Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA
Società Italiana di Geologia Ambientale

Supplemento al n. 4/2018
ISSN 1591-5352

Atti del convegno nazionale

Cavità di origine antropica, modalità d'indagine, aspetti di catalogazione, analisi della pericolosità, monitoraggio e valorizzazione

Roma, 1 dicembre 2017

A cura di
Francesca Bozzano
Eugenio Di Loreto
Stefania Nisio
Mario Parise

Poste Italiane S.p.a. - Spedizione in Abbonamento Postale - D.L. 353/2003 (conv. in L. 27/02/2004 n° 46) art. 1 comma 1 - DCB Roma

ProGEO
The European Association for the Conservation of the Geological Heritage

pianetaterra
Le Scienze della Terra per la Società
Commissione Italiana

Società Italiana di Geologia Ambientale

Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare con D.M. 24/5/2007 e con successivo D.M. 11/10/2017

PRESIDENTE
Antonello Fiore

CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE
Danilo Belli, Lorenzo Cadrobbi, Franco D'Anastasio (*Segretario*), Daria Duranti (*Vicepresidente*), Antonello Fiore (*Presidente*), Sara Frumento, Fabio Garbin, Enrico Gennari, Giuseppe Gisotti (*Presidente onorario*), Gioacchino Lena (*Vicepresidente*), Luciano Masciocco, Michele Orifici, Vincent Ottaviani (*Tesoriere*), Angelo Sanzò, Livia Soliani

Geologia dell'Ambiente
Periodico trimestrale della SIGEA

Supplemento al n 4/2018
Anno XXVI - settembre-dicembre 2018

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352
Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229
del 31 maggio 1994

DIRETTORE RESPONSABILE
Giuseppe Gisotti

COMITATO SCIENTIFICO
Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Giancarlo Bortolami, Giovanni Bruno, Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Gioacchino Lena, Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro

COMITATO DI REDAZIONE
Fatima Alagna, Federico Boccalaro, Giorgio Cardinali, Francesco Cancellieri, Valeria De Gennaro, Fabio Garbin, Gioacchino Lena, Maurizio Scardella

REDAZIONE
SIGEA: tel. 06 5943344
Casella Postale 2449 U.P. Roma 158
info@sigeaweb.it

PROCEDURA PER L'ACCETTAZIONE DEGLI ARTICOLI
I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti ad un giudizio di uno o più Referees

UFFICIO GRAFICO
Pino Zarbo (Fralerighe Book Farm)
www.fralerighe.it

PUBBLICITÀ
SIGEA

STAMPA
Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

La quota di iscrizione alla SIGEA per il 2018 è di € 30 e da diritto a ricevere la rivista "Geologia dell'Ambiente". Per ulteriori informazioni consulta il sito web all'indirizzo www.sigeaweb.it

Sommario

Introduzione
Antonello Fiore e Arcangelo Francesco Violo 9

SESSIONE A
CENSIMENTO E CATALOGAZIONE CAVITÀ

Catasto speleologico nazionale delle cavità artificiali (CA). Classificazione, interventi di tutela e monitoraggio conseguiti grazie ai dati speleologici e prospettive future
Michele Betti, Roberto Bixio, Carla Galeazzi, Sandro Galeazzi, Carlo Germani, Mario Mazzoli, Marco Meneghini, Giovanni Belvederi, Mario Parise, Stefano Saj 13

L'inventario delle cavità di origine antropica e la Banca Dati Territoriale online del territorio della Città Metropolitana di Napoli
Paolo Maria Guarino, Roberta Carta, Daniela Maria Antonia, Mauro Roma, Rocco Mari, Marco Soravia, Paola Napolitano, Giuseppe Palma, Fortunato Sgariglia, Antonio Santo 19

Primo contributo alla realizzazione della Carta delle Cavità Sotterranee di Roma
Fabrizio Bisconti, Giancarlo Ciotoli, Gianluca Ferri, Roberto Fiore, Maurizio Lanzini, Stefania Nisio, Mauro Roma, Riccardo Paolucci, Ivano Stranieri, Claudio Succhiarelli, Maurizio Allevi 25

Cavità sotterranee nell'area portuense a Roma
Cianfriglia Laura, Matteucci Renato, Rosa Carlo, Sebastiani Renato 33

Le cavità sotterranee scomparse di Roma: la catacomba di San Felice scomparsa sulla Via Portuense
Giancarlo Ciotoli, Stefania Nisio 48

Le cave di pozzolana a Roma e nel territorio nelle fonti archivistiche settecentesche
Orietta Verdi, Gianluigi Giannella, Carlo Rosa 57

Cave sotterranee nel Colle Aventino. Cartografia storica, documenti di archivio e nuove indagini geoarcheologiche
Letizia Rustico, Roberto Narducci 63

Note preliminari sulle indagini speleologiche e geologiche dell'acquedotto "Fontana" di Velletri (Roma)
Pio Bersani, Carlo Germani, Carla Galeazzi, Ruggero Bottiglia, Sandro Galeazzi 72

Il censimento delle cavità naturali e artificiali della Riserva Naturale Regionale Lago di Vico (Viterbo)
Andrea Sasso 76

Censimento e catalogazione delle cavità di origine antropica mediante prospezioni geofisiche integrate nell'area de "Il Piano" (Isola d'Elba, Italia)
Maria Di Nezza, Michele Di Filippo, Flavio Cecchini, Siro Margottini, Caris De Martino, Veronica Pazzi, Tommaso Carlà, Federica Bardi, Federico Marini, Katia Fontanelli, Emanuele Intrieri, Riccardo Fanti 81

Censimento e interesse storico e speleologico delle fortificazioni militari della Nurra (Sardegna)
Pierpaolo Dore, Eleonora Dallocchio 91

Censimento e mappatura della rete di cavità che sottende il paese di Castelnuovo, San Pio delle Camere (AQ)
Federica Durante, Giorgio Pipponzi, Emanuele del Monte, Alessandro Ghinelli, Vidan Ilic, Marco Nocentini, Marco Tallini 95

Altamura memoria del paesaggio: le cave per l'estrazione del materiale lapideo. Dal censimento alla valorizzazione dei percorsi dell'industria estrattiva
Emma Capurso, Teresa Ninivaggi, Giovanni Ragone 103

Cavità sotterranee di origine antropica in Francia
Maria Luisa Felici 108

SESSIONE B
ANALISI DELLA PERICOLOSITÀ TERRITORIALE

Ricostruzione del modello tridimensionale di una cavità sotterranea nel Complesso Monumentale dei SS. Marcellino e Festo (Napoli) mediante l'utilizzo di laser scanner manuale
Vincenzo Allocca, Anna Claudia Angrisani, Silvio Coda, Maria Danzi, Pantaleone De Vita, Umberto Del Vecchio, Diego Di Martire, Domenico Massa, Gianluca Minin, Giosafatte Nocerino, Domenico Calcaterra 113

Le acque nelle cavità sotterranee di Roma
Pio Bersani, Stefania Nisio, Luca Pizzino 117

Il fattore *nshape* dei pilastri di cave sotterranee e il loro fattore di sicurezza a compressione desunto da analisi di regressione multivariata
Giovanni Bruno 126

Analisi sistemica per una valutazione della suscettibilità al dissesto di territori dell'Agro Nolano (provincia di Napoli) con presenza di cavità antropiche in tufo
Gianfranco Caccavale, Domenico Calcaterra, Massimo Ramondini 135

Analisi contestuale di cavità di origine antropica nel Parco Archeologico delle Terme di Baia (Campania, Italia)
Marco Corvi, Norma Damiano, Paolo Maria Guarino, Ivana Guidone 155

Nuove metodologie di rilievo di ambienti ipogei tramite laser scanner: l'esempio di una cavità artificiale in provincia di Napoli
Maria Danzi, Umberto Del Vecchio, Gianluca Minin, Valentina Barone 164

Relazioni tra caratteristiche petrografiche e parametri geotecnici nelle rocce tenere carbonatiche in Puglia
Vincenzo Festa, Antonio Fiore, Maria Nilla Miccoli, Luigi Spalluto 168

Considerazioni sulla stabilità morfologica della cavità rocciosa che ospita l'eremo (IX sec) dedicato a San Michele Arcangelo – Monti Aurunci (Lazio Meridionale)
Paolo Miele 185

Criteri di verifica dei pilastri di cave di pozzolana abbandonate
Marco Mizzoni, Gianluigi Giannella, Filippo Virgili, Eutizio Vittori 195

Analisi geostrutturale su nuvola di punti acquisita con laser scanner 3d: applicazione alla Grotta di Cocceio, Bacoli (Campania, Italia)
Marco Pagano, Biagio Palma, Mario Parise, Anna Ruocco 201

Studio numerico parametrico per la definizione di abachi per la valutazione preliminare della stabilità di cavità sotterranee in calcarenite tenera
Michele Perrotti, Piernicola Lollino, Nunzio Luciano Fazio, Luca Pisano, Giovanna Vessia, Mario Parise, Antonello Fiore, Michele Luisi, Maria Nilla Miccoli, Luigi Spalluto 209

Analisi speditiva del quadro fessurativo caraterizzante gli ambienti sotteranei della "Ricerca Buca del Serpente" (Campiglia Marittima, Toscana)
Emilio Poggetti, Luca Tinagli 214

Preesistenze di natura antropica in una delle regioni più antiche delle Catacombe dei SS. Marcellino e Pietro a Roma
Monica Ricciardi, Raffaella Giuliani, Dominique Castex 219

L'utilizzo di fotografie aeree dell'Aerofototeca Nazionale degli anni precedenti l'urbanizzazione del suburbio romano per l'individuazione e catalogazione di cavità di crollo connesse alla evoluzione perniciosa di cavità sotterranee legate ad attività estrattive
Carlo Rosa, Gianluigi Giannella 225

SESSIONE C
TECNICHE E PROCEDURE DI MONITORAGGIO E CONSOLIDAMENTO

Le tecniche per operare in sicurezza in spazi confinati applicate nel progetto di studio e recupero "*Forma Aquae Maxentii*"
Elettra Santucci, Luca Girardo, Stefano Adornato, Susanna Basso 245

Sviluppi nelle tecniche e tecnologie di indagine e monitoraggio delle cavità in venti anni di applicazione nel laboratorio naturale dell'Orvieto ipogea
Endro Martini, Claudio Soccodato, Filippo M. Soccodato, Angelo Celano, Michele Curuni, Valentina Albano 252

Piano per la messa in sicurezza delle cavità sotterranee instabili nel Cratere Sismico Aquilano
Giorgio Pipponzi, Emanuela Ferrini, Francesco Mattucci 258

Cavità di origine antropica e sicurezza degli edifici scolastici nella città di Roma: i casi di studio di via Asmara (Municipio II) e via Diana (Municipio V)
Alessio Argentieri, Maria Di Nezza, Michele Di Filippo, Maria Piro, Giovanni Rotella, Flavio Cecchini, Siro Margottini 263

Nuovi studi sulle necropoli etrusche di Tarquinia (VT) con GPR e Geoelettrica
Greta Brancaleoni, Silvia Castellaro, Luigi Perricone 271

Il metodo B&B ottimizzato per la definizione dell'area tributaria dei pilastri in cave sotterranee
Giovanni Bruno, Luigi Bobbo, Maria Dolores Fidelibus 277

Monitoraggio e caratterizzazione idrogeologica di alcuni qanat nelle vicinanze della Città di Yazd (Iran centrale)
Ezio Burri, Andrea Del Bon, Angelo Ferrari, Hossein Ghafori, Ali Asghar Semsar Yazdi, Labbaf Majid Khaneiki, Arnaldo Pierleoni, Pietro Ragni 283

Gaeta: analisi qualitativa dei fenomeni di instabilità ed interventi per la riqualificazione ambientale della spiaggia di Fontania
Ilaria Falconi 287

GIS e Drone per la gestione emergenziale delle cavità sotterranee
Filippo Massimiliano Gagliano 294

Esperienze nell'impiego di aeromobili a pilotaggio remoto nell'esplorazione, documentazione e monitoraggio di cavità artificiali sotterranee
Mario Mazzoli, Isidoro Bonfà, Francesco Marsala 300

Esplorazione e documentazione di cavità artificiali sommerse: rischi, cautele esplorative, procedure consolidate in ambito speleo subacqueo
Mario Mazzoli, Carla Galeazzi, Marco Vitelli 304

Consolidamento di cavità e monitoraggio rupe di Orvieto
Pierfranco Ventura 310

Analisi di stabilità e progetto esecutivo per la messa in sicurezza di aggrottati nell'area urbana di Ragusa Ibla
Michele Zocco, Cristina Licitra 315

SESSIONE D
VALORIZZAZIONE E FRUIZIONE

Pollino UNESCO Geoparco Mondiale. Valorizzazione e tutela di una cavità antropica, identificata quale geosito
Luigi Bloise, Egidio Calabrese 327

Tutelare e valorizzare il sottosuolo. La ricostruzione 3D della miniera di grotta della "Buca della Faina di Poggio all'Aione" (Regione Toscana)
Debora Brocchini, Luca Deravignone, Emilio Poggetti 331

La città di Shahrood (Iran nord-orientale) e il suo approvvigionamento idrico tramite i qanat
Ezio Burri, Andrea Del Bon, Doulati Ardejani Faramarz, Angelo Ferrari, Karami Gholam Hossein, Pietro Ragni 338

Gli ipogei in Puglia tra conservazione e innovazione
Antonella Calderazzi, Rosa Pagliarulo 343

Gli ipogei di San Dana (LE). Un sistema rupestre marginale nel Salento meridionale
Stefano Calò, Daniela Longo 348

Privata traiani domus. Elaborazioni 3D, ricerca e fruizione
Elisabetta Carnabuci, Federica Michela Rossi, Stefano Calò, Elettra Santucci 356

Il sentiero dell'acqua di Sinalunga
Gianfranco Censini, Pierpaolo Dore, Eleonora Dallocchio 363

Il complesso ipogeo in località San Fortunato - Marsciano (PG)
Valerio Chiaraluce 369

Potenzialità delle cavità ex-estrattive tra recupero ambientale e nuovi usi: applicazioni nel Parco dell'Appia Antica
Paola Veronica Dell'Aira, Carlo Esposito, Paola Guarini 374

Gli ipogei di Bagnoregio e Civita (Viterbo): una ricchezza (quasi) sconosciuta
Giovanni Maria Di Buduo, Valerio Chiaraluce, Luca Costantini, Tommaso Ponziani 381

Cavità sotterranee di Roma: procedure regionali per la valutazione della pericolosità geologica e attività di monitoraggio e conservazione della biodiversità
Eugenio Di Loreto, Lorenzo Liperi, Stefania Nisio, Ivana Pizzol, Federica Roscioli, Elena Santini, Alessandra Tomassini 387

Siracusa ipogea: carta di censimento e classificazione dei principali sistemi ipogei di Acradina Neapolis ed Ortigia
Anna Maria Di Maio, Gaetano Bordone, Maria Giompapa, Claudio Miraglia, Luciano Arena 392

Conservazione alimentare in ambiente ipogeo: l'esempio delle cave in sotterraneo della Val di Non
Antonio Galgaro, Giorgia Dalla Santa, Matteo Cultrera, Michele De Carli, Stefano Daz, Marco Fauri, Alessandra De Lullo, Simonetta Cola, Paolo Scotton, Fabrizio Conforti, Andrea Fuganti 403

Il sistema ipogeo di "Kolymbethra - Porta V" nel Parco Archeologico della Valle dei Templi di Agrigento: un esempio di fruizione turistica di una cavità artificiale
Giuseppe Lombardo, Giovanni Noto, Marco Interlandi, Elisabetta Agnello, Eugenio Vecchio 412

Progetto Norchia '16-'18. Scavi nella necropoli di Norchia, (VT), in località Guado di Sferracavallo
Simona Sterpa 420

Le gallerie delle sorgenti termali di Porretta: rilievi, monitoraggi, azioni di valorizzazione
Stefano Vannini, Alessandro Stefani 427

Aspetti geomorfologici e cavità d'origine antropica del territorio dell'Ecomuseo della Tuscia Rupestre (Viterbo)
Andrea Sasso 435

Conservazione alimentare in ambiente ipogeo: l'esempio delle cave in sotterraneo della Val di Non

Underground food storage: the example of hypogeal warehouses in Val di Non (Trento, Italy)

Antonio Galgaro[1,2], Giorgia Dalla Santa[1], Matteo Cultrera[1], Michele De Carli[3], Stefano Daz[3], Maurizio Fauri[4], Alessandra De Lullo[5], Simonetta Cola[5], Paolo Scotton[1], Fabrizio Conforti[6], Andrea Fuganti[4]

(1) Dip. Geoscienze; Università di Padova;
(2) CNR-IGG Uos Padova;
(3) DII; Università di Padova;
(4) DICAM; Università di Trento;
(5) DICEA; Università di Padova;
(6) Tassullo Materiali Spa; Tassullo (TN)

Parole chiave (*key words*): stoccaggio ipogeo (*hypogeal warehouse*), proprietà termiche delle rocce (*rock thermal properties*), dolomite (*dolomite*), sostenibilità ambientale *(environmental sustainability*), Melinda, Tassullo

RIASSUNTO

Notoriamente nella storia dell'uomo, il sottosuolo ha sempre rappresentato luogo di conservazione alimentare, sia per le favorevoli condizioni di temperatura e umidità che per il suo ruolo di protezione dagli agenti esterni e dagli insetti nocivi.

Recentemente, in Val di Non (TN), un accordo siglato tra la Tassullo Materiali spa, il Consorzio Melinda e gli enti locali ha permesso di riutilizzare in modo estremamente vantaggioso per il territorio gli ampi spazi in sotterraneo creati dalle attività estrattive effettuate nella cava di Rio Maggiore. Tali spazi, infatti, grazie all'inerzia termica tipica dell'ambiente ipogeo, possiedono caratteristiche idonee alla conservazione anche su lungo periodo di generi alimentari deperibili, con consistenti risparmi di energia.

Le locali condizioni geologiche, rendono il sito particolarmente adatto ad un suo impiego per lo stoccaggio: dal 2013, le attività estrattive sono condotte in modo da creare delle celle autonome, utilizzate prevalentemente per la conservazione in atmosfera controllata delle mele Melinda e, potenzialmente, per lo stoccaggio di risorse idriche e come locazione del *datacenter* della Provincia di Trento.

La filiera virtuosa, che qui coniuga l'attività di estrazione ipogea con un riutilizzo degli ambienti di scavo, costituisce un esempio di eccellenza di rilievo internazionale.

EXTENDED ABSTRACT

Since from the ancient times, the underground has always been used for food storage, thanks to the favorable conditions of constant temperature and humidity as well as for the capacity to protect from external agents and harmful insects.

Recently, in Val di Non (in the Eastern Alps in North Italy), an important agreement has been signed between the Tassullo Materiali spa, the Melinda Consortium and the local authorities in order to reuse the large underground spaces created by the extraction activities carried out in the quarry of Rio Maggiore for the long-term preservation of perishable foodstuffs. The local geological conditions and the thermal characteristics of the rock (dolomia) make the site particularly suitable for the use as a storage, with consistent energy savings.

Hence, since from 2013, the extraction activities are conducted in order to create autonomous cells mainly used for the conservation in a controlled atmosphere of the apples produced by Melinda Consortium. The underground space would be used also to store water resources and to host the data center of the Trento Province.

This agreement, that combines different interests in a virtuous supply chain, is an interesting example of integration between hypogeous extraction and useful reuse of excavation environments in an extremely beneficial way for the territory.

INTRODUZIONE

In località Tuenetto di Predaia, in sinistra orografica della Val di Non (TN) si trova la miniera di Rio Maggiore, in concessione alla Tassullo Materiali spa per l'estrazione della Dolomia di Torra (Dolomia giurassica), utilizzata come materia prima per la realizzazione di materiali speciali per l'edilizia. La Tassullo è un'azienda leader nella produzione di materiali leganti e inerti per l'edilizia e per il restauro (isolamenti, pavimentazioni, ecc.), prodotti ottenuti dal 1909 dall'estrazione e lavorazione di circa 120.000 m^3/anno di rocce (dolomia) e altri minerali, con un aumento annuale di estrazione del 10%.

Dal 2004 l'azienda ha intrapreso un innovativo progetto di coltivazione in sotterraneo della miniera Rio Maggiore allo scopo di sviluppare l'attività produttiva dell'impianto di lavorazione di Mollaro, posto nelle vicinanze della miniera, in modo da riutilizzare le cavità create dall'estrazione dei minerali per lo stoccaggio alimentare con metodi industriali. Un recente accordo firmato nel giugno 2013, infatti, tra la Tassullo Materiali spa, il Consorzio Melinda e gli enti locali ha permesso di portare avanti tale attività combinando insieme gli interessi privati e di salvaguardia del territorio, prevedendo di riutilizzare gli spazi ipogei creatisi nel tempo per scopi differenti da quelli originari di estrazione. Dopo un'opportuna valutazione dei relativi effetti ambientali, è stato così avviato un progetto di riutilizzo innovativo delle cavità sotterranee per la realizzazione di magazzini ipogei per lo stoccaggio in atmosfera controllata delle mele del Consorzio Melinda e di bacini per l'accumulo e l'approvvigionamento idrico del territorio. I lavori di conversione, avviati nel 2013, sono a tutt'oggi in fase di realizzazione. Elemento chiave del progetto è lo sfruttamento dell'enorme capacità termica della roccia naturale, che, abbinata alla bassa conducibilità termica, permette di realizzare camere isolate, non soggette alle escursioni termiche stagionali, azzerando l'uso degli isolanti artificiali abitualmente impiegati nei magazzini epigei.

L'utilizzo delle cavità sotterranee è prevalentemente alimentare: nel 2016 erano stoccate in atmosfera controllata all'interno delle cave circa 30.000 tonnellate di mele, con un raddoppio previsto entro il 2021. Un ulteriore elemento di innovazione è dato dalla combinazione della frigoconservazione ipogea con il controllo dell'atmosfera interna: non appena il vano è riempito con le mele da conservare, viene chiuso in modo ermetico e l'atmosfera interna viene sostituita con azoto. Questa tecnica necessita che le celle non permettano fughe di gas, al fine di mantenere inalterati nel tempo sia gli elevati tassi di N_2 e CO_2 che il ridotto tenore di O_2, né risentano di infiltrazioni idriche. A tal fine, la Tassullo Materiali spa ha studiato e prodotto uno speciale materiale cementizio, impermeabile anche ai gas e non tossico, così da poter essere impiegato nel rivestimento delle cavità ipogee per la conservazione alimentare.

Come illustrato nel seguito, le cave in esame sono particolarmente adatte all'impiego quale volume di stoccaggio, date le locali condizioni litostratigrafiche, idrogeologiche e geo-strutturali. Dopo una breve presentazione delle principali caratteristiche dell'impianto, il presente lavoro illustra alcune analisi con-

dotte sul comportamento termico dell'ammasso roccioso in relazione ai processi di climatizzazione ipogea ivi implementati. In particolare, i primi risultati ottenuti con una modellazione FEM (Modello agli Elementi Finiti) dell'evoluzione delle condizioni termofisiche nell'intorno delle celle sono stati validati tramite il confronto con i dati di monitoraggio registrati durante le prime fasi di stoccaggio nelle cavità.

I vantaggi offerti da questa soluzione sono diversi. Innanzitutto vi è un vantaggio economico legato al consumo di energia: le analisi termiche condotte hanno infatti dimostrato come la conservazione ipogea delle mele permetta un significativo risparmio energetico rispetto ai classici magazzini epigei. In secondo luogo, la conservazione così dilatata nel tempo permette di proporre il prodotto sul mercato nel momento di maggiore convenienza per il produttore, garantendo così un ulteriore vantaggio. Infine, il riutilizzo delle cavità formate dalle attività estrattive permette di non sottrarre gli spazi in superficie ad altri usi (coltivazione, residenziale, ecc.) e di preservare il paesaggio, fatto particolarmente importante in aree dove lo spazio è limitato, come in ambiente montano di fondovalle.

1. MAGAZZINI IPOGEI A TEMPERATURA CONTROLLATA

In generale, l'uso di spazi sotterranei per la realizzazione di magazzini di stoccaggio a temperatura controllata permette una significativa riduzione dei costi di gestione legati al riscaldamento e raffreddamento degli ambienti rispetto a quelli delle strutture superficiali di pari dimensione. Questo perché, anche a profondità molto basse, le temperature nel terreno e negli ammassi rocciosi presentano escursioni più contenute dell'aria esterna. Non solo la temperatura interna dei magazzini è meno influenzata dalle variazioni di umidità e temperatura esterne, ma anche il consumo energetico dei sistemi di condizionamento è minore, dato che la minor differenza di temperatura tra la camera e l'ambiente circostante garantisce una ridotta dispersione di calore (Carmody & Sterling, 1984; Park *et al.*, 1999). I costi di gestione, dunque, risultano essere nettamente inferiori rispetto a quelli per magazzini epigei, essendo più contenuti gli interventi di climatizzazione da applicare.

Il riutilizzo, inoltre, permette di abbattere anche i costi di costruzione. Infatti, nel caso la cavità non esistesse in origine, i costi di costruzione dei magazzini ipogei sarebbero generalmente superiori rispetto a quelli di strutture superficiali: secondo una stima elaborata da Zevgolis *et al.* (2004), la creazione di spazi sotterranei destinati allo stoccaggio ammonterebbe a circa il 60% del costo totale dell'opera.

Ovviamente il costo iniziale di realizzazione di celle di stoccaggio si riduce sensibilmente se si realizzano strutture ipogee in spazi sotterranei già disponibili, come miniere o gallerie in disuso. Secondo una statistica mondiale stilata da Sugai *et al.* (2010), le ex miniere sotterranee riutilizzate per la realizzazione di magazzini a temperatura controllata sono state adibite solo per il 15% alla conservazione di alimenti, per il 13% alla coltivazione di funghi e per l'11% allo stoccaggio del petrolio greggio; nei rimanenti casi, invece, si sono creati magazzini adibiti principalmente allo stoccaggio di rifiuti industriali o all'immagazzinamento di materiali che non necessitano di temperature controllate, come automobili e navi.

La conservazione di prodotti ortofrutticoli in ambiente ipogeo è favorita anche dal poter controllare e mantenere costante nel tempo temperatura e umidità. Condizioni di umidità troppo bassa possono portare ad un'eccessiva perdita di acqua/peso da parte del prodotto, mentre un'umidità troppo elevata può produrre l'innesco di marcescenza: di conseguenza, impermeabilizzazione e isolamento termico risultano accorgimenti importanti anche se la loro realizzazione può incrementare il costo totale di costruzione dell'impianto di circa il 16% (Zevgolis *et al.*, 2004). D'altra parte, non tutti i prodotti ortofrutticoli possono essere sottoposti alla cosiddetta "frigoconservazione ipogea": per utilizzarla è infatti necessario che il prodotto mantenga intatte le caratteristiche sensoriali e nutrizionali fino al termine del periodo di stoccaggio. Park *et al.*, (1999) e Choi *et al.*, (2000) hanno svolto una serie di test sperimentali in modo da identificare le condizioni di temperatura/umidità e la durata ottimali di frigoconservazione ipogea in atmosfera controllata per svariate tipologie di prodotti ortofrutticoli.

Nella Provincia di Trento la diffusione di magazzini ipogei è stata favorita oltre che da fattori di carattere economico anche dall'aumento nel tempo della produzione agricola e delle aree geografiche dove tale produzione viene commercializzata. Si è creata, così, la necessità di allungare il periodo di conservazione dei prodotti agricoli, garantendone elevate proprietà qualitative e limitando il più possibile l'utilizzo di conservanti, elementi che vengono soddisfatti grazie alle stabili e controllabili condizioni di conservazione nelle celle sotterranee. Va inoltre aggiunto che in un contesto di aumento delle temperature globali, tali pratiche forniscono un contributo importante alla riduzione delle emissioni climalteranti in atmosfera, grazie alla loro elevata efficienza energetica.

1.1 La miniera di Rio Maggiore e il riutilizzo degli spazi ipogei

Il complesso si trova a 275 m sotto il livello naturale del terreno, a sua volta a 575 m s.l.m. La coltivazione della miniera Rio Maggiore prevede la realizzazione di 62 camere di estrazione, scavate mediante esplosivo e di una galleria principale di collegamento delle varie camere, posta su due livelli: livello 0 con quota di imbocco a circa 540 m s.l.m. e livello 1 con quota di imbocco a circa 580 m s.l.m.

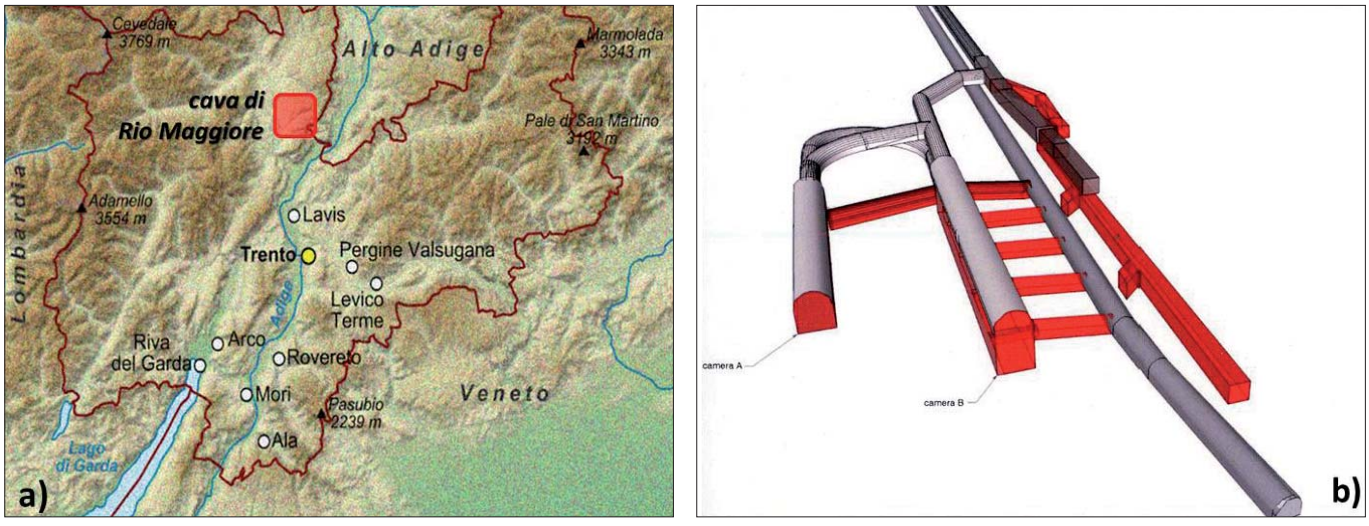

Figura 1 – (a) Mappa del nord Italia con indicazione dell'ubicazione dal sito minerario "Rio Maggiore"; (b) schema tridimensionale delle camere ipogee e dell'imbocco principale a livello 0.

(*Fig.* 1). A intervento concluso la superficie complessiva di coltivazione della miniera risulterà pari a 757.540 m^2.

In base al programma di miglioramento ambientale una prima innovazione messa in atto nella miniera è l'utilizzo di parte degli spazi ipogei per la *realizzazione di impianti adibiti alla lavorazione della dolomia estratta:* in tale modo, le prime fasi della filiera produttiva (estrazione, frantumazione e vagliatura) sono completate direttamente in sotterraneo, riducendo le emissioni di polvere e rumore e l'impatto ambientale dell'intero processo. Inoltre, il mantenimento dei materiali in ambiente sotterraneo a microclima controllato permette un incremento della qualità del prodotto finito (Fuganti *et al.*, 2013). Le camere adibite alle prime fasi di lavorazione sono collegate tra loro da gallerie e cunicoli di servizio e allo stabilimento esterno mediante nastro trasportatore. All'esterno viene completato il ciclo produttivo con miscelazione, confezionamento e caricamento dei prodotti finiti.

Dato che i comuni di Taio e Vervò e i vari Consorzi Irrigui di Miglioramento Fondiario presenti nella Val di Non presentano notevoli difficoltà di approvvigionamento idrico sia per uso potabile che irriguo, una parte dei vuoti lasciati dallo scavo della miniera sono stati riutilizzati per la realizzazione di bacini di accumulo. In particolare, sono stati realizzati due *serbatoi sotterranei per l'accumulo dell'acqua*, con la possibilità di ampliare in futuro i volumi di immagazzinamento fino a un totale di 500.000 m^3 con la costruzione di ulteriori bacini. La posizione dei serbatoi ottimizza i costi energetici per il pompaggio e la distribuzione nel territorio (*Fig.* 2a): infatti, il livello della falda acquifera profonda (1) all'interno della dolomia si trova ad una quota inferiore rispetto alla zona estrattiva e presenta una temperatura pressoché stabile di 10°C. Attraverso appositi pozzi (2), realizzati durante la fase iniziale di ricerca mineraria, l'acqua della falda è pompata e stoccata all'interno dei bacini di accumulo sotterranei (3), da cui viene mandata in superficie mediante un pozzo di collegamento tra sotterraneo e fuori terra. Il percorso dell'acqua dai pozzi ai bacini è studiato per dissipare il calore generato dal sistema di raffreddamento (4) delle celle frigorifere ipogee. In questo modo viene garantito un approvvigionamento idrico con una manutenzione ridotta al minimo e con un'elevata sicurezza, in quanto i bacini sono realizzati in roccia compatta con ottime caratteristiche meccaniche e il pelo libero dell'acqua si trova a una quota inferiore rispetto alle gallerie di accesso ai serbatoi. Inoltre, la conservazione dell'acqua avviene in condizioni microclimatiche ideali (assenza di luce che impedisce la formazione di alghe ed elevata umidità che annulla l'evapotraspirazione) (Fuganti *et al.*, 2013).

L'intero sistema è organizzato attraverso un corridoio centrale di smistamento in cui possono circolare i mezzi di trasporto, da dove avviene l'accesso a camere separate su entrambi i lati (*Fig.* 2b).

Inoltre una parte delle camere di estrazione sarà allestita per poter ospitare il *data-center* della Provincia di Trento, garantendo anche in questo caso un ambiente ottimale dal punto di vista della temperatura e della sicurezza.

Il riutilizzo primario dei vuoti minerari sotterranei lasciati dallo scavo della miniera Rio Maggiore è comunque quello della *conservazione delle mele* (*Fig.* 3), utilizzando le tecniche di frigoconservazione in spazi ipogei in associazione con il controllo dinamico dell'atmosfera interna e senza l'impiego di isolanti artificiali.

Tutte le varie strategie di conservazione applicate ai prodotti ortofrutticoli sono volte a controllare i parametri dell'ambiente di conservazione (principalmente velocità di raffreddamento, igiene, temperatura, umidità, velocità dell'aria nelle zone di stoccaggio e composizione dell'aria): lo sviluppo dei microrganismi infatti dipende dall'ambiente di conservazione, dalle caratteristiche intrinseche degli alimenti (composizione chimica, pH e contenuto d'acqua) e dallo stato iniziale dei prodotti. La capacità di mantenere il prodotto in ottime condizioni è direttamente proporzionale alla durata della fase iniziale di adattamento della popolazione microbica all'ambiente di conservazione, terminata la quale inizia la proliferazione esponenziale. Nelle celle ipogee qui descritte sono utilizzate in modo combinato i seguenti accorgimenti:

1. *Refrigerazione con un controllo della temperatura* molto preciso e periodicamente calibrato, in modo da avere condizioni uniformi all'interno della cella (le differenze devono essere inferiori a 1° C). Prima che arrivi il carico di mele, attraverso il pre-raffreddamento, la cella viene portata da una temperatura naturale di 10-11°C, caratteristica della roccia, alla temperatura ottimale di conservazione (0-1°C), poi mantenuta costante per tutto il periodo di stoccaggio. Le unità di raffreddamento in cella sono alimentate da acqua con aggiunta di glicole propilenico (fluido antigelo a ridotto impatto ambientale, scelto per evitare contaminazioni del sito e della falda in caso di perdite dei condotti).
2. *Controllo dell'umidità interna*: l'aria di cella è mantenuta ad un elevato tasso d'umidità relativa (90-95%) al fine di ridurre la migrazione d'acqua dal frutto verso l'esterno. Il controllo avanzato dell'umidità interna delle celle di stoccaggio è possibile grazie alle caratteristiche geologiche dell'ammasso. Sebbene le rocce siano dotate di buona permeabilità, le sovrastanti formazioni marnose ricche in contenuto argilloso (vedi *Cap.* 2) limitano l'infiltrazione delle acque meteo-

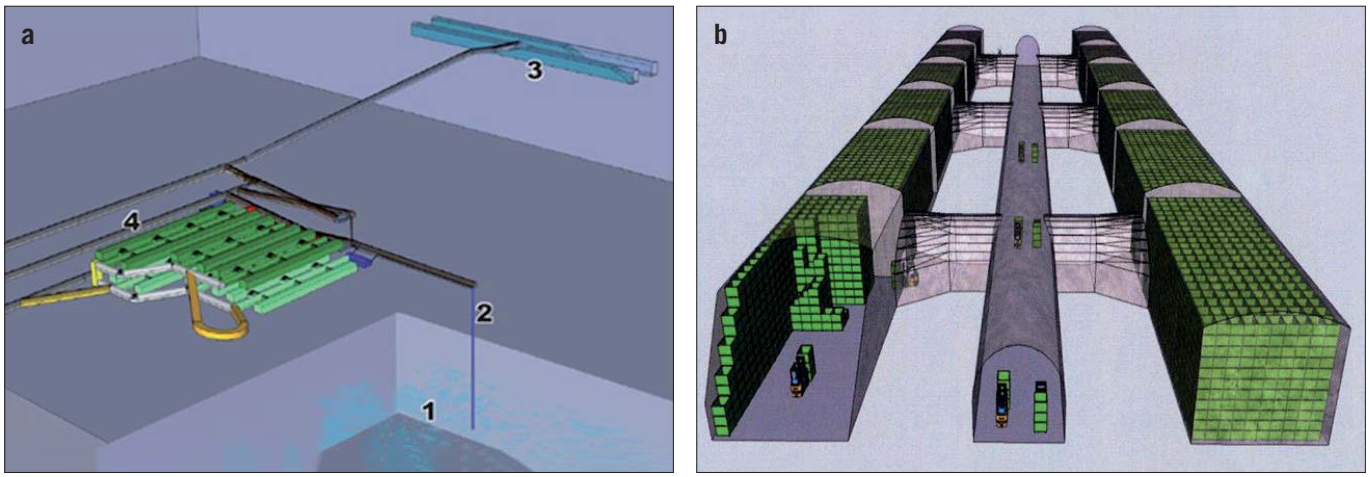

Figura 2 – (a) Funzionamento degli impianti di pompaggio e stoccaggio dell'acqua; (b) Elementi costituenti ciascuna unità dell'impianto sotterraneo. A gennaio 2017 sono presenti circa 30 celle di conservazione con sezione di circa 12m x 11m e lunghezza 25m. Ogni cella ha una capacità massima di circa 900 ton di mele, per una capienza complessiva di circa 30.000 ton di mele (circa il 10% della produzione del Consorzio Melinda). (da www.melinda.it)

riche nei depositi sottostanti di dolomia, e mantengono così un basso grado di saturazione. Inoltre, il fronte di accesso della miniera è il risultato di un piano di faglia che ha determinato il contenimento della falda acquifera in profondità: per la realizzazione della miniera/magazzino non si sono quindi rese necessarie opere di drenaggio delle acque di falda.

3. *Ventilazione forzata*: le celle sono equipaggiate con 4 ventilatori con inverter in grado di muovere l'aria con una portata di 40 Vol/h (circa 78.000 m^3/h), in modo da portare l'aria della cella alla temperatura di conservazione in poche ore e quella delle mele in alcuni giorni. Inoltre, all'interno dell'area di stoccaggio è necessario mantenere una certa ventilazione (qualche decimo di m/s) per evitare stratificazioni e disuniformità delle condizioni di temperatura e umidità. Per questo i ventilatori generano un funzionamento a regime tale da garantire un afflusso uniforme d'aria a tutta la merce conservata; anche la distribuzione dei cassoni che contengono le mele deve essere ottimizzata a questo scopo.
4. *Controllo dell'atmosfera interna a elevato tenore di anidride carbonica (CO_2) e di azoto (N_2) a scapito dell'ossigeno (O_2).* L'aria nelle celle viene ricircolata e al contempo la sua composizione viene definita da un sistema esterno di generazione dell'atmosfera. Una volta che una cella è riempita e sigillata, i generatori di atmosfera riducono velocemente le quantità d'ossigeno al suo interno, aumentando CO2 e N2. I livelli di gas sono poi costantemente monitorati e regolati grazie ai sistemi di monitoraggio presenti in ciascuna cella. Questa tecnica si è rivelata estremamente efficace per rallentare la degradazione perché le mele, a differenza di altri prodotti, mantengono la respirazione cellulare (che richiede O2 ed emette CO2), con una cinetica regolata dalla concentrazione dei due composti chimici. Inoltre, la diminuzione della pressione parziale di ossigeno riduce lo sviluppo di microrganismi aerobi e il rallentamento di altri processi biologici, sebbene un certo contenuto di ossigeno vada comunque mantenuto per evitare l'innesco di meccanismi anaerobici di fermentazione. L'atmosfera controllata necessita che le cavità scavate nella roccia siano impermeabili ai gas: per questo la parete delle celle è trattata con un materiale minerale a doppio strato a presa accelerata e a ridotta permeabilità ai gas, appositamente studiato e messo in opera dalla Tassullo Materiali spa. Questo materiale è usato per regolarizzare la superficie interna alla cella e successivamente rifinito con una rasatura/finitura con materiale minerale impermeabilizzante.

Di fondamentale importanza per massimizzare l'efficienza della conservazione è anche il grado di maturazione delle mele alla raccolta. A tal fine la suddivisione dello spazio in celle è particolarmente efficace perché permette di stoccare assieme mele della stessa varietà raccolte a pochi giorni di distanza (massimo 7-10 giorni).

Dal punto di vista economico, la conservazione in magazzini ipogei risulta più efficiente in termini energetici rispetto alla conservazione epigea, pur in presenza di consumi energetici inizialmente più elevati, in quanto l'impianto frigorifero inizialmente richiede un maggiore consumo di energia per contrastare l'iniziale dispersione del freddo nella massa rocciosa. Successivamente però il mantenimento della temperatura all'interno della roccia richiede una minima quantità di energia, grazie alle basse temperature naturali e alle proprietà della roccia. Il risparmio energetico aumenta progressivamente negli anni di funzionamento: secondo una stima dell'azienda, il consumo di energia elettrica annuo in condizioni di regime è inferiore del 70% rispetto alle soluzioni superficiali.

Tale stoccaggio, poi, non risente dei picchi che caratterizzano i periodi estivi di un magazzino epigeo e la richiesta frigorifera risulta più stabile, permettendo così una previsione più precisa dei costi di mantenimento. Inoltre, l'accumulo frigorifero della roccia garantisce una maggiore autonomia delle celle in caso di guasto dell'impianto. Un ulteriore risparmio deriva dal fatto che l'ammasso roccioso mantiene inalterate le sue proprietà termiche nel tempo, a differenza degli isolanti artificiali che hanno una vita limitata e col passare del tempo, per diffusione di umidità all'interno delle porosità del materiale, perdono le loro proprietà e devono essere smaltiti in discariche di rifiuti speciali, con conseguenti ulteriori elevati costi ambientali.

Infine, anche l'uso dell'acqua della falda acquifera presente negli strati più profondi (vedi paragrafo 2) come mezzo di smaltimento del calore di condensazione dei gruppi frigoriferi apporta un ulteriore risparmio energetico ed economico. Nelle pompe di calore, infatti, lo scambio termico lato condensatore è eseguito con scambiatori a fascio tubiero alimentati dall'acqua di falda pompata a circa 15°C. La stabilità termica dell'acqua sotterranea e l'elevata efficienza energetica delle pompe aria-acqua rende particolarmente efficiente questa soluzione.

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO DELL'AREA

La Val di Non è legata ad un sistema tettonico secondo l'allineamento tettonico N-S (linea Trento-Cles); questo sistema di faglie ha avuto origine in età permiana e, evolvendosi durante tutte le fasi di orogenesi alpina, ha permesso l'affioramento in questa zona di diverse formazioni appartenenti al periodo dal Triassico all'Eocene (Prosser, 2000). Come mostrano la carta geologica locale e la relativa sezione stratigrafica riportate in *Fig.* 4 (Fuganti, 1964; Fuganti *et al.*, 2013), con l'esclusione del sedimento alluvionale quaternario, la successione stratigrafica inizia con un sistema di formazioni prettamente dolomitiche in basso e si chiude con la Formazione della Scaglia Rossa nella parte alta.

Figura 3 – (a) Una cella vuota, pronta per l'immagazzinamento; (b) Fase di stoccaggio delle mele; (c) le mele all'interno di una cella a temperatura e atmosfera controllata, viste dall'oblò della porta di accesso

Dal punto di vista geologico-strutturale l'area di studio è dominata da poche discontinuità subverticali e il principale sistema secondo l'allineamento N-S si trova ad occidente, al di fuori dall'area della miniera. La combinazione di queste impostazioni geologiche, strutturali e idrogeologiche influisce pertanto sull'infiltrazione verticale delle acque sotterranee che, nella zona mineraria, è quasi trascurabile. In effetti, le acque meteoriche presentano una scarsa infiltrazione verso il basso, in conseguenza delle formazioni prevalentemente impermeabili e sub-orizzontali presenti al di sotto del piano campagna. La conseguente condizione anidra delle sottostanti rocce dolomitiche le rende un materiale ottimo per ricavare cemento speciale per usi edilizi, ma, allo stesso tempo, permette di avere una bassissima conducibilità termica, ideale per la frigoconservazione.

Le formazioni rocciose interessate e le principali caratteristiche geomeccaniche sono riportate nella relazione SIA sviluppata nel 2009. La formazione rocciosa interessata dalla coltivazione del giacimento è una formazione appartenente alle dolomie del Giurassico, caratterizzata da una successione dolomitica della potenza variabile tra i 60 e 200 m, costituita da alternanze ritmiche di dolomie biogeniche e intraclastiche e cristalline, in strati di spessore variabile tra 20 e 80 cm. Essa è confinata al tetto dalla formazione dei Calcari Bituminosi Selciferi, da considerare principalmente di età albiana (vedi *Fig.* 4), con spessore massimo (70-80 m) negli affioramenti occidentali presso la vecchia miniera, dove si coltivavano gli scisti bituminosi per estrarre l'ittiolo. La potenza diminuisce andando verso Est e verso Nord (Vervò e Taio) dove si raggiungono i 20-30 m. La stratificazione è sempre fitta, fra 5 e 20 cm di spessore, con frequenti intercalazioni marnose nell'area sovrastante la zona di miniera (Golder Associates, 2009).

Dal punto di vista geostrutturale, la Dolomia di Torra si presenta come una formazione monoclinalica debolmente immergente verso ovest (270/09; 294/05). I piani di stratificazione si presentano sia come superfici lisce, da planari a leggermente ondulate, caratterizzate dalla presenza di sottili veli marnosi o argillosi, sia come superfici stilolitiche, molto scabre, prive di riempimenti argillosi. Lungo i piani di stratificazione e in corrispondenza dei livelli dolomitici più fratturati e porosi sono presenti fenomeni carsici che si manifestano come cavità e concrezioni calcitiche; l'ammasso risulta interessato poi da condotti e cavità carsiche di dimensioni contenute.

In *Tab.* 1 si riportano i parametri di resistenza e deformabilità ricavati per ciascuna zona di omogeneità individuata nell'ammasso roccioso dalle misure/elaborazioni eseguite da Golder Associates in fase di progettazione e studio di fattibilità dell'intero progetto.

3. INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLISTICHE ESEGUITE

3.1 Caratteristiche fisiche e termiche della roccia

La conoscenza delle caratteristiche fisiche e termiche delle rocce ospitanti è fondamentale per un'adeguata valutazione di progetti di immagazzinamento in sotterraneo. Le proprietà termiche delle rocce sono influen-

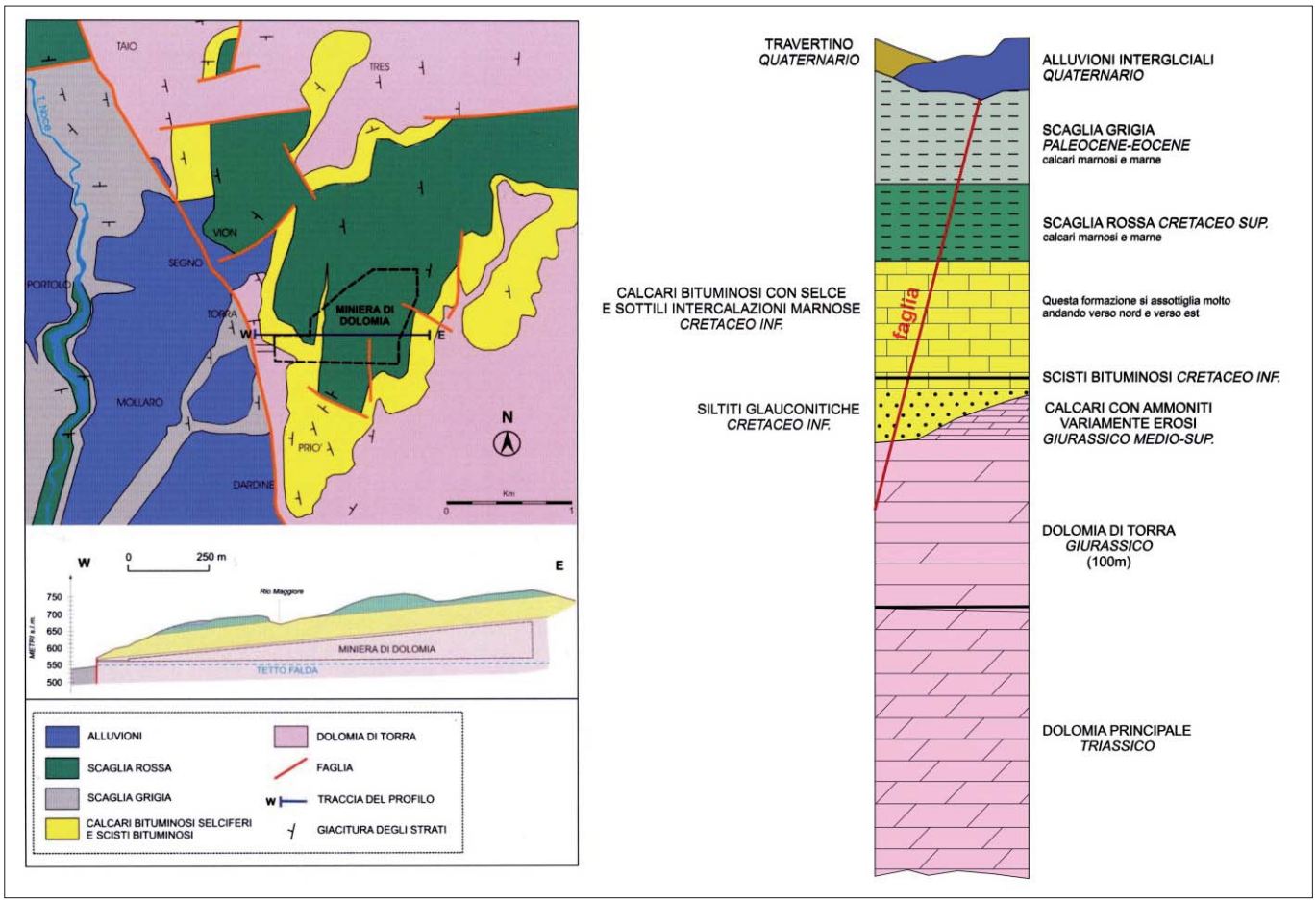

Figura 4 – Carta e profilo geologico della miniera di Rio Maggiore e delle zone limitrofe (da Fuganti et al.*, 2013 e dalla Relazione SIA, Golder Associates, 2009)*

Dal punto di vista geostrutturale, la Dolomia di Torra si presenta come una formazione monoclinalica debolmente immergente verso ovest (270/09; 294/05). I piani di stratificazione si presentano sia come superfici lisce, da planari a leggermente ondulate, caratterizzate dalla presenza di sottili veli marnosi o argillosi, sia come superfici stilolitiche, molto scabre, prive di riempimenti argillosi. Lungo i piani di stratificazione e in corrispondenza dei livelli dolomitici più fratturati e porosi sono presenti fenomeni carsici che si manifestano come cavità e concrezioni calcitiche; l'ammasso risulta interessato poi da condotti e cavità carsiche di dimensioni contenute.

In *Tab.* 1 si riportano i parametri di resistenza e deformabilità ricavati per ciascuna zona di omogeneità individuata nell'ammasso roccioso dalle misure/elaborazioni eseguite da Golder Associates in fase di progettazione e studio di fattibilità dell'intero progetto.

3. INDAGINI SPERIMENTALI E MODELLISTICHE ESEGUITE

3.1 Caratteristiche fisiche e termiche della roccia

La conoscenza delle caratteristiche fisiche e termiche delle rocce ospitanti è fondamentale per un'adeguata valutazione di progetti di immagazzinamento in sotterraneo. Le proprietà termiche delle rocce sono influenzate dalla loro composizione chimico-mineralogica e da vari fattori fisici, come le caratteristiche strutturali e tessiturali, la porosità, la densità apparente, il grado di saturazione e quello di fratturazione e alterazione. Generalmente, all'aumentare della porosità la conducibilità termica diminuisce e viceversa per la densità (Singh, *et al.* 2005). Inoltre, il grado di saturazione e la conducibilità termica del fluido presente nei pori (acqua, olio, gas naturale, aria) influenzano significativamente la conducibilità termica della roccia nel suo insieme. Il rapporto tra la conducibilità termica e la porosità o la densità è influenzato anche dai processi di formazione e dalla composizione mineralogica e strutturale delle rocce. I processi di fratturazione e alterazione della roccia sono processi che tendono ad aumen-

Tabella 1 – Parametri di resistenza e deformabilità. *Il fattore di disturbo D è stato impiegato per il calcolo dei soli parametri residui del criterio di Hoek e Brown (Golder Associates, 2009).

dati geologici	*formazione geologica*		Dolomia di Torra			Calcari
	zona di omogeneità		D1	D2	D3	C
Parametri di resistenza e doformabilità della roccia intatta	Resistenza alla compressione uniassiale [Mpa]	$S_{c,ri}$	79,47	79,47	79,47	30,00
	Parametro m_i	m_i	4,90	4,90	4,90	4,00
	Modulo di Young [GPa]	E_{ri}	66,50	66,50	66,50	21,42
	Peso unità di volume [kN/m^3]	g	26,83	26,83	26,83	23,54
	Coefficiente di Poisson	n	0,27	0,27	0,27	0,30
Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso	Rock mass rating	*classe*	*II*	*III*	*IV*	*IV*
		RMR	61 - 80	41 - 60	21 - 40	21 - 40
	Geological Stress Index	GSI	64	55	41	29
	Fattore di disturbo*	D	0,25	0,25	0,25	-
Parametri di resistenza e doformabilità dell'ammasso roccioso	Parametri criterio Hoek e Brown	m_b	1,36	0,98	0,60	0,32
		s_b	0,02	0,01	0,00	0,00
		a	0,50	0,50	0,51	0,52
		m_b^{res}	1,13	0,78	0,41	-
		s_b^{res}	0,01	0,00	0,00	-
		a^{res}	0,50	0,50	0,51	-
	Resistenza a trazione [MPa]	$S_{t,ar}$	-1,07	-0,55	-0,19	-0,04
	Resistenza alla compressione uniassiale [Mpa]	$S_{c,ar}$	10,67	6,39	1,80	0,48
	Modulo di Young [GPa]	E_{ar}	40,56	27,15	11,37	1,64
	Coefficiente di spinta a riposo	k_0	0,37	0,37	0,37	0,43

tare la porosità complessiva di una formazione rocciosa e di conseguenza diminuiscono la conducibilità del materiale.

Al fine di eseguire una caratterizzazione termica delle rocce presenti nel sito in esame, sia in condizioni indisturbate che dopo l'attivazione delle celle di conservazione ipogea, sono state determinate tramite misure sperimentali le principali proprietà fisiche e termiche (porosità, densità, conducibilità termica e capacità termica) su diversi provini di dolomia, ricavati da 8 campioni prelevati in diverse zone della miniera (De Lullo, 2016). Le prove sono state eseguite sia su provini in condizioni di temperatura ambiente (20°C), in stato anidro e dopo imbibizione, sia dopo essere stati sottoposti a 10 cicli termici di gelo/disgelo secondo la Norma *UNI EN 12371 "Metodi di prova per pietre naturali – Determinazione della resistenza al gelo*" definendo, per tale prova, un intervallo di temperatura e numero di cicli termici adatto al problema trattato: si è imposta una variazione di temperatura ogni 24 ore in un intervallo [-10°C;+20°C], scelto appositamente più ampio di quello applicato realmente allo scopo di esaminare condizioni più gravose sia nella fase di congelamento (-10°C) che nella fase di scongelamento (+20°C).

L'azione dei processi di congelamento-scongelamento dell'acqua all'interno dei pori, delle fessure e delle articolazioni delle rocce è di notevole interesse per valutarne l'alterazione fisica qualora la temperatura oscilli attorno agli 0°C, poiché è uno dei principali fattori che generano disgregazione. L'acqua contenuta all'interno delle porosità congela generando un incremento del proprio volume di circa 9% con un conseguente aumento di pressione interna ai pori e la formazione di microfratture, che poi tendono a diffondersi nel volume circostante e a fondersi insieme. La generazione e la dissipazione ciclica delle pressioni dovute al cambio di fase dell'acqua interstiziale creano un danno cumulativo che causa il deterioramento delle rocce (Park *et al.*, 2014) e un rapido decadimento della sua resistenza (Jamshidi *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2004). In accordo con quanto suggerito da Liu *et al.* (2015), la porosità è stata misurata come indicatore della degradazione della roccia sotto l'azione di cicli gelo-disgelo.

La caratterizzazione termica del materiale è stata realizzata con uno strumento con sonda piana basato sul metodo *Modified Transient Plane Source* (Conforme a ASTM D7984) (*Fig.* 5). Il metodo garantisce un'elevata precisione, grazie alla taratura effettuata all'inizio di ogni serie di misure su alcuni materiali di conducibilità nota. Il sensore ha dimensioni ridotte e permette di realizzare misure in più punti di ciascuna faccia del campione, ottenendo il valore finale della conducibilità termica sulla faccia come una media dei valori ricavati sulla faccia stessa, procedura che incrementa l'attendibilità del dato. Sono state effettuate 5 serie di misurazioni in 5 punti posti su ogni faccia del campione (centro e 4 angoli), ciascuna misurazione composta da un rilevamento continuo di 8 acquisizioni (da De Lullo, 2016, tesi di laurea).

3.2 Modellazione termica

L'applicazione della modellistica numerica rappresenta un valido approccio per la valutazione di strutture complesse, permettendo di valutare l'efficienza a lungo termine degli impianti anche tenendo conto delle variazioni di temperatura imposte nei processi di scarico e carico delle mele nelle celle ipogee (prelievo/reimmissione di energia). Al fine di

Figura 5 – Acquisizione sperimentale delle proprietà termiche (da De Lullo, 2016, tesi di laurea)

studiare gli effetti termici generati all'interno dell'ammasso roccioso dalle variazioni di temperatura imposte è stato realizzato un modello numerico bidimensionale in ambiente Feflow 7.0, codice di calcolo agli elementi finiti 2D-3D, sviluppato dalla WASY GmbH di Berlino/Danish Hydraulic Institute (DHI) per lo studio della propagazione del calore all'interno di un mezzo poroso.

L'uso del modello ha permesso di valutare l'entità dell'anomalia termica indotta e il volume di roccia interessato a partire dalla condizione di equilibrio e di confrontarla con i dati registrati in sito da alcune sonde termiche poste nella roccia in prossimità alla parete di una cella. Inoltre, il modello numerico ha permesso di valutare i flussi termici che avvengono nel magazzino ipogeo (scambio termico tra l'aria raffreddata dalle macchine, la roccia e le mele), in modo da calcolare il fabbisogno frigorifero della cella ed eseguire una valutazione energetica dell'impianto da confrontare con quella dei magazzini epigei.

Il problema è stato sviluppato in condizioni 2D studiando una proiezione piana verticale ortogonale all'asse della galleria di collegamento. Il flusso di calore avviene in condizioni insature, poiché il contenuto d'acqua è trascurabile a causa dell'elevata profondità della falda che non interessa il sito minerario. È stato realizzato un dominio di calcolo rettangolare di dimensioni pari a circa 71m x 72m con al centro la cavità con sezione di 11m x 12m. La *mesh* di calcolo è stata infittita nell'intorno delle posizioni delle sonde di temperatura presenti in sito, al fine di ottenere un'analisi più precisa del trasporto di calore in prossimità ad esse. Le sonde sono posizionate al centro del soffitto e della parete di ogni cella con distanza crescente (0,5-1-2-4 m).

La simulazione è stata condotta imponendo inizialmente un flusso di calore in condizioni permanenti per definire la distribuzione della temperatura in accordo con il gradiente geotermico (pari a 0,03°C/m). In seguito si è sviluppata un'analisi in condizioni transitorie per studiare la modifica del campo termico dovuta al controllo della temperatura in cella. Il processo è stato simulato per un periodo di quindici mesi, pari cioè a quello registrato dalle sonde in sito, così da poter confrontare i valori di temperatura misurati e simulati e ottenere la calibrazione del modello.

La temperatura iniziale è stata fissata a un valore di 4° all'interno della cavità e 12-13°C nell'ammasso roccioso, temperature corrispondenti al gradiente geotermico reale, definite grazie alla prima fase di simulazione. La temperatura di carico delle mele è stata supposta pari a 10°C, considerando che le mele, pur essendo raccolte all'esterno ad una temperatura dell'aria di circa 16°C, sono state trasportate all'interno delle gallerie fino alla cella di stoccaggio permettendo un graduale adattamento alle condizioni interne. Successivamente, sulle pareti della cavità si è imposta una temperatura variabile da 11°C (situazione naturale indisturbata) a 1°C in 3 ore, come richiesto dal processo per la frigoconservazione.

Le proprietà dei materiali nella simulazione sono state assegnate grazie ai valori dei principali parametri fisici e termici ricavati mediante le prove di laboratorio.

La calibrazione dei parametri di trasporto del calore utilizzati dal modello e non definiti in precedenza è stata eseguita con metodo

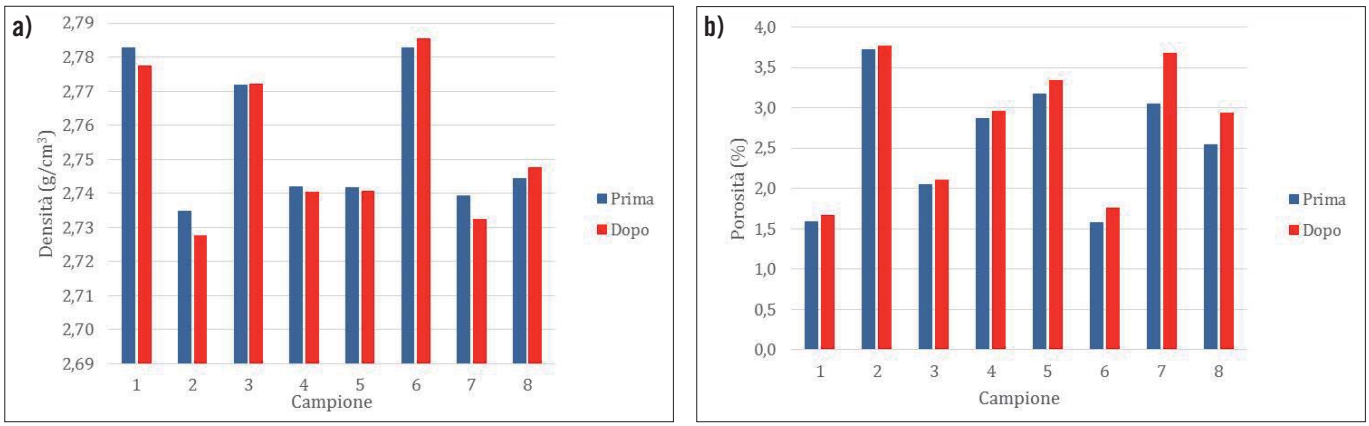

Figura 6 – Confronto tra i valori di (a)densità e (b)porosità prima e dopo i cicli di gelo-disgelo (De Lullo, 2016, tesi di laurea)

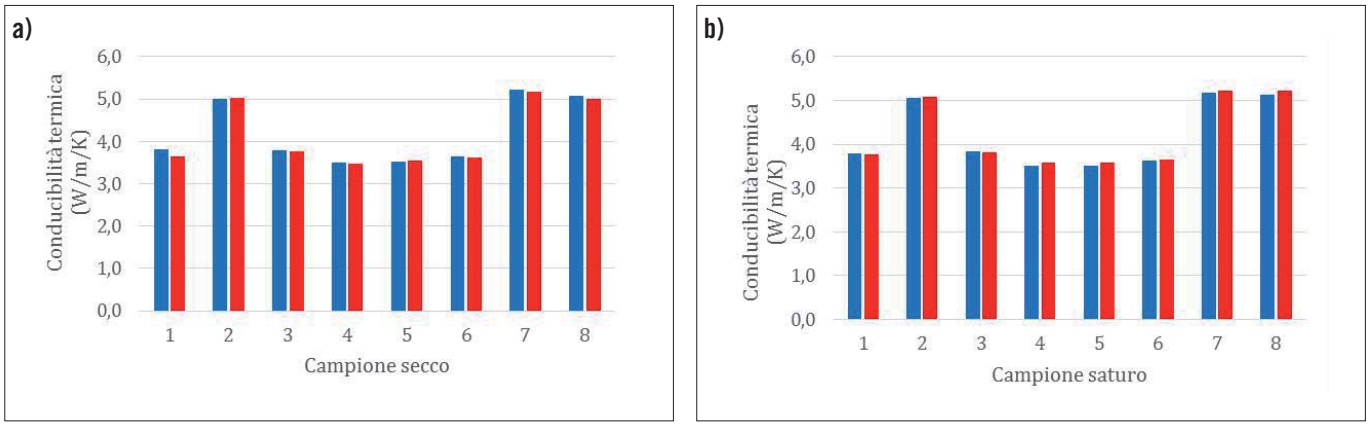

Figura 7 – Confronto tra i valori di conducibilità termica misurati prima (blu) e dopo (rosso) i cicli di gelo-disgelo per (a) campioni secchi e (b) per campioni saturi (De Lullo, 2016, tesi di laurea)

iterativo confrontando gli output numerici con le misure reali di temperatura registrate nelle sonde.

4. RISULTATI

4.1 Proprietà fisiche e termiche della roccia

Per quanto riguarda la variazione delle proprietà fisiche dei campioni dovuta ai cicli di gelo-disgelo, dalle misure sperimentali eseguite (*Fig.* 6) si osserva un incremento della porosità: poiché la porosità della roccia vergine è molto piccola, la sua variazione è comunque estremamente limitata, arrivando ad un incremento massimo pari a 0,63%. La densità, invece, subisce cambiamenti trascurabili, dell'ordine cioè di qualche centesimo di g/cm^3. Non si notano differenze nella variazione dei parametri fisici tra i campioni sottoposti alla fase di trattamento termico in condizioni sature con immersione in acqua (campioni 2-3-5-7) e in condizioni secche (campioni 1-4-6-8). I campioni 3, 6 e 8 presentano insieme un aumento di densità e di porosità. Sebbene ci si attendesse un maggior aumento della porosità nei campioni saturi dovuto alla maggior presenza iniziale di acqua nei vuoti, è probabile che la presenza di una porosità naturale del materiale prevalentemente occlusa faccia si che l'acqua contenuta nei pori in condizioni sature sia molto esigua.

Anche nel caso della conducibilità termica non vi sono variazioni significative: le misure eseguite hanno evidenziato l'assenza di variazioni significative a seguito dei cicli di gelo-disgelo (variazione massima misurata pari a 0,158 W/m/K) (*Fig.* 7). Come prima, non si notano differenze tra i campioni sottoposti ai trattamenti termici in condizioni sature (campioni 2-3-5-7) e quelli in condizioni secche (1-4-6-8), sebbene ci si aspettasse un maggior aumento della porosità nei campioni saturi dovuto alla formazione del ghiaccio e dunque un decremento della conducibilità termica nei campioni sottoposti a trattamento termico.

I valori di conducibilità termica sono mediamente maggiori nel caso di provini completamente saturati con immersione in acqua, a causa di una maggiore capacità conduttiva nello stato saturo: l'acqua che riempie le porosità, infatti, possiede una conducibilità termica (0,60 W/m/K) molto maggiore rispetto a quella dell'aria (0,0249 W/m/K), generando nel complesso un incremento di tale grandezza.

4.2 Modello numerico delle cavità

Gli output ottenuti dalle simulazioni numeriche descrivono l'evoluzione del campo termico dell'ammasso roccioso interessato dalla messa in opera delle celle ipogee. Nella *Fig.* 8 è descritta l'onda termica rispettivamente dopo 10 e 365 giorni dalla realizzazione del processo di abbassamento della temperatura imposto all'interno della cella.

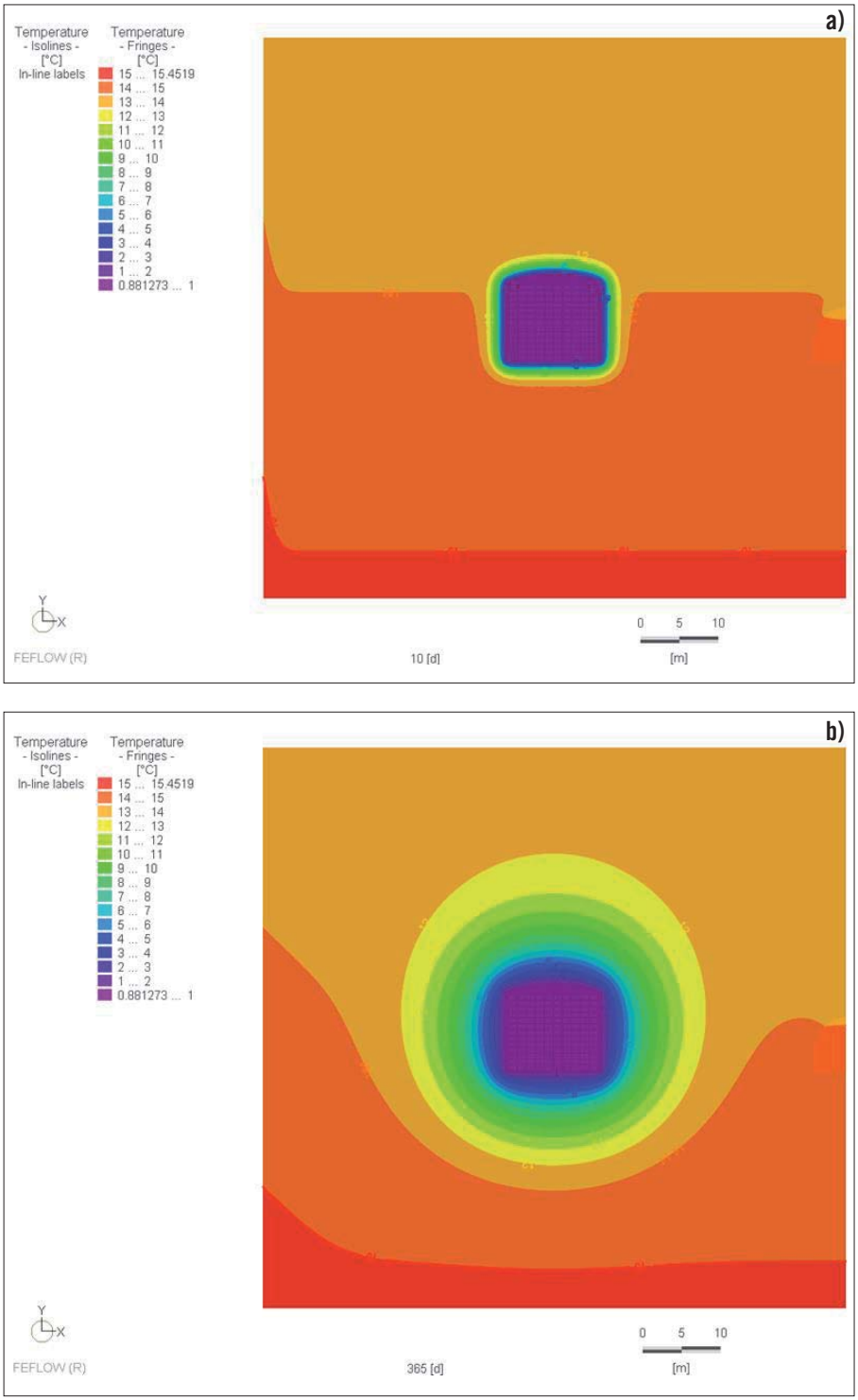

Figura 8: (a) Campo termico dopo 10 giorni e (b) dopo 365 giorni, ottenuto con il modello calibrato (conducibilità termica roccia λ=2,915 W/m/K; capacità termica volumetrica roccia c_V=6,203 MJ/m^3/K) (da Daz, 2017, tesi di laurea)

La distribuzione della temperatura risulta omogenea a partire dalla zona centrale in tutte le direzioni, rispettando il gradiente termico originario del sottosuolo. Nella situazione reale la propagazione del calore all'interno del complesso roccioso presenterà possibili naturali disomogeneità dovute a locali variazioni mineralogiche e stratigrafiche del materiale roccioso che possono condizionare localmente la direzione e l'intensità del flusso di calore.

A parità di distanza dalla cavità, l'equilibrio termico è raggiunto prima nelle sonde di parete rispetto a quelle del soffitto, anche se la differenza temporale è molto ridotta (meno di una settimana).

Si nota che, durante il primo anno di utilizzo della cella, intorno a essa si crea una zona a temperatura ridotta, che grazie alle caratteristiche termiche della roccia, si mantiene nel tempo.

L'isoterma 13°C (temperatura indisturbata) risulta a circa 15 m. di distanza dalla parete della cella. Estendendo la simulazione ad un funzionamento pluriannuale, si osserva che l'isoterma continua ad allontanarsi, ma sempre più lentamente.

4.3 Stima del fabbisogno energetico e confronto con un magazzino epigeo

Considerando una successione di vari periodi di conservazione delle mele all'interno della cella rappresentata (tendenzialmente conservate dall'ultima settimana di settembre all'ultima di agosto), è stato stimato il fabbisogno frigorifero pluriannuale della cella ipogea. Sono state tenute in considerazione le varie procedure di carico e scarico, eseguite dal Consorzio Melinda a seconda della domanda del mercato. La procedura di scarico dura circa 5 giorni e consiste nello spegnimento dell'impianto per 8 ore, durante cui la cella è aperta, alternato a una riaccensione per le successive 16 ore, in cui la cella viene richiusa.

Durante l'apertura la cella è sottoposta ai carichi termici dei macchinari, degli operatori e soprattutto allo scambio d'aria con l'esterno. Una volta svuotata la cella, l'impianto rimane in funzione, permettendo di ripristinare e incrementare l'accumulo termico nella roccia e sfruttarlo l'anno successivo.

La simulazione ha evidenziato che il fabbisogno energetico della prima fase di carico è molto più elevato di quello di mantenimento. Infatti, una volta creato il buffer termico a bassa temperatura nella roccia in prossimità della cella e non dovendo più smaltire il calore di respirazione delle mele, la richiesta frigorifera diminuisce sensibilmente. L'accumulo termico nella roccia mantiene costanti le condizioni attorno alla cella, limitandone le dispersioni per conduzione attraverso l'ammasso circostante.

Anche le successive fasi di carico e scarico, sebbene aumentino la temperatura dell'aria in cella, grazie alla loro brevità non alterano significativamente la temperatura dell'ammasso roccioso e sono quindi quasi trascurabili anche sul computo energetico. Dopo il primo anno di utilizzo, l'inerzia termica della roccia si oppone a variazioni del carico frigorifero per brevi periodi: una porzione dell'energia frigorifera immessa in cella dall'impianto viene immagazzinata nella roccia e utilizzata in un secondo periodo. Questo suggerisce che il sistema ipogeo assorba facilmente anche fenomeni di spegnimento per guasto improvviso del sistema.

È stato infine eseguito anche un confronto diretto tra i fabbisogni frigoriferi ed elettrici del magazzino ipogeo con un deposito epigeo refrigerato sito in Livo (TN), di proprietà del Consorzio Melinda. Sebbene ristrutturato diverse volte nel corso degli anni, il magazzino epigeo dimostra un fabbisogno specifico frigorifero circa del 20% superiore a quello del magazzino ipogeo e un fabbisogno elettrico addirittura superiore del 48% (Daz, 2017). La potenza richiesta all'impianto frigorifero mostra oltre al picco iniziale, come per l'impianto ipogeo, anche un picco durante la stagione estiva a causa delle elevate temperature esterne.

È questo che differenzia sostanzialmente il deposito epigeo da quello ipogeo. L'accumulo termico nella roccia a temperatura poco superiore rispetto a quella in cella rende le condizioni circostanti il deposito costantemente favorevoli al mantenimento pluriannuale. Al contrario, l'aria attorno a un deposito tradizionale segue l'andamento stagionale della temperatura, che nella stagione estiva è ben superiore a quella di conservazione.

5. CONCLUSIONI

Concludendo, i risultati sperimentali ottenuti hanno permesso di definire la caratterizzazione termofisica della roccia presente nella miniera di Rio Maggiore e di valutare l'evoluzione del campo termico all'interno dell'ammasso roccioso. La roccia costituente l'ammasso è risultata estremamente adatta per la realizzazione dei magazzini ipogei, grazie alle sue elevate proprietà termiche e al fatto che esse non vengano alterate dai processi di alterazione termica a cui sono sottoposte per la realizzazione della frigoconservazione, compreso quelli di congelamento/scongelamento. Le simulazioni condotte hanno permesso di stimare il funzionamento e i consumi energetici, anche confrontandoli con quelli di un magazzino epigeo, dedicato anch'esso alla conservazione delle mele, evidenziando consumi nettamente inferiori.

L'ottimo esempio di riutilizzazione di cavità sotterranee messo in atto dal Consorzio Melinda e Tassullo Materiali spa dimostrano le elevate potenzialità di rivalorizzazione delle varie tipologie di cavità preesistenti, dove possibile, altrimenti destinate all'abbandono e al degrado. L'esperienza Melinda-Tassullo evidenzia che l'impiego del sottosuolo per lo stoccaggio di alimenti per la conservazione anche pluri-stagionale può costituire una delle future pratiche virtuose finalizzate all'attuazione delle politiche di risparmio energetico e di miglioramento della sostenibilità ambientale della produzione industriale, giacché richiede ridotti dispendi energetici, consente di preservare nel tempo le qualità organolettiche del cibo, ed evita l'occupazione di territorio in superficie.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Consorzio Melinda della Val di Non, la Tassullo Materiali Spa, , Miniera di San Romedio s.r.l. e il Polo Tecnologico per l'Energia srl di Lavis (TN) per la disponibilità dei dati e alla divulgazione delle informazioni contenute nel presente articolo.

BIBLIOGRAFIA

Carmody J., Sterling R. (1984), *Design Considerations for Underground Buildings. Underground Space, Vol. 8, Nos. 5-6, pp. 352-362, 1984.*

Choi S.O., Park H.D., Park Y.J., Kim H.Y., Jang H.D. (2000), *Test running of an underground food storage cavern in Korea.* Tunnelling and Underground Space Technology 15 (1), pp. 91-95.

Daz S. (2017), *La conservazione ortofrutticola in ambiente refrigerato: stato dell'arte e approfondimento sul caso ipogeo di Melinda.* Tesi inedita di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica. DII - Università degli Studi di Padova

De Lullo A. (2016), *Caratterizzazione Termofisica Del Magazzino Ipogeo Per La Frigoconservazione Di Rio Maggiore (Val Di Non – Tn).* Tesi inedita di laurea magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica. Dipartimento ICEA - Università degli Studi di Padova.

Fuganti A. (1964), *La geologia dei dintorni di Mollaro (Trentino Occidentale).* Studi Trentini Sci. Nat. 73-110.

Fuganti A., Odorizzi S., Franzinelli A. (2013), *La miniera di Dolomia di Rio Maggiore. Val di Non (Trento).* Atti Dell' Accademia Roveretana Degli Agiati, Atti dell'Accademia Roveretana degli Agiati III B.

Golder Associates per Tassullo Materiali (2009), Studio di Impatto Ambientale. Progetto preliminare.

Jamshidi A., Nikudel M.R., Khamehchiyan M. (2013), *Predicting the long-term durability of building stones against freeze–thaw using a decay function model.* Cold Regions Science and Technology 92, pp. 29-36.

Liu Q., Huang S., Kang Y., Liu X. (2015), *A prediction model for uniaxial compressive strength of deteriorated rocks due to freeze-thaw.* Cold Regions Science and Technology 120, pp. 96-107.

Melinda, «Il sistema di frigoconservazione ipogeo,» [Online]. Available: www.melinda.it/static/upload/il-/ilsistema-di-frigoconservazione-ipogeo.pdf.

Park H.D., Synn J.H., Park Y.J., Kim H.Y. (1999), *A pilot study on the design of an underground food storage cavern in Korea.* Tunnelling and Underground Space Technology 14 (1), pp. 67-73.

Park J., Hyun C.U., Park H.D. (2014), *Changes in microstructure and physical properties of rocks caused by artificial freeze-thaw action.* Bulletin of Engineering Geology and the Environment 74 (2), pp. 555-565.

Prosser G. (2000), *The development of the North Giudicarie fault zone (Insubric line, Northern Italy).* J. Geodyn. 30, 229-250.

Singh T.N., Sinha S., Singh V.K. (2005), *Prediction of thermal conductivity of rock through physico-mechanical properties. Building and Environment 42* (2007), pp. 146-155.

Sugai Y., Sasaki K., Yoshimura K., Yukitake T., Muta S. (2010), *Pilot study on the construction of several temperature-controlled multi-purpose rooms in a disused tunnel.* Tunnelling and Underground Space Technology 32 (2012), pp.180–189.

Zevgolis I.E., Mavrikos A.A., Kaliampakos D.C. (2004), *Construction, storage capacity and economics of an underground warehousing-logistics center in Athens, Greece.* Tunnelling and Underground Space Technology 19, pp. 165-173.

Zhang S., Lai Y., Zhang X., Pu Y., Yu W. (2004), *Study on the damage propagation of surrounding rock from a cold-region tunnel under freeze-thaw cycle condition.* Tunnelling and Underground Space Technology 19, pp. 295-302.