

Gaetano Giudice
Francesco Leone

Grotta del Gelo

Monitoraggio del microclima e della massa glaciale

Microclimate and ice mass monitoring



Dicchi - collana bilingue
di approfondimenti
tematici n° 2

This page is intentionally left blank

Gaetano Giudice, Francesco Leone

Grotta del Gelo

Monitoraggio del microclima e della massa glaciale

Microclimate and ice mass monitoring

Progetto "Monitoraggio della *Grotta del Gelo*"

Rafforzamento della capacità di gestione del sito UNESCO Monte Etna

Finanziamento MiBACT L.77/2006 Decreto n. 558 2/12/2016 Es. fin. 2016 Cap.lo 7305



Ente Parco dell'Etna

Giudice, Gaetano <1964->

Grotta del Gelo : monitoraggio del microclima e della massa glaciale / Gaetano Giudice,

Francesco Leone. – Nicolosi : Parco dell'Etna, 2019.

(Dicchi : collana bilingue di approfondimenti tematici ; 2)

1. Grotta del Gelo – Etna <vulcano>.

I. Leone, Francesco <1968->.

551.4470945813 CDD-23

SBN Pal0312840

CIP - Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Gli autori sono entrambi speleologi del *Centro Speleologico Etneo*. Gaetano Giudice è primo tecnologo presso INGV sez. di Palermo

Authors are both speleologist of *Centro Speleologico Etneo*. Gaetano Giudice is senior technologist at INGV sezione di Palermo

Ringraziamenti

Il lavoro sintetizzato in questa pubblicazione è frutto della passione e della dedizione con cui gli speleologi del *Centro Speleologico Etneo*, in particolare il gruppo di soci costituito da Luca Randazzo, Guido Raciti, Marianna Messina, Elvira Finocchiaro e Salvo Petralia, oltre che gli autori, per oltre cinque anni hanno perseguito l'obiettivo di migliorare la conoscenza della *Grotta del Gelo*. Si ringraziano Carlo Rizzo per avere messo a disposizione la stazione totale per il rilievo del 2013, Virginia Consoli e Salvo Petraia per aver messo a disposizione, dal 2016, i mezzi fuoristrada per raggiungere la Grotta dei Lamponi. Un debito morale va riconosciuto a Federico Scoto, che contattandoci per il suo lavoro di tesi ha riacceso la passione e l'interesse per il fenomeno.

Un sentito ringraziamento va al Dott. Salvatore Caffo, vulcanologo dell'*Ente Parco dell'Etna*, e all'Ing. Agata Puglisi per la disponibilità e l'attenzione dedicatoci in fase di messa a punto della convenzione.

Fonti fotografiche

Copertina, foto in fig. 3.2 di G. Luca Randazzo

Fig: 5.1b di Gaetano Giudice

Fig: 8.1 di Francesco Leone

Acknowledgement

The work summarized in this publication is the result of the passion and dedication of the speleologists of the *Centro Speleologico Etneo*. In particular the group of members made up of Luca Randazzo, Guido Raciti, Marianna Messina, Elvira Finocchiaro and Salvo Petralia, as well as the authors, that for over five years have pursued the objective of improving the knowledge of the *Grotta del Gelo*. We would like to thank Carlo Rizzo for making the total station available for the 2013 survey, Virginia Consoli and Salvo Petraia for having made the off-road vehicles available to reach the Grotta dei Lamponi since 2016. A moral debt must be acknowledged to Federico Scoto, who rekindled the passion and interest in the phenomenon by contacting us for his thesis work.

Special thanks to Dr. Salvatore Caffo, volcanologist of the *Ente Parco dell'Etna*, and to Ing. Agata Puglisi for the openness and the attention dedicated to us during the finalization of the agreement.

Photographic sources

Cover, photos in fig. 3.2 by G. Luca Randazzo

Fig: 5.1b by Gaetano Giudice

Fig: 8.1 by Francesco Leone

Typesetting by Francesco Leone using LaTeX

In copertina

Ingresso della *Grotta del Gelo*

On the cover

Grotta del Gelo entrance

Indice

Premessa	3
Introduzione	4
Inquadramento ambientale	4
Generalità sulle grotte con ghiaccio	7
Studi pregressi sulla <i>Grotta del Gelo</i>	8
Materiali e metodi	9
Risultati	11
Considerazioni finali	15

Bibliografia / Bibliography

Table of contents

Foreword	3
Introduction	4
Environmental description	4
Fundamental concepts on ice caves	7
Previous studies on <i>Grotta del Gelo</i>	8
Materials and methods	9
Results	11
Concluding remarks	15

16

Premessa

La Grotta del Gelo, probabilmente la più nota grotta vulcanica dell'Etna per il fascino esercitato sui visitatori dalla presenza di ghiaccio perenne al suo interno, piuttosto insolito alla sua latitudine e in forte contrasto con l'ambiente arido del vasto campo lavico in cui si apre, richiama sempre più escursionisti. Tale incremento di visitatori ha fatto aumentare la preoccupazione per gli effetti della presenza umana sulla conservazione della massa glaciale e, in tal senso, nel 1997 è stato eseguito un monitoraggio microclimatico nell'ambito di una prima collaborazione tra Ente Parco dell'Etna e Centro Speleologico Etneo. Il 21 giugno 2013 il "Mount Etna" veniva iscritto nella World Heritage List Unesco. In seguito alle specifiche indicazioni del Comitato per il Patrimonio mondiale dell'Umanità l'Ente Parco dell'Etna ha partecipato alla procedura di selezione dei progetti per i finanziamenti ai siti UNESCO ai sensi della L.77/2006 con il progetto: "Rafforzamento delle capacità di gestione del Sito Unesco Mount Etna" che, nel secondo modulo, azione 2, attività D, E, G dell'Allegato A, ha previsto l'approfondimento e la prosecuzione del primo monitoraggio ambientale. Il 22 novembre 2017 è stata sottoscritta una specifica convenzione con il Centro Speleologico Etneo, per una migliore gestione della fruizione in accordo alle raccomandazioni dell'IUCN: International Union for Conservation of Nature e come previsto dal Piano di Gestione dal Programma Triennale dell'Ente Parco. La presente pubblicazione riporta i risultati del più esteso e articolato monitoraggio finora realizzato sull'evoluzione della massa glaciale presente all'interno della Grotta del Gelo che consentiranno di capire quali interventi saranno necessari per preservare questo piccolo ma significativo ghiacciaio, vero gioiello nel Parco dell'Etna.

Salvatore Caffo

Vulcanologo dell'Ente Parco dell'Etna

Foreword

The Grotta del Gelo, probably the most famous volcanic cave of Etna due to the fascination exerted on visitors by the presence of perennial ice inside it, quite unusual for its latitude and in strong contrast with the arid environment of the vast lava field where opens, attracts more and more hikers. This increase in visitors has risen the concern for the effects of human presence on the conservation of the glacial mass and, in this regard, a microclimatic monitoring was carried out in 1997 as part of a first collaboration between Ente Parco dell'Etna and Centro Speleologico Etneo. On June 21, 2013, Mount Etna was inscribed in the UNESCO World Heritage List. Following the specific indications of the Committee for the World Heritage of Humanity, the Ente Parco dell'Etna participated in the project selection procedure for funding to UNESCO sites under the Law No.77 / 2006 with the project: "Strengthening of the management capacity of the Mount Etna Unesco Site" which, in the second module, action 2, activity D, E, G of Annex A, provided for the deepening and continuation of the first environmental monitoring. On 22 November 2017 a specific agreement was signed with the Centro Speleologico Etneo, for a better management of the fruition in accordance with the IUCN recommendations: International Union for Conservation of Nature and as foreseen by the Management Plan from the Triennial Park Program. This publication reports the results of the most extensive and detailed monitoring so far carried out on the evolution of the glacial mass present within the Grotta del Gelo which will allow us to understand which interventions will be necessary to preserve this small but significant glacier, a true jewel in the Park of the Etna.

Salvatore Caffo

Volcanologist of Ente Parco dell'Etna

Introduzione

La *Grotta del Gelo* è probabilmente la più nota grotta vulcanica dell'Etna per il fascino esercitato sui visitatori dalla presenza di ghiaccio perenne al suo interno, piuttosto insolito alla sua latitudine ed in forte contrasto con l'ambiente arido del vasto campo lavico in cui si apre. Meta molto ambita per gli escursionisti, sia locali che forestieri, con l'incremento delle visite è cresciuta anche la preoccupazione di ambientalisti e studiosi per gli effetti della presenza umana sulla conservazione della massa glaciale [Biffo and Cucuzza-Silvestri, 1977].

La variabilità dei fenomeni stagionali di formazione e fusione degli speleotemi glaciali e la mancanza di osservazioni sistematiche strumentali sull'evoluzione della massa glaciale hanno contribuito a far sorgere, nel tempo, la credenza che la fine della massa di ghiaccio fosse imminente. Nel 1981 la grotta rischiò di essere coperta da un'eruzione laterale le cui fratture eruttive si aprirono nell'area circostante (v. fig 3.1b). In quella occasione può avere risentito di un incremento del flusso geotermico e quindi le osservazioni qualitative di un parziale scioglimento del ghiaccio potrebbero essere state fondate [Bella et al., 1982].

Studi strumentali sono cominciati a partire dagli anni novanta e, attraverso varie fasi, si è incrementato il numero di parametri misurati, fino al monitoraggio condotto a partire da fine 2013, impiegando personale, mezzi e strumentazione di CSE e INGV sezione di Palermo. Grazie alla convenzione sottoscritta tra *Ente Parco dell'Etna* e *Centro Speleologico Etneo* nel 2017 si è fatto fronte ad ulteriori esigenze di strumentazione e prodotta la presente pubblicazione che riporta i risultati del quinquennio da dicembre 2013 a dicembre 2018.

Alla descrizione del monitoraggio e dei suoi risultati premettiamo una sintetica descrizione della *Grotta del Gelo*, inquadrandola nel suo contesto ambientale, e forniamo sia il quadro teorico minimo rilevante alla comprensione dei fenomeni glaciali in grotta che una sintesi dei risultati dei precedenti monitoraggi.

Inquadramento ambientale

La *Grotta del Gelo* è un tunnel di scorrimento lavico nelle lave dell'eruzione del 1614-1624 (v. figura 3.1), quella di maggiore durata in epoca storica, nel corso della quale si stima siano stati emessi circa 1 Gm^3 di materiale effusivo riversatosi su una superficie di circa 21 km^2 tra quota 2550 e quota 1400 del versante settentrionale dell'Etna [Romano and Sturiale, 1982]. La lunga durata dell'eruzione ha fatto sì che i flussi lavici si sovrapponevano in maniera complessa, inoltre ha prodotto lave di tipo pahoehoe, insolite per le eruzioni etnee, che hanno creato una

Introduction

The *Grotta del Gelo*¹ is probably the best known volcanic cave of Mount Etna because of the fascination exercised on visitors by the perennial ice inside it, rather unusual at its latitude and in strong contrast with the arid environment of the large lava field in which it opens. A very popular destination for hikers, both local and foreigners, with the increase in visits has also grown the concern of environmentalists and scientists for the effects of human presence on the conservation of the glacial mass [Biffo and Cucuzza-Silvestri, 1977].

The variability of the seasonal phenomena of glacial speleothems formation and fusion and the lack of systematic instrumental observations of the ice mass evolution have given rise, over time, to the belief that the ice mass ending was forthcoming. In 1981 the cave was at risk to be covered by a lateral eruption and, being in the neighbors of the area where the eruptive fissures opened, it is plausible that the cave was interested by an increase in geothermal flow and that the qualitative observations, reporting the partial melting of the ice mass, were correct [Bella et al., 1982].

Instrumental studies have begun since the 1990s and, through various phases, the number of measured parameters has increased, up to the monitoring carried out since the end of 2013, employing staff, equipment and instruments of CSE and INGV sezione di Palermo. Thanks to the agreement signed between *Ente Parco dell'Etna* and *Centro Speleologico Etneo* in 2017, additional instrumentation requirements were met and this publication produced to make broadly known the results of the five-years monitoring from December 2013 to December 2018.

Before describing the monitoring and its results we give a synthetic description of the *Grotta del Gelo* and its environmental framework, the minimal theoretical background to understand ice cave and an account of the previous monitorings.

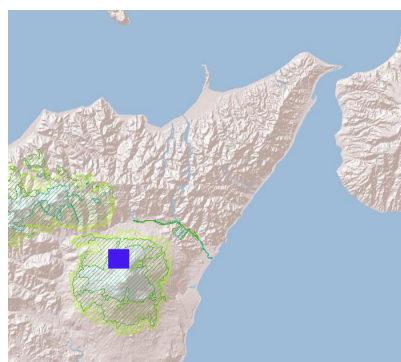
¹ *Gelo* is the Italian word for *bitter cold* and sensu lato it also means *ice*

Environmental description

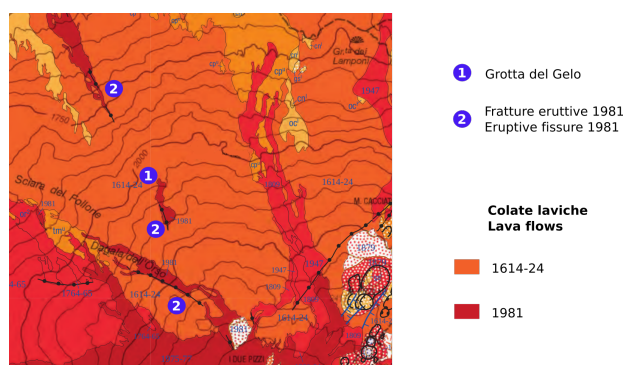
The *Grotta del Gelo* is a lava tunnel in the lava flow of the 1614-1624 eruption (see figure 3.1), the one of greatest duration in the historical period, during which it is estimated that about 1 Gm^3 of effusive material poured over a surface of approximately 21 km^2 between altitude 2550 m and 1400 m of the northern side of Etna [Romano and Sturiale, 1982]. The long duration of the eruption has caused the lava flows to overlap in a complex way, moreover it has produced pahoehoe lavas, unusual for Etna's eruptions, which have created a series

serie di peculiari morfologie sia a scale medio grandi con la formazione di tumuli e mega tumuli, sia a piccola scala con le caratteristiche morfologie a corde e la formazione di cavità laminari sotto la superficie. Il caratteristico rumore che si produce camminando su queste superfici, per via del riverbero del suono nei vuoti sottostanti, analogo a quello che si produce camminando sui tetti, è all'origine del nome popolare di lava dei Dammusi attribuito a questa colata.

In questa colata sono noti altri 4 tunnel di scorrimento lavico di dimensioni significative: la Grotta del Diavolo (2400 m), la Grotta del Lago (2200 m), la Grotta di Aci (2000 m) e la Grotta dei Lamponi (1700 m), e poco più di una quindicina di cavità di dimensioni minori a quote inferiori ai 1800 m.



(a) Collocazione geografica della *Grotta del Gelo*
(a) Geographical position of *Grotta del Gelo*



(b) Carta geologica dell'area circostante la *Grotta del Gelo*.
Tratto con modifiche da [Branca et al., 2015]
(b) Geological map of the area around the *Grotta del Gelo*. Modified from [Branca et al., 2015]

Figura 3.1

Figure 3.1

La *Grotta del Gelo* si apre a quota 2045 m, nell'area di riserva integrale del Parco (v. figura 3.1), l'accesso avviene attraverso un crollo della volta e il tunnel si sviluppa approssimativamente in direzione nord per un centinaio di metri.

L'ingresso è un pendio di circa 30 m costituito dall'accumulo di materiale di crollo della volta e da successivi depositi piroclastici. In inverno la neve può occludere completamente l'ingresso e, a seconda dell'intensità delle nevicate e delle condizioni meteorologiche nei mesi successivi, può impiegare l'intera primavera e anche parte dell'estate per fondere completamente.

La grotta prosegue con un andamento quasi orizzontale per circa 50 m con una sezione mediamente di 10 m di larghezza e 5 m di altezza. La parte iniziale e la parte mediana sono interessate dalla formazione di uno strato di ghiaccio sul pavimento che impedisce il deflusso dell'acqua meteorica e di quella di fusione della neve che percolano nella grotta dalla volta, dando origine a due stagni, separati tra loro da una zona irregolare occupata da grandi massi. Le dimensioni, la quantità di acqua e di ghiaccio sul fondo e il congelamento della superficie dei due stagni variano a seconda della stagione e di anno in anno. Lo stagno iniziale è spesso ridotto a piccole pozze o del tutto asciutto, in caso di completa fusione del ghiaccio

of peculiar morphologies both on a medium-large scales, with the formation of mounds and mega-mounds, and on a small scale with the typical rope-like morphologies and the formation of laminar cavities below the surface. The characteristic noise that is produced by walking on these surfaces, due to the reverberation of the sound in the voids below, analogous to that produced when walking on the roofs, is the origin of the name of lava of the "Dammusi" popularly given to this lava flow.

Four more lava tunnels of large dimensions are known in this lava flow: the *Grotta del Diavolo* (2400 m), the *Grotta del Lago* (2200 m), the *Grotta di Aci* (2000 m) and the *Grotta dei Lamponi* (1700 m), and just over fifteen smaller caves at altitudes below 1800m

The *Grotta del Gelo* opens at an altitude of 2045 m, in the integral reserve area of the Park (see 3.1), it is accessible through a collapse of the roof and the tunnel extends approximately northwards for about one hundred meters.

The entrance is a declivity of about 30 m consisting of the accumulation of collapsed material from the vault and subsequent pyroclastic deposits. In winter the snow can completely block the entrance and, depending on the intensity of the snowfall and the weather conditions in the following months, it can take the whole spring and even part of the summer to melt completely.

The cave continues with an almost horizontal course for about 50 m with a section of 10 m of width and 5 m of height on average. The initial part and the middle part are affected by the formation of a layer of ice on the floor that prevents the outflow of meteoric water and that from the melting of the snow that percolate into the cave from the roof, giving rise to two ponds, separated from each other by an irregular area occupied by large boulders. The size, the amount of water and ice on the bottom and the freezing of the surface of the two ponds vary according to the season and from year to year. The first pond is often reduced to small puddles or totally dry, in the case of complete melting of the underlying ice,

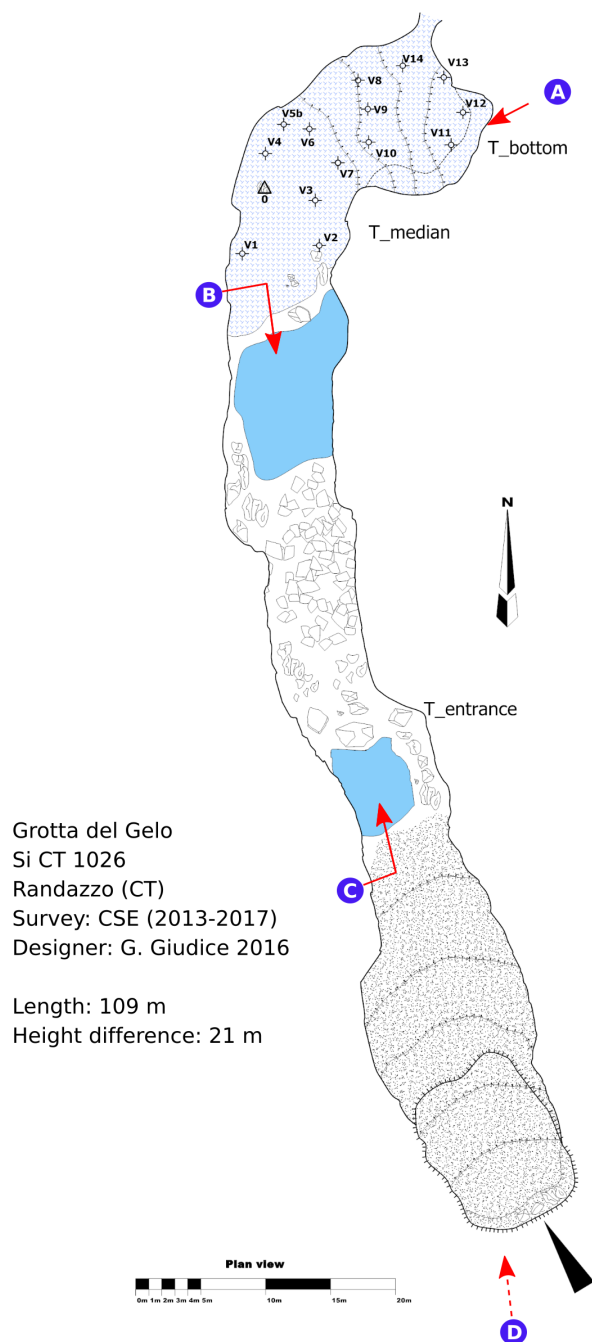


Figura 3.2: Rilievo topografico della *Grotta del Gelo* con alcune immagini rappresentative dell'ingresso, dei due stagni e della massa glaciale terminale.

Figure 3.2: Topographical survey of *Grotta del Gelo* with some representative photo of the entrance, of the ice lakes and of the perennial ice mass

sottostante, mentre lo stagno mediano raramente è stato osservato essiccato e privo di ghiaccio.

La parte terminale della grotta prosegue verso NE, la volta si abbassa e il volume della cavità è occupato in buona parte da una massa di ghiaccio perenne la cui superficie, dopo una parte quasi orizzontale, cambia bruscamente pendenza e alla fine si congiunge con la volta e la parete finale. Nel tempo il ghiaccio si è dislocato verso la parete finale e alcuni vuoti e prosecuzioni si sono

while the second pond has rarely been observed dried and free of ice.

The terminal part of the cave continues towards the NE, the vault lowers and the volume of the cavity is occupied for the most part by a mass of perennial ice whose surface, after an almost horizontal part, abruptly changes slope and at the bottom joins with the vault and the final wall. Over time the ice has displaced towards the final wall and some gaps and continuations have become

riempiti o occlusi (v. Fig. 5.1)

La capacità delle grotte di conservare il ghiaccio al loro interno per tutto l'anno è stata sfruttata dall'uomo per fini economici, un esempio di utilizzo di grotta etnea come niviera è la *Grotta della Neve* (o *Grotta dei Ladri*) [Bonaccorso and Maugeri, 1999a]. Analogamente a quanto accade nella galleria della *Grotta del Gelo*, nella *Grotta del Lago* [Bonaccorso and Maugeri, 1999a] il congelamento del terreno permette la formazione di un ampio stagno, che veniva sfruttato dai pastori per raccogliere acqua per le pecore. Nel caso della *Grotta del Gelo* non si hanno testimonianze certe di un suo utilizzo come niviera, ma la presenza di frammenti di terracotta può essere indicativa della raccolta d'acqua da parte dei pastori.

filled or occluded (see Fig. 5.1)

The power of the caves to preserve the ice inside them throughout the year has been exploited by man for economic purposes, an example of the use of an Etnean cave as a niviera¹ is the *Grotta della Neve* (also known as the *Grotta dei Ladri*) [Bonaccorso and Maugeri, 1999b]. Similarly to what happens in the tunnel of the *Grotta del Gelo*, in the *Grotta del Lago* [Bonaccorso and Maugeri, 1999b] the freezing of the ground allows the formation of a large pond, which was used by shepherds to collect water for the sheep. In the case of the *Grotta del Gelo* there is no certain evidence of its use as a niviera, but the presence of terracotta fragments may be indicative of the collection of water by the shepherds.

¹a depot for the snow

Generalità sulle grotte con ghiaccio

Le grotte che si aprono in ambienti la cui temperatura media annuale è superiore a 0 °C possono avere masse di ghiaccio perenne se si hanno particolari condizioni climatiche e morfologie [Perşoiu, 2018].

I meccanismi di circolazione dell'aria che possono creare le condizioni adatte sono due: la sedimentazione gravitativa, o trappola fredda, e l'effetto ciminiera. Il secondo richiede la presenza di due ingressi a quote differenti e non riguarda il caso della *Grotta del Gelo*. Il primo invece si verifica in grotte con un solo ingresso e ad andamento discendente, come nel nostro caso. Nei periodi in cui l'aria esterna è più fredda, e quindi più densa, essa penetra nella grotta espellendone quella interna. Nei periodi in cui l'aria esterna è più calda si ha una condizione di stabilità delle masse d'aria e lo scambio termico avviene per conduzione attraverso l'aria e la roccia. In queste condizioni l'acqua che penetra dalla superficie porta calore dentro la grotta e può contribuire alla variazione della massa glaciale. Schematicamente si individuano tre fasi [Ohata et al., 1994]:

raffreddamento ($T_{ext} < T_{int}$) L'aria esterna più fredda entra in grotta e ne abbassa la temperatura.

congelamento ($T_{ext} \gtrsim T_{int}$, $T_{int} < 0$) Non si ha circolazione d'aria, l'acqua che penetra congela cedendo calore all'ambiente ipogeo ma la temperatura interna resta inferiore al punto di fusione del ghiaccio. In queste condizioni si formano speleotemi glaciali e si incrementa la massa glaciale. Quando $T_{int} \simeq 0$ è possibile che il calore latente rilasciato quando l'acqua congela causi la fusione di altre porzioni di massa glaciale.

fusione ($T_{ext} > T_{int} \simeq 0$) Qualsiasi contributo termico dall'esterno determina la fusione del ghiaccio, in particolare il calore ceduto dall'acqua di stillicidio.

Approssimativamente le tre fasi dominano rispettivamente i periodi invernale, primaverile/estivo ed esti-

Fundamental concepts on ice caves

Caves that open in environments whose average annual temperature is higher than 0 °C may have perennial ice masses if there are particular climatic conditions and morphologies [Perşoiu, 2018].

The mechanisms of air circulation that can create the right conditions are two: the gravitative settling, or cold trap, and the chimney effect. The latter requires two entrance at different altitudes and does not concern the case of the *Grotta del Gelo*. The cold trap occurs in caves with only one entrance and downward trend, as in our case. In periods when the outside air is colder, and therefore more dense, it enters the cave and expels the hotter and less dense air from the cave. When the outside air is warmer, the air masses are stable and the heat is exchanged through air and rock thermal conduction. Under these conditions, the water that penetrates from the surface transports heat inside the cave and may contribute to the variation of the glacial mass.

Three phases may be schematically identified [Ohata et al., 1994]:

cooling ($T_{ext} < T_{int}$) Colder external air enters in the cave lowering its temperature.

freezing ($T_{ext} \gtrsim T_{int}$, $T_{int} < 0$) There is no air circulation, the water that penetrates freezes transferring heat to the hypogeal environment but the internal temperature remains lower than the melting point of the ice. In these conditions glacial speleotemes are formed and the glacial mass is increased. If $T_{int} \simeq 0$ it is possible that the latent heat released by the freezing water melts other part of the ice mass.

melting ($T_{ext} > T_{int} \simeq 0$) The heat transferred from the water that enters the cave to the ice causes it to melt.

With good approximation the three phases dominate the winter, spring/summer and summer/autumn peri-

vo/autunnale, ma a seconda degli eventi meteorologici la transizione non è netta ed unidirezionale: ad esempio un ritorno di temperature rigide in primavera può riattivare la fase di raffreddamento dopo che si era entrati in fase di congelamento. Inoltre in inverno il raffreddamento può essere rallentato, o bloccato, dall'ostruzione dell'ingresso, ad opera della neve, che impedisce il flusso d'aria.

Oltre al meccanismo gravitativo, dovuto alla dipendenza della densità dell'aria dalla temperatura, l'atmosfera della grotta può risentire della variazione di pressione dell'atmosfera esterna e del vento. Questi fattori possono comprimere o espandere l'aria nella grotta con conseguente effetto sulla temperatura, inoltre possono transitoriamente forzare lo scambio di aria tra l'esterno e la grotta.

ods respectively, but depending on weather events the transition is not clean and unidirectional: for example, a return of cold temperatures in spring can reactivate the cooling mechanism after it had entered the freezing phase. Furthermore, in winter the cooling can be slowed down, or stopped by the obstruction of the entrance by snow, which prevents the air flow.

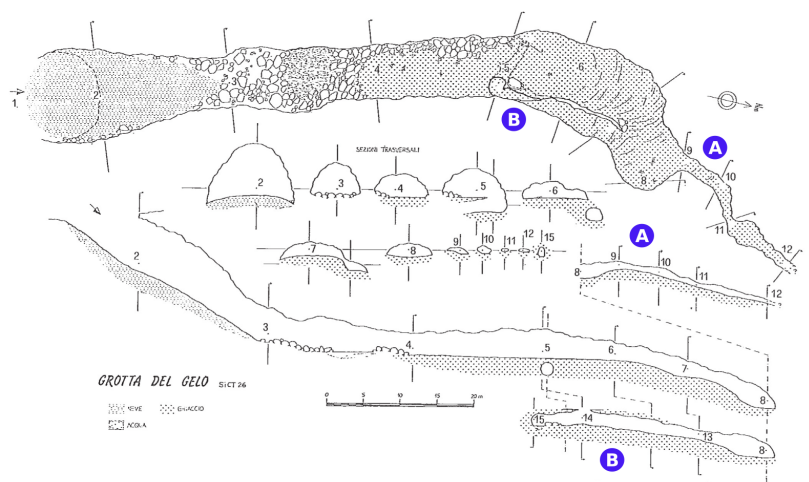
In addition to the gravitational mechanism, due to the dependence of the air density on temperature, the cave atmosphere can be affected by the pressure variation of the external atmosphere and of the wind. These factors can compress or expand the air in the cave with consequent effect on the temperature, moreover they can transiently force the exchange of air between the outside and the cave.

Studi pregressi sulla *Grotta del Gelo*

La prima descrizione della *Grotta del Gelo* nota è in [Bella et al., 1982] ma contiene solo uno schizzo, la prima topografia strumentale venne realizzata dal *Centro Speleologico Etneo* nel 1992 [Marino, 1992] e la riproduciamo qui perché contiene il rilievo di un tunnel all'interno del ghiaccio che si è riempito nel corso degli ultimi 20 anni e del budello terminale oggi occluso dalla dislocazione in avanti del fronte glaciale. In [Marino, 1992] viene anche messo in evidenza, per la prima volta, che la morfologia della grotta è quella di una trappola fredda.

Previous studies on *Grotta del Gelo*

The first known description of the *Grotta del Gelo* is in [Bella et al., 1982] but contains only a handmade sketch, the first instrumental topography was carried out by the *Centro Speleologico Etneo* in 1992 [Marino, 1992] and we reproduce it here because it contains the survey of a tunnel inside the ice that has filled over the past 20 years and the terminal gut now occluded by the displacement of the glacial front forward. In [Marino, 1992] it is also highlighted, for the first time, that the morphology of the cave is that of a cold trap.



(a) Rilievo degli anni 90 a cura del CSE [Marino, 1992]
(a) Survey from the 90s edited by the CSE [Marino, 1992]



(b) Tunnel sotto il ghiaccio
(b) Tunnel under the ice

Figura 5.1: Nel rilievo sono indicati il proseguimento del tubo lavico (A) e il tunnel sotto al ghiaccio (B), oggi entrambi occlusi
Figure 5.1: The continuation of the tube (A) and the tunnel under the ice (B) are signaled in the survey, both occluded today

Dal 1997 al 1999 venne eseguito il primo monitoraggio microclimatico nell'ambito di una prima collaborazione tra *Ente Parco dell'Etna* e *Centro Speleologico Etneo* [Caffo and Marino, 1999a]. Furono posti due sensori, ciascuno misurante T ed $RH\%$, uno in fondo alla grotta e l'altro nella parte mediana. Le misure di umidità risultarono in gran parte inutilizzabili a causa di condensa o di

From 1997 to 1999, the first microclimatic monitoring was performed as part of a first collaboration between *Ente Parco dell'Etna* and *Centro Speleologico Etneo* [Caffo and Marino, 1999b]. Two sensors were placed, each measuring T and $RH\%$, one at the end of the cave and one in the middle part. Humidity measurements were largely unusable due to condensation or percolation wa-

acqua di percolazione che bagnò il sensore. Le misure di temperatura misero in evidenza una maggiore stabilità al fondo, ed una maggiore variabilità nella parte mediana, riconducibile ad eventi climatici esterni, con andamenti compatibili con l'ipotesi di trappola fredda. Si evidenziò una probabile traslazione della massa glaciale verso il fondo, ed una relativa insensibilità alla presenza umana per permanenze di breve durata. Si concluse l'importanza di monitorare l'evoluzione della superficie glaciale, di avere una stazione meteo esterna in prossimità della grotta ed una maggiore risoluzione nelle misure termometriche [Caffo and Marino, 1999a].

Nella primavera del 2013 un nuovo campionamento microclimatico venne intrapreso da parte di un tesista del Corso di Laurea in Scienze Geologiche dell'Università di Catania [Scoto, 2013], con cui collaborammo realizzando un nuovo rilievo topografico adoperando una stazione totale. Furono installati 3 sensori, di cui uno per misurare T all'esterno e due all'interno della grotta. Si confermò la maggiore stabilità della temperatura al fondo e furono poste le basi per il futuro lavoro di monitoraggio della superficie glaciale.

Una prima parziale presentazione relativa ai primi anni di questo monitoraggio, è stata data in [Maggi et al., 2018].

Materiali e metodi

A partire dal dicembre 2013, sulla base dalle precedenti esperienze, si sono monitorate:

- temperatura interna in 4 siti ed esterna vicino l'ingresso durante tutto l'anno
- quota della superficie glaciale in 14 punti e dati di una stazione meteo, dalla primavera all'autunno

Misure di temperatura

La disposizione dei sensori all'interno della grotta è mostrata in fig. 3.2. Un quinto sensore è stato posizionato esternamente a poche decine di metri dall'ingresso. I sensori adoperati hanno risoluzioni di 0.06°C e 0.01°C , quelli più sensibili sono stati adoperati per il fondo della grotta dove le temperature sono più stabili.

Sono stati impiegati due set di data logger, alternando il set sul campo a quello in laboratorio. Evitando lo scarico dei dati in situ si è ridotto il tempo di permanenza degli operatori in grotta e inoltre si è potuta effettuare la manutenzione periodica dei dispositivi. Tutti i data logger sono stati programmati per acquisire un campione l'ora. In alcuni casi si sono verificati dei malfunzionamenti dei dispositivi che se riconducibili con buona approssimazione ad offset o trend sono stati opportunamente corretti, diversamente sono stati scartati.

Sono state calcolate le medie mensili dei 5 termometri per ciascun anno e globalmente per tutto il periodo. Le medie stagionali delle misure termiche sono state adope-

ter that wet the sensor. The temperature measurements showed greater stability in the deep, and greater variability in the middle part, due to external climatic events, with trends compatible with the cold trap hypothesis. A probable translation of the glacial mass towards the bottom was evidenced, and a low sensibility to the human presence for short stays. The study highlighted the importance of monitoring the evolution of the glacial surface, of having an outdoor weather station near the cave and the need of greater resolution in the thermometric measurements [Caffo and Marino, 1999a].

In the spring of 2013 a new microclimatic monitoring was undertaken by a student in Geological Sciences of the University of Catania [Scoto, 2013] for his thesis work. We collaborated with him creating a new cave survey using a total station. Three sensors were installed, one of which was used to measure T outdoor and two inside the cave. The greater stability of the temperature at the bottom was confirmed and the bases were laid for the future work of monitoring the glacial surface.

A first partial presentation relating to the early years of this monitoring was given in [Maggi et al., 2018].

Materials and methods

Starting from December 2013, on the basis of previous experiences, the following were monitored:

- temperature in 4 internal sites and one external, during all the year
- ice elevation of 14 sites on the ice surface and data from a weather station, from spring to autumn

Temperature measurements

The arrangement of the sensors inside the cave is shown in 3.2. A fifth sensor was placed a few tens of meters from the entrance. Sensors with resolution of 0.06°C and 0.01°C were employed, the most sensible ones were used for the depth of the cave where temperatures are more stable.

Two sets of data loggers were used, alternating the field set with the one in the laboratory. By avoiding the download of data on site the time spent by the operators in the cave was reduced and it was also possible to perform periodic maintenance of the devices. All data loggers have been programmed to acquire a sample per hour. In some cases there have been failures of the devices, if they were with good approximation due to offset or trend, corrections have been made, otherwise they have been discarded.

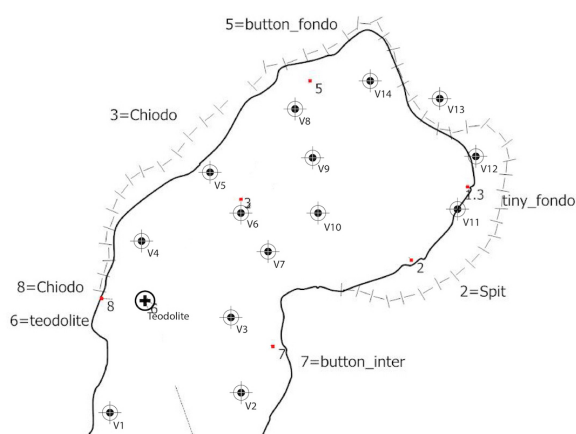
The monthly averages of the 5 thermometers for each year and globally for the whole period have been calculated. The seasonal averages of the thermal measurements

rate per costruire, per ciascuna stagione, una mappa della distribuzione delle temperature all'interno della grotta.

Misure della superficie glaciale

Le campagne di misura sono state condotte ogni anno dall'installazione della stazione meteo, in primavera, alla rimozione, in autunno, con cadenza circa bimestrale.

In ogni campagna di misura si è proceduto rilevando la quota di 14 punti della superficie glaciale, riferita ad altrettanti caposalzi sul tetto della grotta. I caposalzi furono definiti nel giugno del 2013 quando rifacemmo il rilievo della grotta adoperando una stazione totale. Nel 2016 vennero adoperati una stazione totale e un GPS differenziale per collegare i caposalzi a punti esterni e orientare il rilievo (Fig. 3.2) Interpolando i punti viene ricostruita una superficie e integrando la differenza di quota rispetto alla superficie di riferimento, sul dominio definito dal perimetro della porzione di grotta considerata, si ottiene una stima della variazione di volume della massa glaciale rispetto al riferimento. L'area in pianta della parte occupata dalla massa glaciale è pari a 137 m^2 . Le misure di elevazione sono effettuate adoperando un Leica Disto Laser ed un filo a piombo per il posizionamento sulla verticale, con un errore dell'ordine del cm, per cui complessivamente si può stimare l'errore nelle misure di volume nell'ordine di $\pm 1.5 \text{ m}^3$.



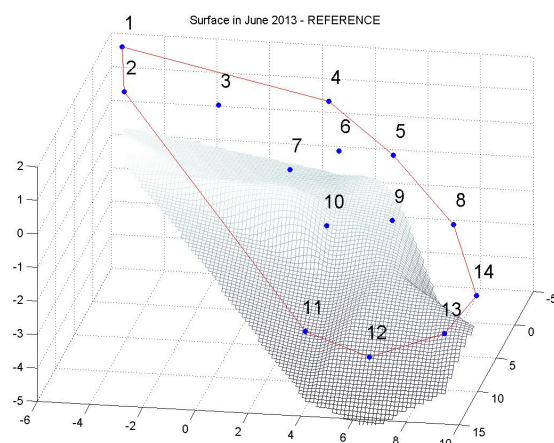
(a) Capisaldi per le misure della superficie glaciale
(a) Marks for ice surface measurement

were used to build four maps of the temperature distribution inside the cave, one for each season.

Ice surface measurements

Measurement campaigns were conducted each year from the deploying of the weather station in the spring, to removal in the autumn, approximately every two months.

In each measurement campaign we proceeded by surveying the altitude of 14 points of the glacial surface, referring to as many control points on the roof of the cave. The grid of points was defined in June 2013 when the new survey was made using the total station. In 2016 a Differential GPS and a total station were used to refer the roof control points in the cave to external points and orient the survey (fig. 3.2) By interpolating the points a surface is reconstructed and integrating the altitude change with respect to the reference surface, on the domain defined by the perimeter of the cave portion considered, an estimate of the variation in volume of the glacial mass with respect to the reference is obtained. The area in plan of the part occupied by the glacial mass is equal to 137 m^2 . Elevation measurements are carried out using a Leica Disto Laser and a plumb line for vertical positioning, with an error of the order of the cm, so that overall the error in volume measurements can be estimated in the order of $\pm 1.5 \text{ m}^3$.



(b) Ricostruzione 3D della superficie di riferimento (giugno 2013)
(b) 3D reconstruction of the reference ice surface (June 2013)

Figura 6.1

Figure 6.1

Misure della stazione meteo

Le stazioni impiegate misurano temperatura, pressione, umidità, precipitazioni, velocità e direzione del vento. Quella adoperata dal 2014 si è guastata nel 2017 ed è stata sostituita, nel 2018, da una più sofisticata che ha permesso una più elevata risoluzione angolare nella misura della direzione del vento, passando da 45° ad 1° , ed una frequenza di campionamento di una misura ogni 15 min invece che una ogni ora.

Weather station measurements

The stations used measure temperature, pressure, humidity, precipitation, speed and wind direction. The one used since 2014 had a failure in 2017 and was replaced in 2018 by a more sophisticated one that allowed a higher angular resolution in the measurement of wind direction, which is 1° instead of 45° of the older, and a sampling frequency of one measure every 15 min instead of hourly.

Per valutare l'effetto delle precipitazioni si è fatta una stima del calore trasferito dall'acqua piovana al ghiaccio, considerando i volumi d'acqua piovana corrispondenti alle precipitazioni registrate su un'area di 137 m^2 , supponendo che l'acqua abbia la temperatura atmosferica e che tutto il calore ceduto dall'acqua per raffreddarsi alla temperatura interna alla grotta venga assorbito dal ghiaccio provocandone la fusione [Messina, 2015].

Si tratta di approssimazioni molto grossolane, ma allo stato le uniche possibili. Abbiamo confrontato le perdite così stimate (ΔV_e) con la variazione di ghiaccio misurata (ΔV_m) per ciascun periodo in cui la stazione meteo ha rilevato le precipitazioni. I dati sulle precipitazioni del 2017 sono stati scartati perché frammentari a causa del guasto della stazione meteo.

Le misure del vento sono state trattate statisticamente alla ricerca di correlazioni con le variazioni di temperatura interna. Con l'installazione della nuova stazione meteo, disponendo di 4 campioni l'ora, si è considerata per ciascuna direzione e su intervalli giornalieri, la correlazione tra la media nell'ora precedente della componente di velocità del vento in una certa direzione e le temperature misurate in grotta, facendo una statistica del numero di giorni in cui la correlazione è massima per ciascuna direzione.

Risultati

Le medie giornaliere di tutti i dati raccolti dai data logger e dalle centraline meteo sono riportati in Fig. 7.5

La variazione della massa glaciale, rispetto al riferimento del giugno 2013, è rappresentata in figura 7.1a. Sono evidenti il forte incremento nella stagione invernale 2013-2014 ed il forte decremento tra novembre e dicembre 2018. Escludendo questi eventi eccezionali, da fine giugno 2014 i volumi si adattano molto bene ad una retta ($R^2 = 0.92$) con una pendenza di $-6\text{ m}^3/\text{anno}$, intorno alla quale oscillano stagionalmente. La crescita eccezionale del 2014 fu di circa 24 m^3 mentre il drastico calo tra novembre e dicembre 2018, pari a circa -10 m^3 , porta la perdita rispetto al volume di riferimento del giugno 2013 a circa -17 m^3 . La variazione tra massimo (2014) e minimo (2018) è pari a circa -39 m^3 .

Il confronto tra le variazioni di volume del ghiaccio misurate e quelle che ci si attenderebbe per effetto delle precipitazioni meteoriche è presentato in Fig. 7.1b. Le variazioni cumulative annuali si adattano abbastanza bene all'ipotesi che il 50% del calore portato dall'acqua piovana sull'area corrispondente alla massa glaciale determini la perdita di volume osservata. Possiamo supporre che in media il restante 50% del calore sia trasferito alla roccia o fuoriesca dalla grotta perché una parte dell'acqua scorre via prima di poter entrare in equilibrio termico con l'ambiente.

Le mappe termiche in Fig. 7.2 evidenziano come in inverno il fondo sia un po' più caldo rispetto al resto della grotta, che si raffredda a seguito dell'ingresso di aria fredda dall'esterno. A partire dalla primavera si inverte

To assess the consequences of rainfall, an estimate was made of the heat transferred from rainwater to ice, considering the volumes of rainwater corresponding to the rainfall recorded on an area of 137 m^2 , assuming that the water has the atmospheric temperature and all the heat released by the water to cool down to the temperature inside the cave is absorbed by the ice causing its melting [Messina, 2015].

These are very rough approximations, but at present the only possible. We compared the estimated losses (ΔV_e) with the measured ice changes in volume (ΔV_m) for each period in which the weather station recorded rainfalls. Rainfall data for 2017 have been discarded because they are fragmentary due to the weather station failure.

Wind measurements were treated statistically in search of correlations with changes in internal temperature. With the installation of the new weather station, having 4 samples per hour, it was considered for each direction and on daily intervals, the correlation between the average over the previous hour of wind speed component in a given direction and the temperatures measured in the cave, making a statistics of the number of days in which the correlation is maximum for each direction.

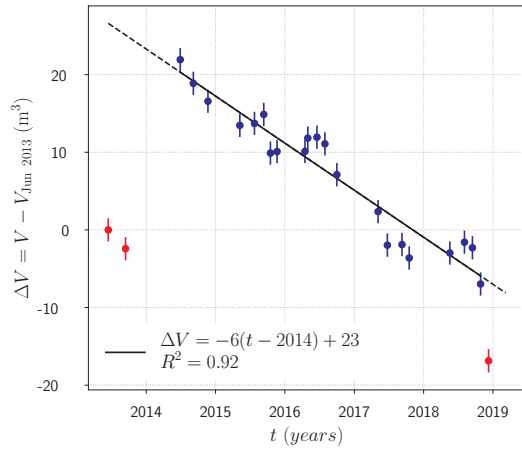
Results

The daily averages of all the data collected by the data loggers and by the weather station are shown in Fig. 7.5

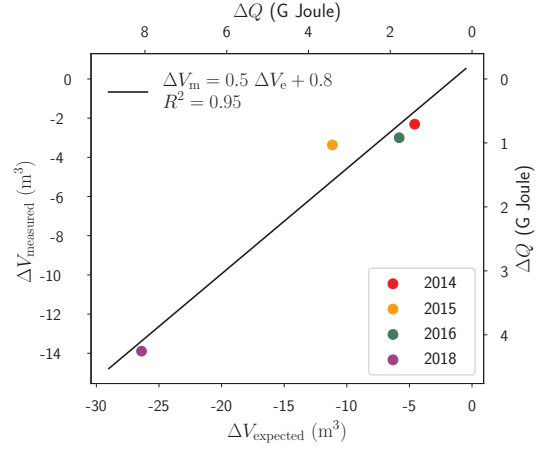
The variation of the glacial mass, compared to the reference of June 2013, is represented in the figure 7.1a. The great increase of ice volume in the 2013-2014 winter and the sharp decrease between November and December of 2018 are noticeable. Excluding these exceptional events, from the end of June 2014 the volumes fit very well with a linear trend ($R^2 = 0.92$) with a slope of $-6\text{ m}^3/\text{year}$, around which they oscillate seasonally. The exceptional growth of 2014 was around 24 m^3 while the drastic drop between November and December 2018, equal to about -10 m^3 , brings the loss, compared to the reference volume of June 2013, to around -17 m^3 . The variation between maximum (2014) and minimum (2018) is equal to approximately -39 m^3 .

The comparison between the measured ice volume variations and those that would be expected due to rainfalls is presented in Fig. 7.1b. The annual cumulative variations adapt quite well to the hypothesis that 50% of the heat brought by rainwater over the area corresponding to the glacial mass determines the observed volume loss. We can suppose that on average the remaining 50% of the heat is transferred to the rock or escapes from the cave because part of the water flows away before being able to enter into thermal equilibrium with the cave environment.

The thermal maps in Fig. 7.2 show that in winter the bottom is a little warmer than the rest of the cave, which cools down as a result of the entry of cold air from the outside. Starting from spring the temperature distribution



(a) Variazioni del volume del ghiaccio rispetto a giugno 2013
(a) Ice volume variations compared to June 2013



(b) ΔV misurate vs attese e relativo calore latente
(b) ΔV measured vs expected and relative latent heat

Figura 7.1: Analisi dei dati glaciometrici
Figure 7.1: Analysis of glaciometric data

la distribuzione delle temperature, infatti il fondo è più freddo della parte iniziale. In estate la grotta si scalda sempre più in profondità fino a entrare in regime di fusione, con medie superiori a 0 °C rilevate da tutti i sensori, in autunno.

In Fig. 7.3 sono riportate le medie mensili delle temperature per ciascun anno e per l'intero quinquennio. Oltre ad evidenziarsi ancora una volta come il picco della temperatura in grotta si verifica in autunno, va segnalato che nel novembre del 2018 si ha il massimo assoluto per T_{fondo} in corrispondenza ad uno degli autunni più piovosi e alla più significativa perdita di volume registrata.

is reversed, in fact the depth is colder than the initial part. In summer the cave gets warmer in the deeper parts until it reaches a fusion phase, with averages higher than 0 °C detected by all the sensors, in autumn.

Fig. 7.3 shows the monthly averages of the temperatures for each year and for the overall period of 5 years. Once again it highlights how the peak temperature in the cave occurs in the autumn, it should also be noted that in November 2018 there is an absolute maximum for T_{fondo} corresponding to one of the most rainy autumns and most significant loss of volume recorded up to now.

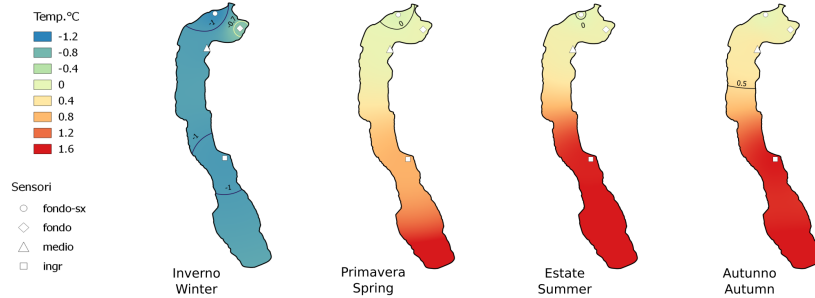


Figura 7.2: Mappe termiche ricavate dalle medie stagionali
Figure 7.2: Thermal maps obtained from seasonal averages

In fig. 7.4 è riportata la statistica della correlazione giornaliera tra direzione del vento e T in grotta per i 4 sensori. Gli istogrammi rappresentano il numero di giornate in cui la correlazione è massima tra temperatura e media oraria della componente del vento in una data direzione. Le distribuzioni risultano tutte concentrate intorno a 190°~200°, quindi in prossimità alla direzione da sud (180°). Confrontando gli istogrammi si evidenzia come il picco sia più pronunciato in profondità che vicino l'ingresso, le parti iniziali della grotta risentono del vento proveniente da un più ampio intervallo di direzioni, mentre al fondo solo quelli provenienti da un intervallo più stretto.

In fig. 7.4 shows the statistic of the daily correlation between wind direction and T in cave for the 4 sensors. The histograms represent the number of days in which the correlation is maximum between temperature and hourly average of the wind component in a given direction. The distributions are all concentrated around 190°~200°, therefore in proximity to the direction from south (180°). A comparison between the histograms shows how the peak is more pronounced in depth than near the entrance, the initial parts of the cave are affected by wind coming from a wider range of directions, while at the bottom only those coming from a narrower range.

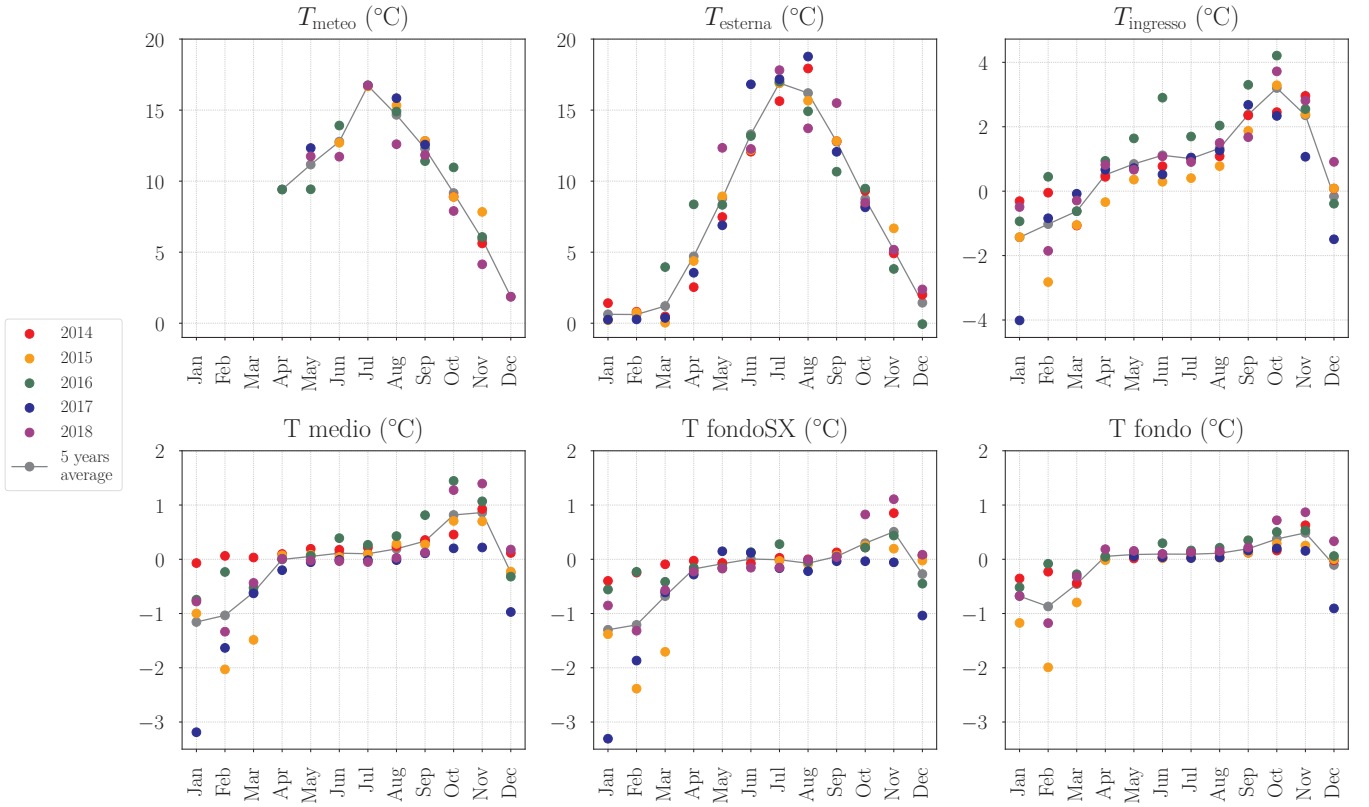


Figura 7.3: Medie mensili delle temperature, per ciascun anno e per i 5 anni
Figure 7.3: Monthly averages of temperatures, for each year and for the 5 years

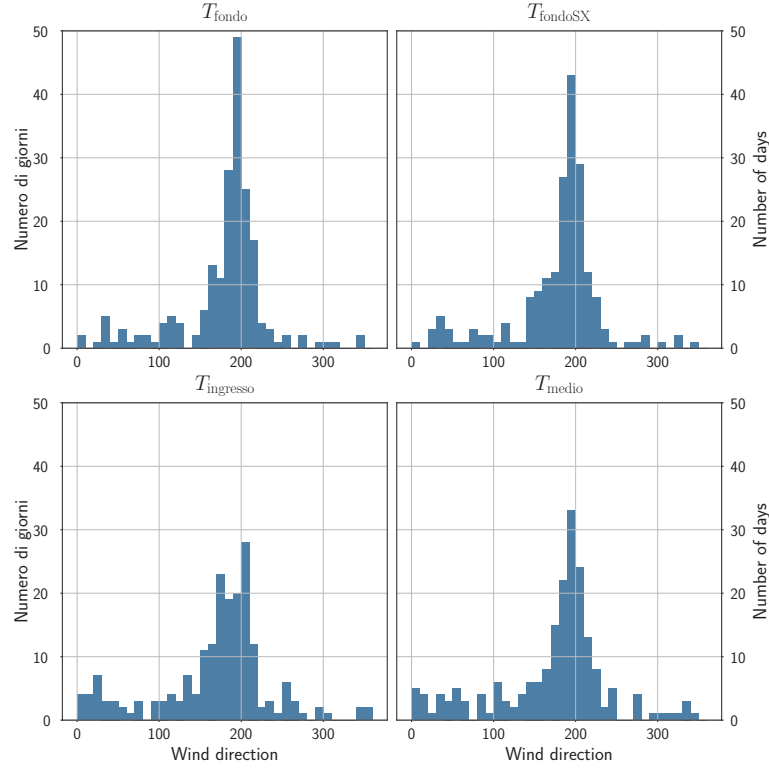


Figura 7.4: Numero di giorni di correlazione massima tra T in grotta e la media oraria della componente del vento da una certa direzione, intervalli di 10° . Direzione del vento: $0^\circ \equiv N$, $90^\circ \equiv E$, $180^\circ \equiv S$, $270^\circ \equiv W$
Figure 7.4: Number of days of max correlation between T in the cave and hourly average wind component in a given direction, 10° intervals. Wind direction: $0^\circ \equiv N$, $90^\circ \equiv E$, $180^\circ \equiv S$, $270^\circ \equiv W$

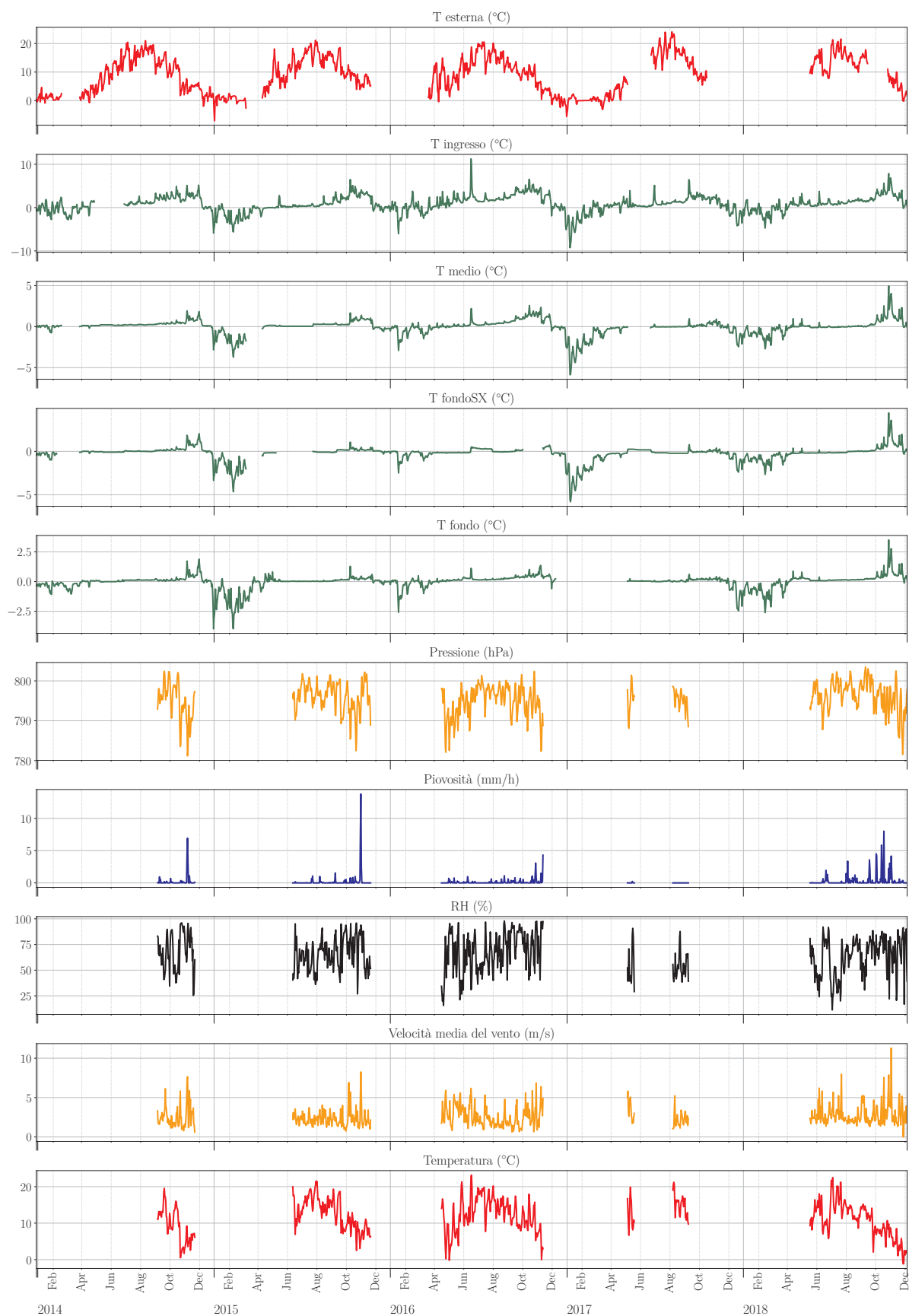


Figura 7.5: Medie giornaliere di tutte le grandezze campionate
Figure 7.5: Daily averages of all the sampled quantities

Considerazioni finali

Il monitoraggio della *Grotta del Gelo* sin qui condotto è il più esteso temporalmente che sia stato finora realizzato in questa grotta. Per la prima volta si dispone di una misura dell'evoluzione della massa glaciale, che conferma, in maniera quantitativa, alcune delle più accorte osservazioni qualitative del passato cioè che pochi eventi di maggiore entità sono responsabili di gran parte dei cambiamenti. La finestra di osservazione di cinque anni resta di durata modesta rispetto alle variazioni secolari dei fenomeni climatici, però il trend generale da inizio '900 è la riduzione delle masse glaciali in grotta [Kern and Perşoiu, 2013], se quindi estrapolassimo la perdita netta osservata in questi cinque anni si potrebbe stimare una vita massima di ancora qualche decennio per il ghiaccio perenne nella *Grotta del Gelo*. La relativa superficialità della grotta e la mancanza di terreno e vegetazione sulla superficie soprastante espongono il ghiaccio a notevoli flussi idrici, alcuni effetti del passaggio dell'acqua sul ghiaccio nel corso dell'ultimo autunno, particolarmente piovoso, sono illustrati in Fig. 8.1. Valutazioni complessive sul bilancio termico richiederebbero una sistematica misura anche dell'evoluzione dei due stagni, sia del ruscellamento dell'acqua sul ghiaccio, così come misure affidabili, durante la stagione invernale, dei parametri esterni comprese le precipitazioni nevose e lo stato di occlusione dell'ingresso. Le energie coinvolte sono maggiori di quelle che la presenza umana dovuta alla fruizione, tutto sommato sporadica, ancorché consistente in alcune occasioni, può trasferire termicamente. Una valutazione quantitativa richiederebbe comunque la sistematica verifica degli ingressi nel corso di tutto l'anno. Ai fini della tutela, più che il calore ceduto da parte degli escursionisti, potrebbe essere importante considerare l'alterazione meccanica della superficie glaciale che i visitatori possono causare, poiché può cambiare il modo in cui l'acqua scorre e interagisce con il ghiaccio.

Concluding remarks

The current monitoring of the *Grotta del Gelo* is the longest in duration ever carried out for this cave. For the first time there is a measure of the evolution of the glacial mass, which confirms, on a quantitative basis, some of the most wise qualitative observations of the past, that is few major events cause both most of growth and most of the reduction of mass. The observation window remains of modest duration compared to the secular variations of the climatic phenomena, but the general trend from the beginning of the 20th century is the reduction of the glacial masses in caves [Kern and Perşoiu, 2013], so if we extrapolate the net loss observed in these five years we could estimate a maximum life a few more decades of perennial ice in the *Grotta del Gelo*. The relative superficiality of the cave and the lack of soil and vegetation on the overlying surface expose the ice to considerable water flows, some effects of the passage of water on the ice during the last rainy autumn, are illustrated in Fig. 8.1. Overall assessments of the heat balance would require a systematic measurement of the evolution of the two ice like as well as the runoff of water on the ice and reliable measurements, during the winter, of external parameters including snowfall and the occlusion state of the entrance. The energies involved are greater than those that the human presence due to frequentation, all in all sporadic, even if it could be consistent on some occasions, can thermally transfer. A quantitative evaluation would require the systematic verification of enterings throughout the year. For protection purposes, more than the heat given off by hikers, it could be important to consider the mechanical alteration of the glacial surface that visitors can cause, since it can change the way water flows over and interacts with the ice.

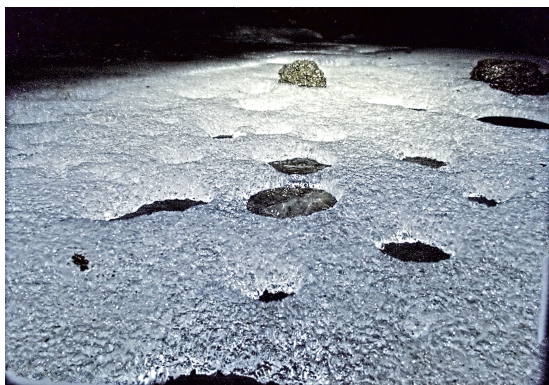


Figura 8.1: Effetti sulla superficie glaciale del copioso stillicidio provocato dalle precipitazioni autunnali
Figure 8.1: Effects on the ice surface of the copious dripping caused by autumnal rainfall

Bibliografia / Bibliography

- [Bella et al., 1982] Bella, V., Brunelli, F., Cariola, A., and Scammacca, B. (1982). Grotte Vulcaniche di Sicilia, notizie catastali: secondo contributo (da Si CT 26 a Si CT 50). *Boll. Acc. Gioenia Sc. Nat.*, 15(320):229–292.
- [Biffo and Cucuzza-Silvestri, 1977] Biffo, L. and Cucuzza-Silvestri, S. (1977). Relazione preliminare alla Direzione dell'Istituto di Vulcanologia dell'Università di Catania sull'importanza scientifica della Grotta del Gelo (Etna). Appendice alla comunicazione: CUCUZZA-SILVESTRI S.(1977)–Le Grotte
- [Bonaccorso and Maugeri, 1999a] Bonaccorso, R. and Maugeri, R. (1999a). Dieci delle più interessanti grotte sul monte etna. Schede catastali. In *Atti del IX Simposio Internazionale di Vulcanospeleologia, Catania*.
- [Bonaccorso and Maugeri, 1999b] Bonaccorso, R. and Maugeri, R. (1999b). Ten of the most interesting caves on mount etna. cadastral files. In *Proceedings of IXth International Symposium on Vulcanospeleology, Catania*.
- [Branca et al., 2015] Branca, S., Coltelli, M., and Groppelli, G. (2015). *Carta geologica del vulcano Etna*. ISPRA, Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale.
- [Caffo and Marino, 1999a] Caffo, S. and Marino, A. (1999a). Il monitoraggio della grotta del gelo. In *Atti del IX Simposio Internazionale di Vulcanospeleologia, Catania*, pages 10–19.
- [Caffo and Marino, 1999b] Caffo, S. and Marino, A. (1999b). Monitoring of Grotta del Gelo. In *Proceedings of IXth International Symposium on Vulcanospeleology, Catania*.
- [Kern and Perşoiu, 2013] Kern, Z. and Perşoiu, A. (2013). Cave ice—the imminent loss of untapped mid-latitude cryospheric palaeoenvironmental archives. *Quaternary Science Reviews*, 67:1–7.
- [Maggi et al., 2018] Maggi, V., Colucci, R. R., Scotto, F., Giudice, G., and Randazzo, L. (2018). Ice caves in Italy. In *Ice Caves*, pages 399–423. Elsevier.
- [Marino, 1992] Marino, A. (1992). Nota preliminare sul fenomeno glaciologico della Grotta del Gelo (Monte Etna). *Geogr. Fis. Din. Quat.*, 15:127–132.
- [Messina, 2015] Messina, M. A. (2015). Grotta del Gelo. Report attività 2014-2015 - Comunicazione all'Ente Parco dell'Etna. Technical report, Centro Speleologico Etneo.
- [Ohata et al., 1994] Ohata, T., Furukawa, T., and Higuchi, K. (1994). Glacioclimatological study of perennial ice in the fuji ice cave, Japan. part 1. seasonal variation and mechanism of maintenance. *Arctic and Alpine Research*, 26(3):227–237.
- [Perşoiu, 2018] Perşoiu, A. (2018). Ice caves climate. In *Ice Caves*, pages 21–32. Elsevier.
- [Romano and Sturiale, 1982] Romano, R. and Sturiale, C. (1982). The historical eruptions of mt. etna (volcanological data). *Mem. Soc. Geol. Ital.*, 23:75–97.
- [Scoto, 2013] Scotto, F. (2013). Nuovo rilievo cartografico della Grotta del Gelo (Etna, versante settentrionale) e monitoraggio stagionale della temperatura e della circolazione dell'aria al suo interno: implicazioni sulle consistenti fasi di disgelo. Master's thesis, Università degli Studi di Catania - Dipartimento di Scienze biologiche, geologiche ed ambientali - Corso di Laurea in Scienze Geologiche.

This page is intentionally left blank

Ente Parco dell'Etna

via Del Convento, 45

95030 Nicolosi (CT)

Tel. 095.821111 fax 095.914738

www.parcoetna.it