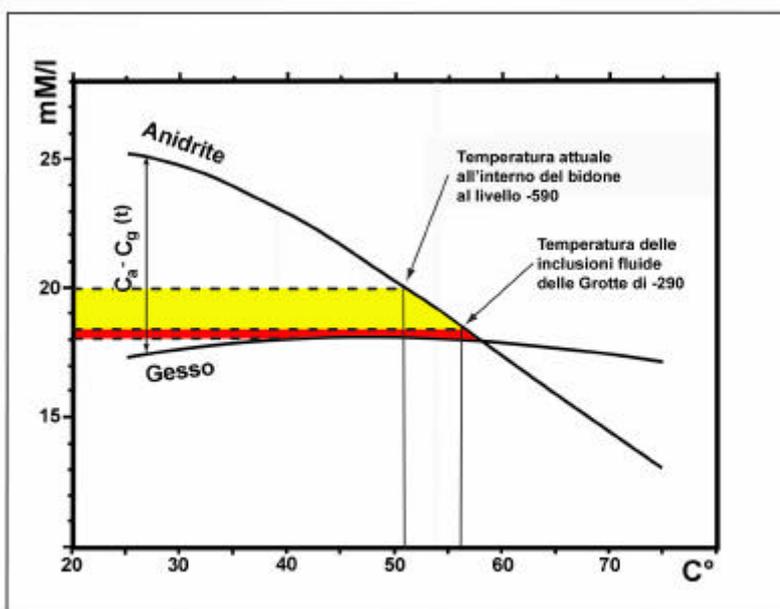


Fig.3 – variazione della sovrasaturazione del gesso rispetto all'anidrite tra i 57 e i 51°C

I risultati definitivi di questo studio, comunque, non potranno dirsi definitivi prima di altri 2 anni di misure.

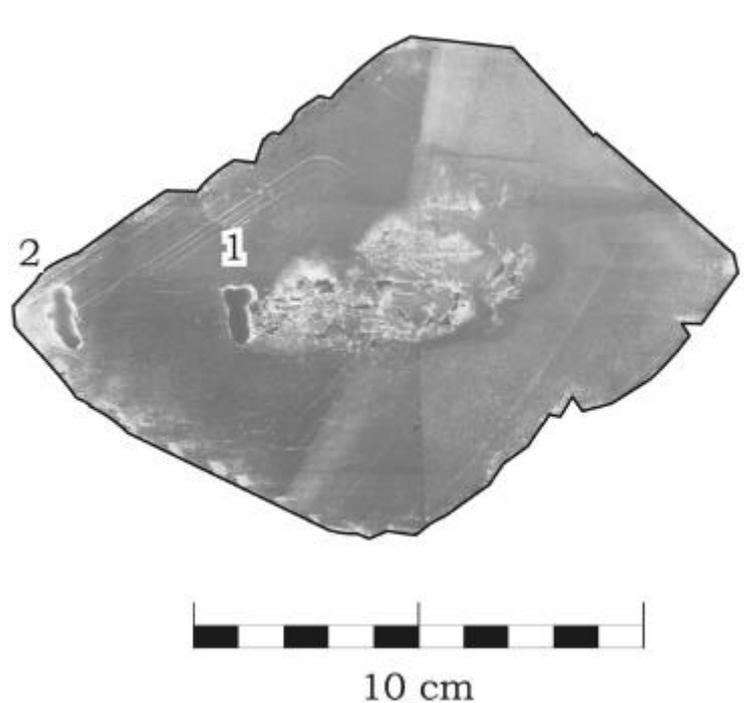
Nel settembre 2007, poi, si è iniziato a monitorare in continuo le temperature all'interno del laboratorio: questi dati, una volta disponibili, saranno utili per definire la velocità di raffreddamento delle zone profonde della miniera di Naica, a seguito dell'azione combinata dell'eduzione delle acque termali (~ 1

m<sup>3</sup>/s) e della ventilazione forzata nelle gallerie minerarie. Inoltre potranno fornire dati utili per previsione dei parametri ambientali delle aree della miniera che rimarranno al di sopra del livello piezometrico una volta che l'attività mineraria sarà completata.

## CHRONOLOGY AND GROWTH RATE OF THE NAICA GYPSUM CRYSTALS

### Sampling.

Two samples of the giant selenite Crystals have been extracted from *Cueva de los Cristales* for dating. Sample #1 is a smaller Xst, about 20 cm across, whilst sample #2 is about 40 cm across. Both consist of slices cut perpendicular through the crystal. Both samples display an inner, porous core, consisting of loosely bound lamellae which were most probably surrounded by large fluid inclusions at the time of growth. This porous core is surrounded by compact, completely transparent gypsum, Figure 1.



**Figure 1.** Cross- section of sample #1, showing the inner, porous core and the two subsamples taken for U-series dating.

### Dating.

Subsamples of about 2 g have been taken for U-series dating by the  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  method. So far, only one have been successfully dated using TIMS on a Finnigan 262RPQ instrument, Table 1.

**Table 1. Uranium-series dation of the Naica crystal**

Sample	U ppm	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	Age, kyr
#1 (50 mm)	0.0038	0.76	0.3028	10	$34.544 \pm 0.819$

<sup>1</sup> Department of Earth Sciences, University of Bergen, Allegaten 41, N-5007 Bergen, Norway

<sup>2</sup> Department of Earth Sciences, University of Bologna, Italy

### Implications for growth rate and supersaturation.

The dated sample was taken 50 mm below the outer surface of the crystal. The cave (vug) was drained around 1985, and it is assumed that the crystals were growing continuously until that point. The age then converts to an average growth rate of 1.449 mm / kyr, or  $0.623\text{E-}10 \text{ mMol cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$  during the last 35 kyr.



These data are smaller than those obtained within the experimental lab of -590, where gypsum crystals are actually growing fed by the thermal water spilling inside the mine gallery. In one year of experiment gypsum crystals evidenced an average growth rate of about 4 mm/kyr.

Considering the experimental errors within the lab and the general assumption made on a single absolute date, the agreement between the two growth rate values is to be considered very good.

Fig. 2 Sampling a broken gypsum crystal from Cristales for absolute dating (photo La Venta and Speleoresearch & Films)

Using recent data on the dissolution kinetics of crystalline gypsum (*'Marienglas'*), (JESCHKE, 2002), and assuming that dissolution and precipitation kinetics is symmetric around the saturation point (i.e. no nucleation threshold), the rate converts to an average supersaturation of 1.0021.

More dates are in progress and will be communicated in the presentation.

### References.

Jeschke A. A. (2002) Lösungskinetik von Gips und Anhydrit. Dipl. Ing. , Universität Bremen.

## FLUID INCLUSION DATA FROM THE CAVES OF NAICA

We report results of a fluid inclusion (FI) study that considers gypsum samples from Cueva de las Espadas, Cueva de Los Cristales, and Ojio de la Reina, and that is aimed at determining the fundamental physical-chemical properties of the fluid that generated these crystals. We report also on the properties of FIs entrapped within gypsum crystals that formed from the percolation of thermal waters on the walls of the mine galleries (depth: -590 m). These FIs provide constraints on the mine fluid in historical times, and when compared with the FIs within the giant gypsum crystals unveil the chemical evolution in space and time of this peculiar environment.

FIs are abundant in all the studied samples and are commonly big (>200  $\mu\text{m}$ , Fig. 1). In the deepest, perfectly transparent crystals we studied, they were typically found along crystallographic planes (primary FIs) except for one case (secondary FIs). At Las Espadas, inclusions occur both at the transparent core and along the dark rims of zoned crystals (Fig. 1), where Pb-Mn oxides and hematite/goethite inclusions occur as well. In all occurrences the trapped fluid is mostly one-phase (L) at  $T_{\text{lab}}$ , and only occasionally two-phase (L-V). Solid phases (*i.e.*, gypsum and oxides) are found as well, but do not show constant phase ratios with the L and V phases.

Microthermometric measurements were carried with a Linkam THMSG 600 heating/freezing stage attached to an Olympus BX51 petrographic microscope. Laser Ablation-ICP-MS analyses were carried out on single FIs from the same assemblages studied with microthermometry (Fig. 2). This system consisted in a GeoLasQ (193 nm; 10 Hz; 9, 15  $\text{Jcm}^{-2}$ ) and a GeoLasC (193 nm; 10 Hz; 3  $\text{Jcm}^{-2}$ ) laser coupled with an ELAN 6100 quadrupole mass spectrometer (1380 W; neb. 0.8, aux 0.75, plasma 17.5  $\text{L min}^{-1}$ ) and an imaging apparatus to monitor analysis. Microthermometric data refer to thirteen representative fluid inclusion assemblages ( $n_{\text{tot}}=417$ ) and LA-ICP-MS data refer to 68 FIs from Cueva de las Espadas, Cueva de Los Cristales, and Ojio de la Reina. More LA-ICP-MS analyses will be carried out in the near future to construct a comprehensive data set.

Freezing experiments show the presence of two aqueous fluids with distinct bulk salinity within the cave crystals: one in the range 3-6  $w_{\text{NaCl equiv.}}$  and the other between 7 and 8  $w_{\text{NaCl equiv.}}$ . The high-salinity fluid occurs only in the darker rims of the Las Espadas crystals. Eutectic melting has been determined in the lower-salinity assemblages to be between -30 and -27 °C. Freezing experiments carried out on the FIs within the gypsum from the thermal waters show the presence of a fluid ranging between 0.7 and 1.2  $w_{\text{NaCl equiv.}}$ , the lowest of which is located at the tips of the crystals and shows a distinct compositional gradient at the scale of single crystals. These are the lowest values measured in the entire set of samples. At Ojio de la Reina and Cueva de Los Cristales, the distribution of total homogenisation temperatures display a mode in the 48-56 °C interval, which is essentially undistinguishable from that of Las Espadas. Hence, in contrast with the distribution of bulk salinity values, total homogenisation occurs in a narrow range within the entire cave system.

Preliminary chemical analyses of single FIs by LA-ICP-MS show that, in addition to Ca and S, the major components of the cave fluid were Mg, Na, and K (in order of abundance), while Mn and Pb are minor and below the limit of detection in many inclusions. At Reina, Na and Mg are present in the cave fluid in similar concentrations, between 8500 and 13000  $\mu\text{g/g}$ , while K is in the 1200-1600  $\mu\text{g/g}$  range. At Espadas, Na and Mg in FIs at the core of zoned crystals show wide concentration ranges (10000-70000  $\mu\text{g/g}$ ), which are similar to those measured in the high-salinity FIs within the dark rims of the crystals (30000-60000  $\mu\text{g/g}$ ). In these inclusions, however, the concentration of Pb is up to about 10000  $\mu\text{g/g}$ .

<sup>1</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali, Università di Bologna

<sup>2</sup> Trace Element and Microanalysis – ETH Zürich

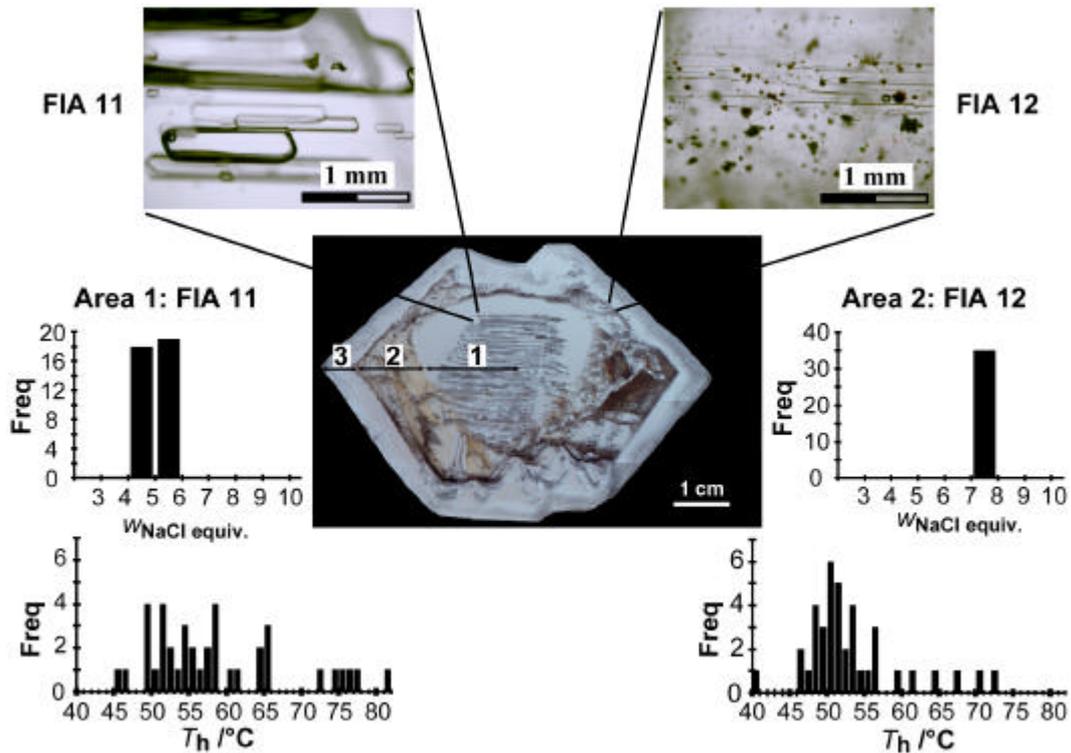


Fig. 1. Fluid typologies within the gypsum crystals and microthermometric data

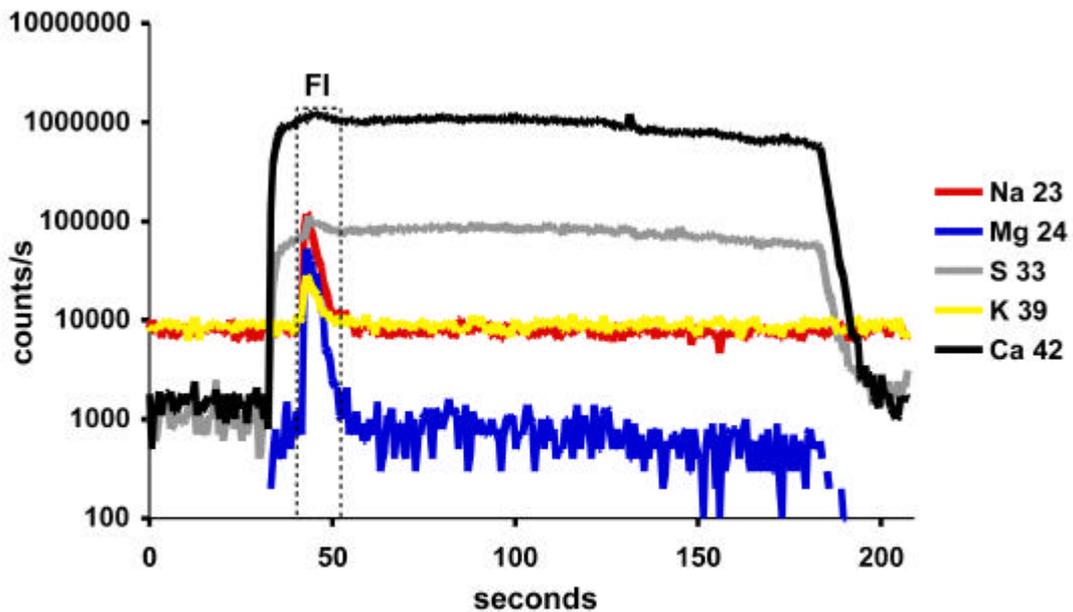


Fig. 2. Some Laser Ablation-ICP-MS transient signals recorded during the analysis of the Naica fluid inclusions. The simultaneous coupled increase of Mg, Na, K, S and Ca during analysis, marked by the dotted line, shows the piercing of one inclusion. Note that the signals of the fluid components increase up to two orders of magnitude during ablation of the inclusion, while the increase of the Ca and S signals is lower due to the matrix effect

## ESTUDIO ISOTÓPICO DEL YESO DE NAICA (CHIHUAHUA, MÉJICO)

El propósito de este estudio es conocer la evolución de los fluidos y/o temperaturas durante la génesis de los megacrystales de yeso y paragénesis mineral asociada. Para ello estudiaremos las razones isotópicas en el yeso (D/H,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  y  $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ), carbonatos ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) y en el agua actual. Con el objeto de conocer las condiciones genéticas durante cada uno de los de los diferentes episodios de crecimiento de los megacrystales se ha realizado un muestreo detallado (ver figuras 1, y 2) sobre muestras procedentes de la Cueva de las Espadas y de la Cueva de los Cristales (Naica). Una de

las muestras es una sección de un cristal de 1500 x 40 cm (Fig. 1).

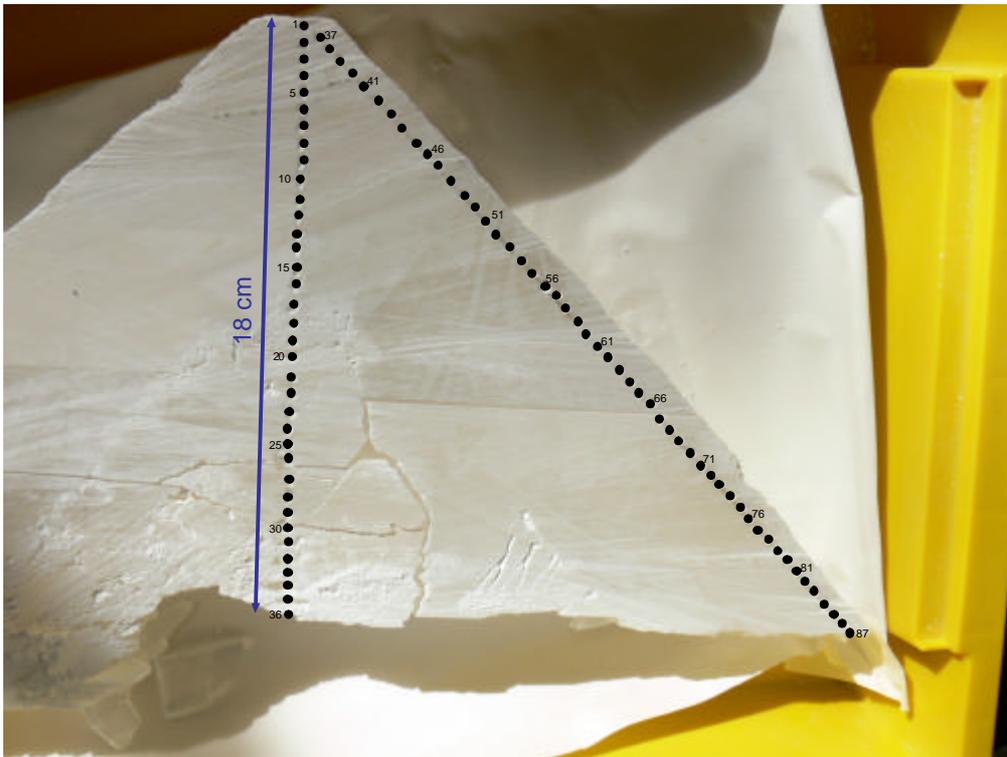


Fig. 1 Muestreo en una sección de un cristal del yeso de 1500 x 40 cm (Cueva de los Cristales, Naica).

Los valores isotópicos del hidrógeno proceden íntegramente del agua estructural, sufriendo un fraccionamiento isotópico que se traduce en un empobrecimiento en D de un 15‰ con respecto del agua con la que se ha originado y que, al no estar relacionado con la temperatura (Fontes y Gonfiantini, 1967), nos aportará una información directa de la composición isotópica del agua con la que fue precipitando el cristal. Sin embargo, los oxígenos pueden ser tanto heredados del sulfato disuelto en el agua ( $\text{SO}_4^-$ ), como del oxígeno del agua en el momento de la cristalización del cristal de yeso.

<sup>1</sup> Estación Experimental del Zaidín (CSIC), C/ Prof. Albareda 1 18008 Granada, Spain. e-mail: [antodel@eez.csic.es](mailto:antodel@eez.csic.es)

<sup>2</sup> Recursos Hídricos y Geología Ambiental, Universidad de Almería, 04120 Almería, e-mail: [jmcalaforra@ual.es](mailto:jmcalaforra@ual.es)

<sup>3</sup> Dept. Earth Science, Univ. of Bergen, 5020 Bergen, Norway, e-mail: [stein.lauritzen@geo.uib.no](mailto:stein.lauritzen@geo.uib.no)

<sup>4</sup> Istituto Italiano di Speleologia, Via Zamboni 67, 40126 Bologna, Italy, e-mail: [paolo.forti@unibo.it](mailto:paolo.forti@unibo.it)

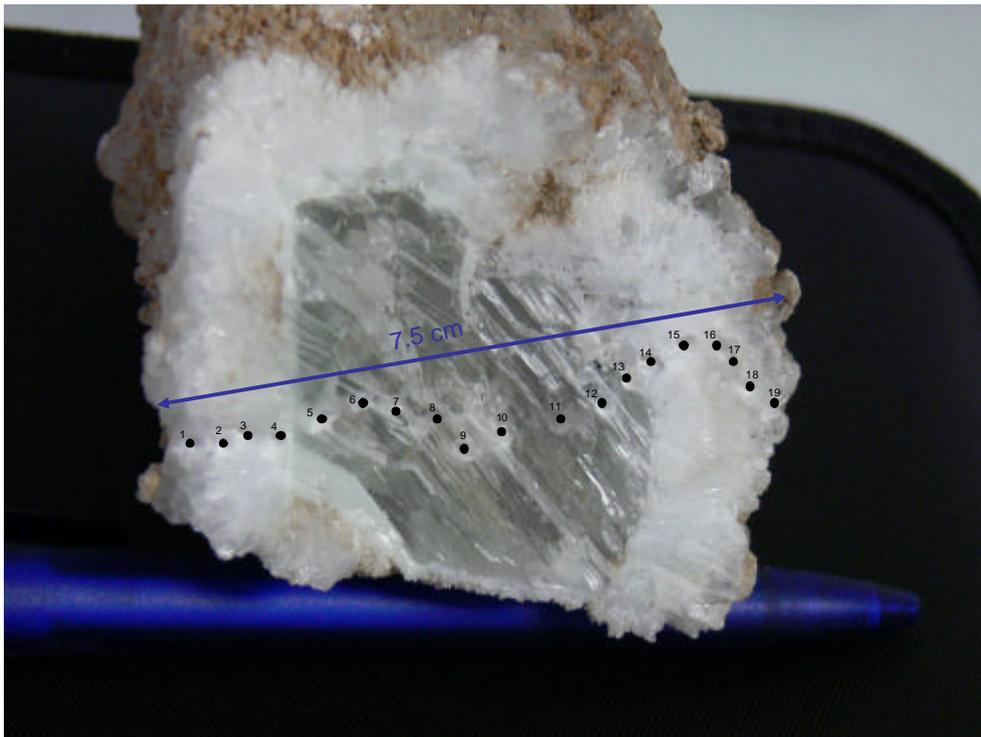


Fig. 2 Cristal de yeso rodeado de una costra de carbonatos y yeso (Cueva de las espadas, Naica).

Este último oxígeno se pierde por deshidratación a temperaturas superiores a los 107°C. Por tanto, para este estudio se analizará tanto el oxígeno total ( $\text{CaSO}_4 \times 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) como el residual tras un tratamiento térmico ( $\text{CaSO}_4$ ). Por otra parte, las razones isotópicas del azufre ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ) sufren pocos procesos de fraccionamiento isotópico desde que el azufre ha pasado a su forma oxidada (Claypool et al., 1980; Chiba et al., 1981). Por tanto, los valores  $\delta^{34}\text{S}$  nos aportarán información sobre las fuentes de S y los procesos de oxidación implicados en la génesis del  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cuando los carbonatos estén asociados (Fig. 2) se determinará si son realmente singenéticos y cual ha sido su temperatura de formación. Finalmente, la composición isotópica del carbono ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) nos aportará información sobre el origen superficial o profundo de los fluidos.

CHIBA, H., KUSAKABE, M., HIRANO, S., MATSUO, S. & SOMIYA, S. 1981. Oxygen isotope fractionation factors between anhydrite and water from 100°C and 500°C. *Earth & Planetary Science Letters*. **53**:55-62.

CLAYPOOL, G. E., HOLSER, W. T., KAPLAN, I. R., SAKAI, H. & ZAK, I. 1980. The age curves of sulphur and oxygen isotopes in marine sulphate and their mutual interpretation. *Chemical Geology*. **28**:99-260.

FONTES, CH. & GONFIANTINI, R. 1967. Fractionnement isotopique de l'hydrogene dans l'eau de cristallisation du gypse. *Acad.Sci. Comptes Rendus*. **65**:4-6.

**POLLINE E SPORE DI CUEVA DE LOS CRISTALES E CUEVA DE LAS ESPADAS**

Da oltre un secolo, la Palinologia<sup>3</sup> è applicata a contesti deposizionali e geografici assai diversi tra loro che portano lo specialista ad occuparsi – solo per fare qualche esempio - di moto di particelle in aria (polline aerodisperso), origine botanica e geografica di prodotti (polline nel miele, droghe e alimenti), ricostruzione di paleoambienti (polline in sedimenti e livelli stratigrafici di carote marine, continentali o siti archeologici). In particolare, l'analisi palinologica ha un'alta potenzialità per ricostruzioni paleoambientali e paleoclimatiche e, pur esistendo problemi in ambienti ossidati o esposti a combustione, il polline per lo più si conserva e contesti che ne siano assolutamente privi sono piuttosto rari (BERGLUND e RALSKA-JASIEWICZOWA, 1986; FAEGRI *et al.*, 1989; HAVINGA, 1967; HOROWITZ, 1992).

Ciononostante, cercare polline e spore all'interno delle Grotte di Naica è parsa in un primo momento un'operazione di difficile successo per cause legate da un lato alla conformazione del complesso di grotte (FORTI, *infra*), e dall'altro a problematiche insite nella natura e trasporto del polline stesso. Ricordare alcuni elementi teorici e metodologici di palinologia può aiutare nella comprensione del significato della presenza di polline all'interno di questo contesto (Tab. 1).

**Tab. 1** – Principi relativi alla natura del polline e alle caratteristiche della Palinologia applicata ad ambienti di grotta (Speleopalinologia)

<b>Basi teoriche per l'interpretazione di polline in grotta</b>		
<b>Natura del polline</b>	<b>a – morfosppecificità e flora pollinica</b>	I granuli di polline sono diversi e tipici per ogni genere/specie: trovare un polline significa trovare la microscopica generazione aploide (n) di una specie visibile a occhio nudo (2n). Ognuno è, dunque, un elemento della <i>Flora</i> , e l'associazione di elementi diversi in un campione studiato dà indicazioni sulla vegetazione di un'area.
	<b>b – impollinazione e abbondanza di polline</b>	I granuli emessi da piante anemofile (impollinazione affidata al vento; ad es., pini, querce, graminacee) sono molto più abbondanti di quelli prodotti da piante entomofile o zoofile (impollinazione affidata a insetti o altri animali; ad es., edera, rose, leguminose); in tutti i depositi, il polline anemofilo è sempre più frequente, spesso proveniente da più lunga distanza, rispetto a quello zoofilo.
	<b>c – resistenza e resilienza</b>	La struttura altamente resistente e resiliente del rivestimento esterno (esina, costituita da sporopollenine; TRAVERSE, 2007) permette al polline di conservarsi, da centinaia a milioni di anni, ben riconoscibile. Solo fuoco, attacco fungino, cicli di idratazione/disidratazione e ossidazione possono distruggerlo. Non esiste, perciò, relazione tra stato di conservazione ed età del polline.
	<b>d – inquinamento dei substrati da esaminare</b>	Intrappolati in un substrato, i granuli pollinici perdono presto gran parte del citoplasma: questo permette di distinguere un polline 'fresco', emesso da poco da una pianta e, ad es., galleggiante in aria, da un polline fossile. Un polline fresco è un inquinante recente di un materiale antico, ed è ben individuabile. Altri tipi di inquinamento, più complessi da riconoscere, possono avvenire tra materiali di depositi diversi che contengono entrambi polline fossile (ad es., tralati lungo una sequenza, oppure tra terriccio sugli arnesi usati per il campionamento e il materiale campionato stesso. In palinologia, è fondamentale il notevole di campionamento e trasporto dei campioni per evitare inquinamenti.

<sup>1</sup> Laboratorio di Palinologia e Paleobotanica, Dipartimento di Paleobiologia e Orto Botanico, Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Italia

<sup>2</sup> Gruppo Speleologico Gualdo Tadino e Gruppo Speleologico C.A.I. Fabriano

<sup>3</sup> La Palinologia è lo studio di polline, spore di felci e altri sporomorfi, in contesti attuali e del passato.

<b>Speleo – palinologia</b>	<b>a – apporto pollinico in grotta</b>	È ovvio che la sorgente di emissione di polline è sempre esterna alla grotta che raccoglie, dunque, in diverso modo particelle presenti nell'ambiente esterno. All'interno, il polline può arrivare via: 1 - aria, in presenza di aperture e contatto con l'esterno; 2 - acqua, nel caso di infiltrazioni e penetrazioni di corsi d'acqua; 3 - animali, tramite zampe-piedi, pelo o corpo, e indirettamente tramite escrementi (NAVARRO <i>et al.</i> , 2001; GARRY e CASELDINE, 2004). Polline già incluso da tempo in terriccio o altri substrati può essere trasportato da acqua o animali.
	<b>b – scarsa presenza e conservazione</b>	Due fattori principali intrinseci alle grotte incidono limitando la presenza di polline al loro interno: 1) morfologico - le grotte possono avere una sola apertura, o anche più, con limitata esposizione all'aria e agli apporti di polline circolante in atmosfera, specialmente nelle parti più profonde e lontane dall'imboccatura: questo fa sì che poco polline entri normalmente nelle grotte, e che sempre in un ambiente chiuso ci sia meno polline che all'esterno; 2) strutturale - i substrati sono di frequente poveri di sostanza organica e, per lo più, non conservativi per il polline.
	<b>c – natura ed eterogeneità dei depositi</b>	Gli strati presenti nei depositi di grotta sono spesso alcalini e comunque poveri di sostanza organica, anche se esiste una grande variabilità (Garry e Caseldine, 2004). La differente tipologia e tafonomia dei depositi, le variazioni nelle condizioni climatico-ambientali del territorio e le possibili diverse occupazioni del sito rendono le grotte estremamente eterogenee, ciascuna dotata di una propria storia (vedi ad esempio: MERCURI, 1999; NAVARRO <i>et al.</i> , 2001). In genere, la frequentazione di animali apporta di sostanza organica. Nelle zone aride, pertanto, le grotte possono contenere depositi organici ricchi di polline, che rimane molto meglio conservato in posto che al di fuori della grotta, dove sarebbe esposto a processi ossidativi.

### Perché cercare polline e spore a Naica

Lo studio delle Grotte di Naica presenta, oltre alle problematiche tipiche della speleopalinoologia, particolari complicazioni legate alla difficoltà di esplorazione e alla scarsità di strati deposizionali idonei al campionamento (Forti, *infra*). Due fattori principali riducono la probabilità di trovare polline: a) la conformazione del complesso, per la quale le grotte sono interessate da scarsa o nulla

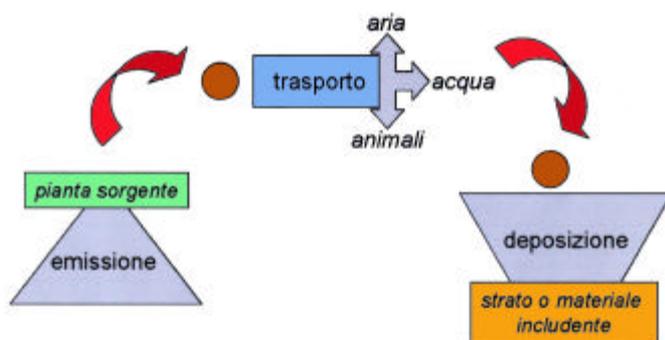


Fig. 1 – Modello di dispersione pollinica, dall'esterno (sorgente) all'interno (deposizione) di una grotta

esposizione diretta a sorgenti esterne e trasporto aereo di sporomorfi; è, dunque, difficile individuare l'area di distribuzione delle sorgenti e il trasporto preferenziale di sporomorfi all'interno (Fig. 1); b) la presenza di materiali calcarei o ossidati, o soggetti a fenomeni di idratazione e disidratazione, responsabili di alterare lo stato di conservazione del polline al punto da renderlo irriconoscibile (Tab. 1). Le analisi polliniche, pertanto, devono qui essere eseguite su materiali che di norma restituiscono scarso o nullo contenuto pollinico, come gessi e concrezioni.

Ciononostante, lo studio pollinico di materiali campionati all'interno di queste grotte potrebbe essere un elemento utile per investigare sia i loro rapporti con l'ambiente circostante, sia l'esistenza di una relazione interno-esterno delle grotte. In pratica, il polline presente nelle grotte potrebbe essere utile alla conoscenza di elementi ambientali, in qualche caso fornendo documenti utili alla comprensione della genesi dei cristalli e alla ricostruzione delle condizioni esterne (flora, vegetazione?, clima?) di alcuni momenti durante l'evoluzione del complesso delle grotte di Naica.

### I campioni pollinici e i primi risultati

Lo studio palinologico<sup>4</sup> è stato avviato su due campioni di gesso provenienti dalla Cueva de los Cristales, e su gessi e strati dalla Cueva de las Espadas; campioni di suolo superficiale attuale sono stati prelevati per controllo (Tab. 2). I gessi (campioni 1,2,7; Fig. 2) sono stati sciolti con acqua distillata,

Interno grotte Naica	Cueva de los CRISTALES	cristallo di gesso	1
		cristallo di gesso con inclusioni fluide, ca. 35,000 BP	2
	Cueva de las ESPADAS	lago fondo	3
		lago superficie	4
		lago profondo	5
		concrezione su gesso	6
		cristallo di gesso con concrezioni	7
		cristallo di aragonite	8
		cristallo di gesso	9
Esterno grotte Naica	suoli recenti presso la grotta	montagna 1	10
		montagna 2	11
		montagna 3	12
	suoli recenti in area antropizzata distante	insediamento 1	13
		insediamento 2	14
		insediamento 3	15

Tab. 2 – Campioni pollinici di Naica  
(numero del campione in ultima colonna)

Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 1M o NaCl 2M. Inoltre, i campioni di grotta 3,4,5,6, e quelli recenti 10,11,12 sono stati trattati con metodi di routine. Il polline, assai scarso, è stato trovato in tutti i contesti esaminati. Le prove di estrazione sono state ripetute per verificare l'appartenenza dei reperti ai materiali e controllare eventuali inquinamenti. Oltre ai buoni contenuti pollinici dei campioni recenti, le analisi esplorative hanno mostrato un certo numero di sporomorfi nei campioni 4,5,6 di Las Espadas. Nel campione 6, la presen-

za pollinica è stata significativa con *Pinus*, *Quercus*, Ericaceae, *Aster* tipo, Chenopodiaceae, Euphorbiaceae cf. e Gramineae.



Fig. 2 - Un frammento di un cristallo di gesso della Cueva de Los Cristales pronto per il trattamento

<sup>4</sup> Tutti i campioni pollinici sono stati prelevati da Paolo Forti, che qui ringraziamo.

Il lavoro di analisi pollinica si è concentrato sui due gessi della Cueva de los Cristales, dei quali sono stati preparati alcuni subcampioni di ca. 20-40 g ognuno, per un totale di ca. 100 g preparati dal cristallo n.1 e ca. 90 g dal cristallo n.2 (Tab. 2). L'esame microscopico, ancora in corso, ha portato per ora all'individuazione di 43 granuli pollinici. Si tratta di polline in diverso stato di conservazione, da deteriorato a ottimo: ciò suggerisce che questi granuli abbiano avuto 'storie' diverse prima dell'inclusione nei cristalli. Sono stati identificati, tra l'altro, polline di *Quercus* cf. *garryana* (Fig. 3), *Lithocarpus densiflora* cf., *Cupressus* tipo, *Taxus*, *Plantago*, Gramineae e spore di *Lycopodium*.



Fig. 3 – Il primo polline estratto dei cristalli della Cueva de los Cristales: identificato come *Quercus* cf. *garryana*

La loro particolarissima posizione, all'interno di cristalli, non può essere spiegata che con un arrivo assieme ad acque profonde, in fasi coeve alla formazione dei cristalli stessi. La loro associazione – considerando ipoteticamente tutti i granuli provenienti da uno stesso bacino sorgente - ha affinità con foreste umide a latifoglie di settori sud-occidentali degli Stati Uniti, in area californiana.

Queste prime osservazioni dovranno essere completate dall'esame di altri campioni di cristalli, per ottenere una quantità di ritrovamenti pollinici sufficiente. La ricerca proseguirà anche in collaborazione con Patricia Nunez, palinologa che collabora con l'Università di Baja-California.

### **Bibliografia**

- BERGLUND B.E., RALSKA-JASIEWICZOWA M. 1986. Pollen analysis and pollen diagrams. In: Berglund B.E. (a cura), Handbook of Holocene Paleocology and Palaeohydrology. Chichester, pp. 455-484.
- FAEGRI K., KALAND P.E., KRZYWINSKI K., 1989. Textbook of Pollen Analysis. Wyley & Son, London.
- GARRY MC S.F., CASELDINE C., 2004. Speleothem Palynology: an undervalued tool in Quaternary studies. *Quaternary Science Reviews* 23: 2389-2404.
- HAVINGA A.J., 1967. Palynology and pollen preservation. *Review of Palaeobotany and Palynology* 2: 81-98.
- HOROWITZ A., 1992. Palynology of arid lands. Amsterdam, Elsevier.
- MERCURI A.M., 1999. Palynological analysis of the Early Holocene sequence. In: di Lernia S. (a cura), The Uan Afuda cave Hunter-gatherer Societies of Central Sahara. *Arid Zone Archaeology* 1, All'Insegna del Giglio, Firenze, pp. 149 – 181, 239 – 253.
- NAVARRO C., CARRIÓN J. S., MUNUERA M., PRIETO A.R., 2001 Cave surface pollen and the palynological potential of karstic cave sediments in palaeoecology. *Review of Palaeobotany and Palynology* 117: 245-265.
- TRAVERSE A., 2007. Paleopalynology. Second Edition, The Netherlands, Springer.

## NAICA GEOBIOLOGY PROJECT DESCRIPTION

### Overview:

We are investigating the potential biological contents of the tiny fluid inclusions in the Naica gypsum crystals. Although we do not anticipate results for many months, our methods have been extensively tested in many other extreme environments in both subsurface environments (caves and mines) and surface environments (e.g. travertine, desert varnish, desert crusts and brines, Antarctic Dry Valleys, etc.)

### The Naica Microbiology Team includes:

- 1) Dr. Penelope Boston (cave geomicrobiologist and astrobiologist) Earth & Environmental Sciences Dept., New Mexico Tech. (Socorro, NM, USA).
- 2) Dr. Diana Northup (cave microbiologist and molecular phylogenist), Biology Dept., Univ. of New Mexico (Albuquerque, NM, USA)
- 3) Dr. Tom Kieft (microbiologist and molecular phylogenist) Biology Dept., NM Tech.
- 4) Dr. Rasima Bakhtiarova (cell physiologist), Dr. Boston's laboratory manager
- 5) Mr. M. Spilde (microscopist, electron beam techniques, mineralogist), Electron Microprobe Laboratory Manager, Institute of Meteoritics, Univ. NM.
- 6) PhD student Laura Rosales-Lagarde (chemist and karst geologist) who is a native of Mexico studying under Dr. Boston on a Mexican CONOCYT scholarship.
- 7) Master's student Megan Curry (cave geomicrobiologist) studying under Boston.

Boston and Northup have collaborated for almost fifteen years in many different cave and surface environments. Spilde has been part of the team for the past nine years. Dr. Kieft has extensive experience working on microorganisms in the ultra-deep South African gold mines. Boston and Kieft have been collaborating since Boston's arrival at NM Tech six years ago. Dr. Bakhtiarova is originally from Azerbaijan and her experience is in plant and microbiological cell physiology. Ms. Rosales-Lagarde is doing her PhD work on our other Mexican cave site, Cueva de Villa Luz in Tabasco, which is a sulfuric acid system that has some similarities to the Naica environment but is a shallow open system with a huge amount of biology visible in it. Ms. Curry is working on the biogenic production of moonmilk for her thesis work, but is also working on the surface gypsum microbiology in the Gypsum Plain area of New Mexico and Texas.

### Science Plan:

Our overall approach is threefold: 1) to seek any viable living organisms that may be trapped in fluid inclusions and attempt to grow them, 2) to extract any DNA present in the fluid inclusions and identification of organisms or closest relatives (where possible), and 3) identification and analysis of any non-living organic material other than DNA that may shed light on any biological contents of the inclusions.

These three goals are mutually compatible but require different techniques for extraction of the fluid inclusions for the different purposes.

---

<sup>1</sup> New Mexico Tech, Socorro, USA, [pboston@nmt.edu](mailto:pboston@nmt.edu)

1) We are culturing possible organisms under both aerobic and anaerobic conditions. Our initial methodology is to surface sterilize crystal samples and then crush them very finely under aseptic conditions to release possible organisms from the fluid inclusions. This crushed material is then introduced into a variety of growth media that has been tested in other gypsum-rich and evaporite-rich environments.



Assistant at hood, preparing to extract DNA from cultures

These inoculations are now incubating in the laboratory under oxygenic conditions in a high temperature incubator at 46°C.

We will begin the anaerobic experiments during late December, 2007, and early January, 2008. Often in our work on extremophiles from caves, we find that organisms from such extreme environments are very slow growing. We will monitor the experiments to detect visible signs of growth at monthly intervals until growth is detected. Then an array of further analyses will be conducted on any organisms that appear.

2) Extraction of fluids from the inclusions to analyze for any DNA presents a greater technical challenge. We are still working on the methodology for this using other crystals with fluid inclusions for development. We are slicing the crystals into thin sections, surface sterilizing these, then piercing into the inclusions with a sterile microdrill and using a micropipette to extract the tiny quantity of fluid present.



One of the crystals with large biphasic fluid inclusions

We believe that we will complete our method development by the end of December and take real samples from the Naica crystals the beginning of January.

The process of analyzing this material presents additional challenges because of the small amount of material we will have to work with.

3) Using the piercing and micropipetting technique, we will also conduct analyses on other contents of the fluids as seems appropriate. Compounds of interest will include anything of potential nutrient value to organisms.

4) If organisms grow in the cultures, we will also do DNA analysis on those to determine their identity or identity of their closest relatives. In the subsurface work that we have done in many other environments, most of the organisms that we detect are novel and previously unknown to science. We anticipate that this may well also be the case for the Naica material.

## ¿CUAL PUEDE SER EL FUTURO DE LAS CUEVAS DE NAICA?

En la presente comunicación se intentará resumir cuales son las presiones directas e indirectas que puede sufrir -o está sufriendo en la actualidad- la Cueva de los Cristales. Este análisis preliminar nos permitirá elucubrar sobre cual puede ser su “cierto o incierto” futuro.

### Presiones indirectas

Consideradas como acciones, futuribles o no, que interfieren decisivamente en contra de la preservación integral de la Cueva de los Cristales. Estas acciones, si bien no suponen un destrozo o deterioro intrínseco de la cavidad, sí que fomentan se cree un ambiente de fatalismo que fácilmente conduce a intentar **la justificación de una posible expoliación** en un siguiente paso. Algunos ejemplos de presiones indirectas son:

- **Museística:** Museos del mundo que quieren tener una muestra en sus vitrinas. Hay que considerar que aquí existe un precedente como fue la Cueva de las Espadas, de la cual se extrajeron grandes cristales de yeso que fueron a parar a distintos museos famosos como el Museo Británico o el Smithsonian
- **Empresas** particulares que alimentan la posibilidad de extracción mediante incentivos económicos notables. Se trata de aportar, nunca sobre el papel, cantidades importantes de dinero para promover la posible extracción. El problema se suscita porque, a pesar que los cristales no se pudieran extraer, se les da un valor económico a los mismos, aunque éste valor sea completamente ficticio.
- **Coleccionismo:** la Cueva de las Espadas y en general las minas de Naica siempre fueron unos grandes suministradores de muestras al mercado internacional de minerales (desde yeso hasta galena argentífera). La presión radica en el hecho en que no se puede entender el por qué no va a seguir siéndolo (Fig. 1). De esta forma, se intenta justificar que la Cueva de los Cristales siga el mismo destino que siguió la Cueva de las Espadas y su entorno.



Fig. 1 – Tentativo de predación de un cristal de yeso en la Cueva de los Cristales (foto La Venta and Speleoresearch & Film)

<sup>1</sup> Universidad de Almería, España

<sup>2</sup> Università di Torino, Italia

<sup>3</sup> Università di Bologna, Italia

<sup>4</sup> University of Bergen, Norway

<sup>5</sup> Estación Experimental del Zaidín (CSIC), Granada, España

### Presiones directas

Posiblemente las presiones directas sean las más importantes actualmente porque son claramente visibles y detectables. Por ejemplo, el ya visible deterioro físico de los cristales. Los argumentos que respaldan la ejecución de acciones directas se basan en el hecho de que si no se actúa pronto la cavidad quedará destrozada sin remedio, lo cual en sí no deja de ser un contrasentido.

Las presiones directas más significativas identificadas en al Cueva de las Espadas lógicamente derivan de la fuerte alteración antrópica producida para facilitar la explotación minera y las acciones inherentes al proceso de investigación/difusión del descubrimiento:

- **Variaciones hidrogeológicas:** el cambio en las condiciones hídricas del acuífero puede considerarse como la base de la alteración que actualmente está sufriendo la Cueva de los Cristales. El paso brusco del nivel piezométrico debido a las necesidades de explotación a provocado un paso violento de condiciones freáticas a vadosas que ha supuesto un cambio radical de medio ambiente donde los cristales fueron creados con un paso de un sistema fuertemente estable a otro claramente metaestable.
- **Cambios en la hidroquímica/mineralogía:** la variación del quimismo de las aguas freáticas del acuífero a las aguas vadosas de goteo es, lógicamente, el proceso que más ha modificado la mineralogía del depósito. La precipitación de carbonatos sobre los cristales de yeso es el cambio mineralógico más notable, dada la incorporación de CO<sub>2</sub> en las nuevas condiciones vadosas (Fig. 2). Otros procesos detectados son la disolución del yeso por condensación de vapor de agua y la recristalización del mismo junto con otros sulfatos de Mg y Na.
- **Temperatura:** la temperatura de la mina en el entorno de la Cueva de los Cristales va disminuyendo progresivamente a un ritmo superior a 1°C/año. Este enfriamiento provoca, especialmente cuando se produce ventilación forzada en la mina/cueva, una condensación continua en las paredes de los cristales (Fig. 3).



Fig. 2 – Ojo de la Reina: disolución del yeso y evolución de espeleotemas de calcita (Foto La Venta and Speleoresearch & Film)



Fig. 3 - Cueva de los Cristales: una condensación continua en las paredes de los cristales (Foto La Venta and speleoresearch & Film)

- **Visitas y cambios microclimatológicos:** los visitantes que acceden a la cueva pueden considerarse como “objetos fríos” (a unos 37 °C) que se introducen en ambiente cálido (aproximadamente 44 °C y 100% de humedad relativa). Estos “objetos” móviles (personas) provocan la presencia de una aureola fría en movimiento que por conducción/convección en el propio aire de la cueva puede afectar a la superficie de los cristales de yeso de procesos de condensación.
- **Acción mecánica:** la cavidad está siendo actualmente visitada por equipos de exploración, científicos y medios de comunicación. Por mucho que la entrada esté restringida esto supone del orden de cientos de visitas físicas a su interior. Uno de los mayores problemas de estas visitas reside en la abrasión y rotura de aristas, caras y vértices cristalinos que se produce con el simple caminar, generando un terrible polvo blanco de yeso en el suelo. Hay que recordar que el yeso tiene dureza 2 y una persona suele pesar más de 70 kg..
- **Muestreo y sobremuestreo científico:** es recomendable evitar que se sobremuestree indiscriminadamente la cavidad. En especial es indispensable que los muestreos que se realicen sean en zonas lo menos visibles y recónditas posibles. Aunque resulte extraño, ni siquiera esto se ha llevado a cabo a rajatabla.

#### **Un primer esbozo sobre algunas posibles medidas a tomar**

- Mantener el control ambiental de la cavidad para detectar posibles alteraciones, especialmente controlar que el descenso de la temperatura sea lo más paulatino posible
- Evitar totalmente la ventilación de la cavidad
- Aclimatación térmica corporal y sobre todo de vestimenta antes de acceder a la cavidad
- Trazar caminos, de alguna manera, para evitar que el destrozo físico de los cristales se extienda irremediablemente.
- Limitar al máximo las entradas y empezar a pensar en prohibirlas totalmente en un futuro muy cercano (2008)
- .... Y otras medidas de conservación que seguro serán propuestas durante el simposio. Cada año que pasa la cavidad en condiciones vadosas es un paso más que acentúa su deterioro.





 **Electrolux**

**FERRINO**

**NAPAPIJRI**  
g e o g r a p h i c

  
**GARMONT**

**testo**

**GeD**  
cucine

 Grotte di Castellana

**set in**®

**gt**®  
*Line*

 speleoresearch & films  
México país de las grandes cuevas

 Livenza Viaggi e turismo

**VIRTUALGEO**  
geomatica e comunicazione

  
**PAICA/PEÑOLES**

