

PAOLA TOGNINI (*)

MODELLO GENETICO ED EVOLUTIVO DEI MULINI GLACIALI SULLA BASE DI OSSERVAZIONI SUL GHIACCIAIO DEI FORNI (ALTA VALTELLINA, ITALIA SETTENTRIONALE)

ABSTRACT: TOGNINI P., *Genetic and evolutive model for glacial sinkholes on the basis of field observation on Forni Glacier (Valtellina, Northern Italy)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

Since 1994, glacial sinkholes in Forni Glacier (Valfurva, Northern Italy) have been the object of systematic observation, with the aim to understand their genetic and evolutive mechanisms, their geometric arrangement and the hydrodynamics of related en- and subglacial aquifers.

Field observations every year required to locate caves entrances on a field-measured survey network, in order to measure their annual movements, together with the survey of the main caves, which let us appreciate changes in shapes, dimensions, depths and surface stream water supply. Measurements have been made of ice discontinuities, such as jointing and foliations: they proved to exert a strong control on caves systems geometrical arrangement and morphologies.

As for the origin and evolution of these caves systems, some models are at present being proposed; these models are very similar one to the others despite they have been carried on independently by different researchers in different glaciers all over the world: this suggests the existence of a general process, which is valid independently of the dimensions and the characteristics of flowing of any glaciers, provided they are temperate enough to allow ice melting and liquid water circulation. The suggested general models are mainly based on local and non-continuous-in-time field observations on a large number of glaciers all over the world, while only very few systematic studies have been carried on for several years on the same glacier, both in Italy and abroad: the data on Forni Glacier are therefore interesting, because they are field corroboration of mainly theoretical models.

On Forni Glacier about fifty main caves and many other minor ones have been detected. The caves systems are organised in a series of sinkholes, or *moulins*, aligned along certain directions (mainly sets of main discontinuities, related to ice jointing and foliations). They entirely or

partly catch the water flowing along surface *bédières*, leading water circulation from surface to englacial, or possibly subglacial, zones.

Thanks to the thin ice-sheet, which is about 100 m thick in its thicker portion, the englacial flow may be drained towards the subglacial zone, where englacial caves systems are cut by deep fractures and crevasses at the glacier front.

In each system, downstream *moulins* are year by year fossilised by the forming of new sinkholes in an upper stream position: fossilised *moulins* are gradually carried downstream by glacier flowing, so that it is possible to observe sinkholes in all their different phases of evolution, from a proto-*moulin* phase, merely a fracture enlarged by ice melting and water friction, to large sub-circular shafts, some meter large and over 40 m deep, to relict, completely fossil *moulins*, whose dimensions gradually decrease because of plastic collapse when water feeding stops.

Every year, the formation of new sinkholes was observed, always in the same position with respect to the bedrock, probably just above rock rises, which create in the overlaying ice tensional conditions inducing open jointing, which, in its turn, causes surface water to seep at depth. During summer season, neoformed *moulins* fossilise downstream sinkholes that survived during winter season. A systematic observation of the caves allowed us to estimate an age: a time span of 6 year is assessed from the moment a proto-*moulin* is formed, generally at the intersection of two or more discontinuities sets, to the moment, after reaching its maximum size, the *moulin* gets fossilised and deprived of water feeding by the forming of new upstream sinkholes, getting gradually narrower by ice plastic collapse, till it finally disappears.

The observation of very peculiar ice textures inside *moulins* suggests that during winter season ice caves might get completely filled with water because of a raising of the water-table caused by ice closing discharge points at the glacier front. The drowning of the caves and the subsequent formation of secondary ice, possibly completely filling the englacial conduits, probably cause the surviving of *moulins* season by season: when deprived of water feeding, these features are in fact very prone to collapse and disappear in the course of few weeks.

The maximum depth of the sinkholes is about 40 m; curiously, the depths of the explored shafts (about 30 in number) do not show an homogeneous distribution, and three main depth classes are observed, at about 2-3 m, 10-15 m and 35-40 m depth. Obviously, the active shafts are the deepest ones. Proto-*moulins* on their way of forming often exhibit a depth (10-20 m) which is considerable if compared with their small diameter (few centimetre, or decimetre).

(*) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Milano, Via Mangiagalli 34 - 20133 Milano (paolatognini@ioe.it).

L'autrice desidera ringraziare il Prof. C. Smiraglia, per l'aiuto sul campo, il Prof. A. Bini, per la rilettura del manoscritto e gli utili consigli, e gli amici speleologi, in particolare M. Inglese, senza l'aiuto dei quali questo lavoro non sarebbe stato possibile.

Every system exhibits a regular distance between its *moulins*., the distance being evidently equal to the annual movement of the ice-sheet. This distance varies from 4-5 m to 15-20 m, and differs from one system to the others. We may therefore suppose the glacier to have different velocities in its different portions: this causes the existence of portions submitted to strong shear stresses, which may act as an impervious barrier, and this probably causes the existence of parallel and independent caves systems.

On the glacier surface, two different areas have been detected, to the W and to the E of the main middle moraine.

The western area exhibits a regular slightly inclined topography, broken by a series of transverse steeper slopes. Here series of parallel caves systems are observed: they are regularly aligned along a 330° N striking foliation, the same direction guiding the arrangement of the surface *bédières* feeding the *moulins*. All sinkholes are formed at the intersection of the 330° N foliation with a set of orthogonal 250° N striking joints. As all sinkholes in the same evolution phase are aligned at the same height along this direction, it is easy to infer the formation of the sinkholes to be related with the existence of a sill stretching transversally to the direction of glacier flowing.

The eastern area on the contrary exhibits a more complex topography, with systems of *bédières* whose arrangement is not parallel, but seems to converge towards a central depression of the ice sheet. In this area ice thickness exceeds 80 m. In the eastern area the bedrock may form an amphitheatre sill, or, more probably, an irregular topography, with series of small rock rises, whose surface traces are marked by groups of aligned *moulins*.

In this area distances between *moulins* are more irregular and closer than in the western area: this proves the existence of an irregular bedrock surface resulting in differential movements and stresses inside the ice mass.

After these short preliminary considerations, it is evident that the study of ice caves systems may be of great interest in the comprehension of the englacial water drainage system and may give interesting information about ice flow dynamics.

KEY WORDS: Moulins, Englacial caves, Forni Glacier, Alps.

RIASSUNTO: TOGNINI P., *Modello genetico ed evolutivo dei mulini glaciali sulla base di osservazioni sul Ghiacciaio dei Forni (alta Valtellina, Italia Settentrionale)*. (IT ISSN 0391-9838, 2001).

A partire dal 1994, i sistemi di inghiottitoi glaciali del Ghiacciaio dei Forni (Valfurna, alta Valtellina, Italia Settentrionale) sono stati oggetto di osservazioni sistematiche, allo scopo di comprenderne la genesi e l'evoluzione. I modelli generali proposti per la formazione e l'evoluzione di queste cavità derivano per lo più da osservazioni puntuali e sporadiche su un grande numero di ghiacciai, mentre ancora non sono molti, in Italia e all'estero, gli studi sistematici condotti per un certo numero di anni sullo stesso ghiacciaio.

Le osservazioni hanno comportato, ogni anno, il posizionamento degli ingressi delle cavità lungo una rete di poligonali, unitamente al rilievo topografico delle cavità più importanti, che ha permesso di monitorarne le variazioni di forma, di profondità e di alimentazione idrica.

Gli inghiottitoi di maggiori dimensioni sono concentrati in due zone, che mostrano caratteristiche differenti per quanto riguarda lo sviluppo delle cavità. Sono state individuate una cinquantina di cavità principali e numerosissime altre minori. I sistemi sono costituiti da una serie di inghiottitoi allineati lungo ben precise direttrici (corrispondenti a sistemi di discontinuità legate a fratturazione e a foliazione del ghiaccio) che catturano, interamente o in parte, le acque delle *bédières*, trasferendo la circolazione idrica all'interno del ghiacciaio.

Si è osservata la formazione annuale di nuovi mulini in punti fissi rispetto al substrato, che, nel corso della stagione estiva, fossilizzano i mulini più a valle, sopravvissuti alla stagione invernale precedente.

Ciascun sistema subisce una progressiva migrazione verso valle, che allontana i mulini dal punto in cui si sono originati: è perciò possibile osservare inghiottitoi in tutti i gradi di evoluzione, dallo stadio di protomu-

lini, poco più che fratture allargate dall'acqua, a grandi pozzi a sezione sub-circolare, del diametro di qualche metro e profondità superiore ai 40 m, fino ad arrivare a mulini relitti completamente fossilizzati, le cui dimensioni si riducono gradualmente per collasso plastico quando viene a mancare l'alimentazione idrica.

L'osservazione sistematica ha permesso di tentare una stima delle età e dei tempi di permanenza delle strutture, tempi stimati in circa 6 anni, dal momento in cui si forma un protomulino, a quando il mulino, dopo aver raggiunto le sue dimensioni massime in circa 2 stagioni, viene fossilizzato e privato dell'alimentazione idrica dall'apertura di nuovi inghiottitoi a monte, e si riduce gradualmente di dimensioni fino a scomparire.

L'osservazione di particolari strutture di ghiaccio all'interno di alcuni mulini fa supporre che, nel corso della stagione invernale, le cavità vengano allagate dalla risalita della superficie piezometrica, venendo, in tal modo preservate: se private dell'alimentazione idrica, infatti, queste strutture tendono a collassare e a chiudersi nel giro di poche settimane.

Ogni sistema presenta una distanza costante tra i mulini che lo costituiscono, distanza che è evidentemente pari allo spostamento annuale del ghiacciaio: se ne deduce che il ghiacciaio presenta parti a differente velocità, con conseguente formazione di zone sottoposte a forti sollecitazioni di taglio, probabilmente alla base dell'esistenza di sistemi di cavità paralleli ed indipendenti.

Appare quindi evidente come l'osservazione di questi sistemi di cavità sia di notevole interesse per la comprensione della circolazione idrica endo-glaciale, e possa fornire interessanti informazioni circa la dinamica dei flussi glaciali.

TERMINI CHIAVE: Mulini, Cavità endo-glaciali, Ghiacciaio dei Forni, Alpi.

INTRODUZIONE

I ghiacciai temperati e sub-polari sono sede di circolazione attiva di acque di fusione, meteoriche e di provenienza alloctona. La circolazione di tali acque ha come conseguenza l'instaurarsi di sistemi di drenaggio superficiali e profondi, endo- e sub-glaciali, le cui morfologie e funzionamenti presentano spiccatissime analogie con quelli riscontrabili in rocce carsificate. La differenza fondamentale è l'origine di tali forme, imputabile a fusione (processo fisico) del «materiale ghiaccio» nel caso di «carsismo glaciale» e a dissoluzione (processo chimico) della roccia nel caso di massicci rocciosi.

Inoltre, le peculiari caratteristiche fisiche e reologiche del materiale ghiaccio, in particolare il comportamento meccanico fragile-plastico, unitamente alla dinamica dei ghiacciai, molto più attiva e veloce della dinamica di un massiccio roccioso, fanno sì che le forme carsiche glaciali siano strutture ad evoluzione estremamente rapida: ne deriva che, contrariamente alle cavità in roccia, tali strutture non conservano, o conservano per periodi molto limitati (pochi anni), «memoria» di situazioni strutturali e idrodinamiche pregresse, ma nel contempo permettono di osservare «in tempo reale» le fasi di formazione ed evoluzione morfologica, contribuendo in tal modo a chiarire alcuni aspetti genetici di forme analoghe sviluppate in roccia.

L'analisi di questi sistemi può portare un significativo contributo sia per precisare le caratteristiche della di-

namica glaciale sia per la comprensione del funzionamento idrodinamico dei sistemi di drenaggio endo- e sub-glaciali, la cui conoscenza risulta spesso di grande interesse anche da un punto di vista applicativo: in molti casi l'utilizzo antropico delle acque di fusione, provenienti dagli scaricatori sub-glaciali, sia a scopo idroelettrico che di irrigazione e di approvvigionamento idrico, rappresenta l'unica risorsa in aree montane e/o in clima arido freddo.

Questi sistemi di cavità, pur osservati e descritti già a partire dal XIX secolo (Monterin & Somigliana, 1930), sono stati per lungo tempo relegati al ruolo di singolari curiosità naturali, forse anche per le difficoltà tecniche che la loro esplorazione comporta, difficoltà solo recentemente, e non completamente, risolte grazie all'ausilio di attrezzature miste speleologiche e di arrampicata su ghiaccio. Solo da un paio di decenni, quindi, si stanno facendo strada alcuni modelli, significativamente simili anche se proposti in modo del tutto indipendente per diversi ghiacciai di tutto il mondo (Nye 1952, 1953; Rothlisberger & Lang, 1987; Eraso & Pulina, 1994; Wenger, 1994; Schroeder, 1991a, 1991b, 1991c, 1995; Badino, 1995a, 1995b, 1999; Badino & Piccini, 1995; Mavlyudov, 1995, 1999; Reynaud & Moreau, 1995; Tognini & Inglese, 1995; Bini & *alii*, 1998). Questo suggerisce l'esistenza di un processo generale, valido indipendentemente dalle dimensioni e dalle caratteristiche di flusso dei ghiacciai (Badino, 1995b, 1999).

I modelli generali proposti per la formazione e l'evoluzione di questi sistemi di cavità derivano per lo più da osservazioni puntuali e sporadiche su un grande numero di ghiacciai, mentre sono ancora rari, in Italia e all'estero, gli studi sistematici condotti per un certo numero di anni sullo stesso ghiacciaio.

I mulini del Ghiacciaio dei Forni (Valfurva, alta Valtellina, Italia Settentrionale) sono stati spesso oggetto di sporadiche osservazioni ed esplorazioni da parte di ricercatori e speleologi (Uggeri & Corvi, 1995; Celi, 1995; Meneghel & *alii*, 1998), ma soltanto a partire dal 1994 le osservazioni sono divenute sistematiche e continue nel tempo. Questo ha permesso, per la prima volta su un ghiacciaio italiano, di osservare direttamente sul terreno la formazione e l'evoluzione nel corso degli anni di queste strutture (Tognini & Inglese, 1995), già oggetto di considerazioni e modelli in buona parte teorici, modelli che sono stati messi a confronto con i dati di campagna.

METODI DI LAVORO

Le campagne di lavoro sui sistemi di cavità endo-glaciali del Ghiacciaio dei Forni hanno avuto inizio nell'estate del 1994, ad opera della scrivente e di Mauro Inglese, sporadicamente coadiuvati da altri speleologi del Gruppo Grotte Milano CAI-SEM. Sono state fatte, ogni anno, almeno tre escursioni, una all'inizio della stagione estiva,



FIG. 1 - Distribuzione delle principali aree interessate da ingressi di cavità glaciali sul Ghiacciaio dei Forni (in puntinato). La zona E e la zona W presentano la maggior densità di strutture e le cavità di maggiori dimensioni, mentre nella zona N gli inghiottitoi sono fortemente condizionati dall'intensa fratturazione in prossimità della fronte e non danno generalmente origine a sistemi di cavità endo-glaciali propriamente detti. Sono indicate (freccie) le ipotetiche principali vie di drenaggio endo-glaciale: è probabile che l'acquifero endo-glaciale sia costituito da sottosistemi indipendenti, che possono subire un mescolamento solo in prossimità della fronte, dove le acque endo-glaciali passano in posizione sub-glaciale a causa della intensa fratturazione che attraversa l'intero spessore del ghiaccio. Poiché si osservano almeno due torrenti sotto-glaciali, è probabile che anche il sistema sub-glaciale sia a sua volta costituito da almeno due sistemi di dreni indipendenti.

FIG. 1 - Main areas characterized by englacial sikholes on the Forni Glacier (dotted areas). The E and W zones exhibit the highest caves density and the largest caves dimensions, while in the N zone sinkholes are strongly controlled by the intense jointing close to the glacier front, and they do not generally give origin to true englacial caves systems. Hypothetical main drainage pathways are indicated (arrows): the englacial aquifer is probably built with independent drainage sub-systems, which may undergo mixing only close to the glacier front, where englacial waters are driven in a sub-glacial position, thanks to intense jointing which cross the whole glacier thickness. Since at least two distinct sub-glacial rivers are observed, the sub-glacial drainage system is probably built, in its turn, by at least two independent drainage systems (E and W with respect to the main middle moraine).

una al culmine della stagione estiva e una all'inizio della stagione invernale, compatibilmente con le condizioni meteorologiche.

Le osservazioni hanno comportato, ogni anno, oltre, naturalmente, all'esplorazione interna delle principali cavità, il posizionamento degli ingressi lungo una rete di poligonali, allo scopo di verificarne gli spostamenti annuali, unitamente al rilievo topografico, che ha permesso di monitorare le variazioni di forma, profondità e alimentazione idrica.

Nell'estate del 1997, grazie alla collaborazione con gli operatori lombardi del Comitato Glaciologico Italiano e, in particolare, all'interessamento del Prof. Claudio Smiraglia dell'Università di Milano, sono state messe in opera alcune paline in prossimità degli inghiottitoi più importanti, per facilitarne il riconoscimento da una stagione all'altra: la rapida evoluzione di queste strutture, infatti, ne rende spesso difficile una sicura identificazione anche a distanza di sole poche settimane.

Inizialmente le paline di identificazione dei principali ingressi di cavità sono state posizionate rispetto ad un punto fisso all'esterno del ghiacciaio, le cui coordinate sono state rilevate con GPS: lo scopo era, evidentemente, quantificare lo spostamento annuo delle strutture endo-glaciali rispetto al substrato, da confrontarsi con i dati sulle velocità di scorrimento del ghiacciaio. Purtroppo la novità del lavoro ha comportato alcuni errori tecnici, per cui si sono verificati problemi di stabilità delle paline, legati alla forte ablazione estiva, all'accumulo di neve e alle modificazioni della forma degli ingressi: all'inizio della stagione 1998 la maggior parte delle paline era scomparsa all'interno degli inghiottitoi! Pur venendo a mancare una serie importante di dati numerici, le ripetute osservazioni permettono comunque di avanzare alcune ipotesi sui meccanismi genetici e sull'evoluzione di queste cavità, ipotesi che, pur essendo specificatamente costruite su quanto rilevato sul Ghiacciaio dei Forni, possono avere, in linea di massima, una validità generale, applicabile anche ad altri apparati glaciali.



FIG. 2 - Sistemi di inghiottitoi della zona W, come rilevati nel luglio 1998. Sono schematicamente indicate le morene galleggianti, (a sinistra la morena mediana principale e a destra la morena laterale sinistra): si osservi come molti sistemi si dispongono simmetricamente lungo le morene mediane. Si notino inoltre la disposizione dei sistemi lungo direzioni parallele alla foliazione principale, che guida anche la direzione di scorrimento idrico superficiale, e l'allineamento dei mulini secondo un sistema di discontinuità a direzione circa 250° N. L'allineamento di mulini di pari grado evolutivo lungo tale direttrice mima probabilmente l'andamento di una soglia o gradino del substrato. Si noti come i sistemi siano costituiti da 2-3 cavità, di cui la più a monte cattura in genere la totalità delle acque di scorrimento superficiale, fossilizzando gli inghiottitoi più a valle. Si osservi come ad ogni bédrière superficiale corrisponda un sistema endo-glaciale distinto; 1) morene mediane; 2) principali bédrières; 3) foliazioni e fratture; 4) ingressi dei mulini.

FIG. 2 - Sinkholes systems in the W zone, as surveyed in July 1998. Moraines are schematically represented (on the left the main middle morain and on the right the left lateral morain): note many systems are arranged symmetrically along middle moraines. Note the systems arrangement parallel to the main foliation strike, which also controls the surface drainage direction, and the moulins alignment parallel to a 250° N striking joint set. All sinkholes in the same evolution phase are aligned along this direction, probably mimicking the arrangement of a bedrock sill or step. Note all systems are built of 2-3 caves: the ones at the most upstream position generally capture the whole of the surface streams feeding the systems, making the downstreams caves fossil. Note every bédrière feeds a distinct englacial system; 1) middle moraines; 2) main bédrières; 3) foliations and jointing; 4) glacial sinkholes.

LE CAVITÀ ENDO-GLACIALI

Sono state individuate una cinquantina di cavità principali e numerosissime altre minori (fig. 1), che appaiono organizzate in una ventina di sistemi endo-glaciali compartimentati, a evoluzione indipendente gli uni dagli altri, che presumibilmente originano un complesso sistema acquifero endo-glaciale, probabilmente costituito da piccoli acquiferi indipendenti (fig. 2 e 4).

Tutte le cavità osservate si trovano a quote comprese tra 2700 e 2600 m s.l.m. (fig. 1 e 3), vale a dire nella zona di ablazione, al di sotto del limite di equilibrio e al di sopra della crepacciata e irregolare zona della fronte. In tale zona si realizzano due delle condizioni necessarie perché si abbia la formazione di inghiottitoi glaciali: la presenza di acqua allo stato liquido, preferibilmente drenata da reticoli idrografici incanalati, e la presenza di un numero limitato di punti di assorbimento concentrato: un ruscellamento diffuso e un assorbimento disperso in un grande numero di piccole discontinuità, infatti, fanno sì che l'energia termica e meccanica dell'acqua sul ghiaccio venga dispersa su superfici molto ampie, e quindi risulti inefficace nel modellamento morfologico di cavità di dimensioni importanti.

Di grande importanza risultano quindi la topografia della superficie del ghiacciaio, che può o meno favorire lo

scorrimento incanalato delle acque superficiali, e la situazione tensionale in cui si trova localmente il ghiaccio, responsabile, in particolare, delle direzioni e delle caratteristiche fisiche e meccaniche delle discontinuità all'interno della massa di ghiaccio. I sistemi di cavità sono infatti costituiti da una serie di inghiottitoi, allineati lungo ben precise direttrici, che corrispondono a sistemi di importanti discontinuità legate a fratturazione e a foliazione (secondo la definizione di Paterson, 1994) all'interno del ghiaccio, (fig. 2 e 3) che catturano interamente o parzialmente le *bédiers* superficiali, trasferendo la circolazione idrica dalla superficie all'interno del ghiacciaio (fig. 5 e 6).

Dato l'esiguo spessore del ghiaccio del Ghiacciaio dei Forni, che nel punto più profondo si aggira intorno ai 100 m (Guglielmin & *alii*, 1995), è probabile che il drenaggio endo-glaciale venga rapidamente trasferito in zona sub-glaciale. Ciò avviene sicuramente in prossimità della zona crepacciata della fronte: in questo caso non appare verosimile ipotizzare la presenza di zone sature di volume e spessore significativo, contrariamente a quanto deve accadere in ghiacciai dove lo spessore del ghiaccio è superiore al limite di propagazione in profondità delle fratture (Rothlisberger, 1972; Shreve, 1972; Rothlisberger & Lang, 1987; Eraso & Pulina, 1994; Badino, 1995a, 1995b, 1999; Bini & *alii*, 1998; Mavlyudov, 1995, 1999), limite che la maggior parte degli autori situa intorno ai 100-200



FIG. 3 - Le zone dei mulini: la zona E (in fondo, dietro la seconda morena, alla base della parete seraccata) vista dalla zona W (in primo piano): si osservi la topografia pianeggiante di entrambe le zone (fotografia M. Inglese).

FIG. 3 - The moulin areas: the E zone (in the background, behind the second moraine, at the base of the crevassed wall) seen from the W zone (in the foreground): note the sub-horizontal surface of both zones (photo by M. Inglese).

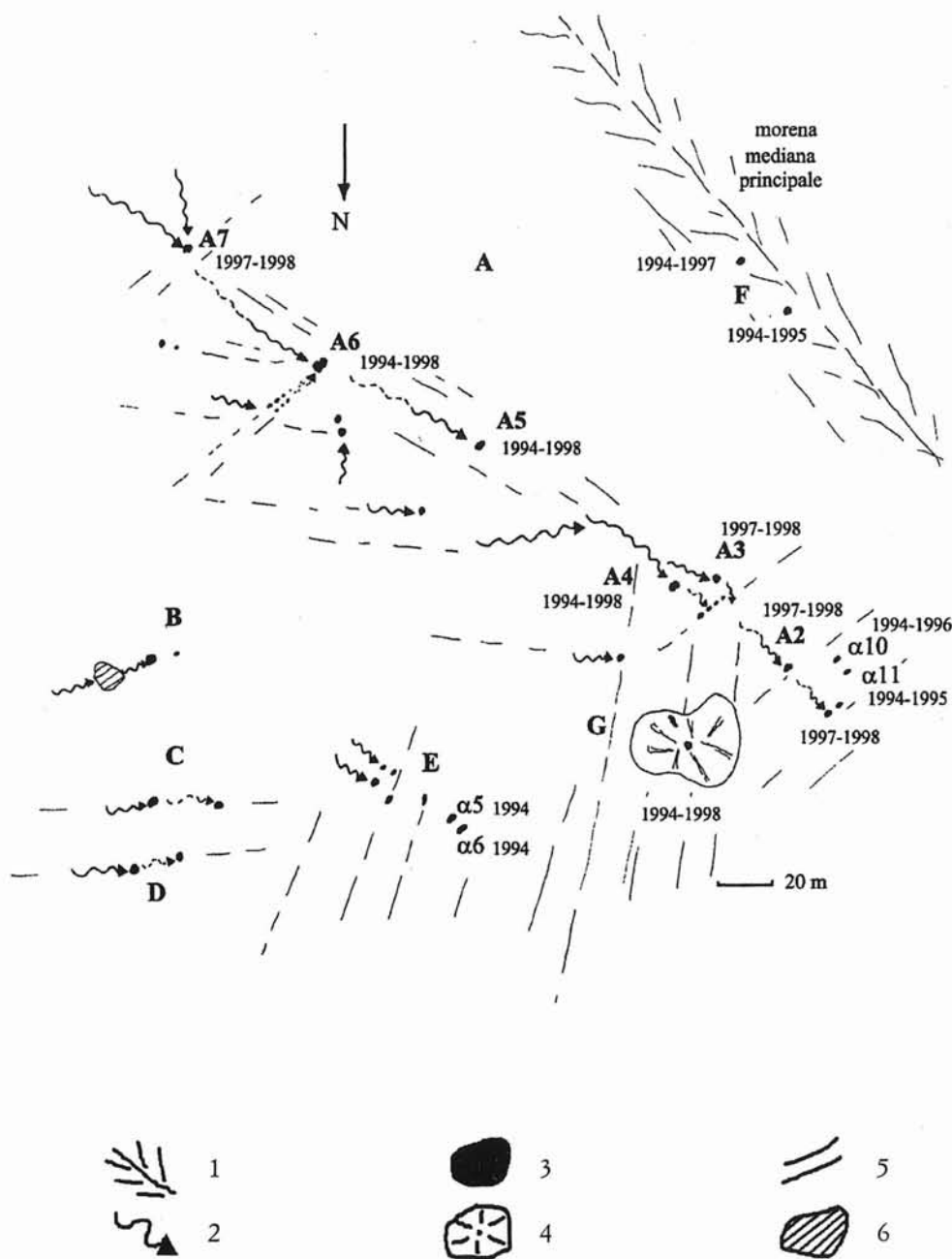


FIG. 4 - Sistemi di inghiottitoi della zona E, come rilevati nel luglio 1998. È schematicamente indicata la morena mediana principale. Si individuano 6 sistemi principali, e altri minori sono probabilmente di questi tributari. Per ogni cavità vengono indicati gli anni in cui ne è stata osservata la presenza. Tutti i sistemi mostrano di mantenere la stessa posizione nel corso degli anni: nuove cavità sostituiscono le vecchie in via di collasso man mano che queste migrano verso valle, ma nel complesso il sistema è stabile intorno ad una struttura di equilibrio. Il sistema A è il più complesso (l'evoluzione delle sue cavità viene presentata in fig. 4a). Si noti la scomparsa, nel corso degli anni, di alcune cavità a valle (α_{10} , α_{11}), e la comparsa di una nuova cavità a monte (A_7). Le cavità a valle di A_2 , trovandosi nella zona fortemente crepacciata del dosso che delimita verso N la zona E (fig. 1), subiscono un'evoluzione particolare, condizionata dall'intensa fratturazione. Si noti la scomparsa del sistema F nel 1998. I sistemi B, C, D e E mostrano di essere molto stabili nel corso degli anni, e sono costituiti, di norma da due soli inghiottitoi, i cui tempi di vita sembrano essere in genere di circa 3-4 anni, a differenza del sistema A, dove i mulini permangono per almeno 6 anni. Si osservi la stabilità della dolina glaciale G, che, tuttavia, nel 1998 ha iniziato a subire uno smembramento a causa del suo ingresso nella zona crepacciata. Negli anni è variato il comportamento della cavità al suo interno: dal 1994 al 1996 era presente, sul lato S, un meandro che, tagliato dalla dolina, la alimentava, formando talvolta un piccolo lago sul fondo, mentre a partire dal 1997 si è aperta una cavità assorbente al centro, accompagnata dalla progressiva scomparsa del meandro. In questa zona, si è osservata anche la progressiva distruzione dei mulini α_5 e α_6 nel corso dell'estate 1994; 1) morena mediana; 2) principali bédrières; 3) ingressi dei mulini; 4) dolina glaciale; 5) foliazioni e fratture; 6) lago temporaneo.

FIG. 4 - Sinkholes in the E zone, as surveyed in July 1998. The main middle moraine is schematically represented. 6 main sinkholes systems are detected, and other minor ones probably englacially feed them. For every sinkholes, the years during which they were observed is shown. All systems seem to keep the same position over the years: new sinkholes take the place of older ones as soon as they collapse during their downglacier migration, but the system as a whole is stable close to an equilibrium configuration. The A system is the most complex (the evolution of its caves is shown on fig. 4a). Over the years, note the disappearing of some downstream sinkholes (α_{10} , α_{11}), and the formation of new upstreams ones (A_7). The moulins downstream with respect to A_2 are in the intensely crevassed and fractured area of the ridge delimitating northward the E zone (fig. 1), and they are subjected to a peculiar evolution, controlled by jointing. Note the disappear of F system during 1998. The B, C, D, E systems seem to be very stable over the years, and are generally built up with only two sinkholes, whose life span is probably of 3-4 years, while in the A systems moulins life span surely exceeds 6 years. Note the stability of the G doline, which in 1998 began to undergo destruction while entering the crevasses area. In the crevasses area, the destruction of α_5 and α_6 moulins was also observed during 1994 summer; 1) middle moraines; 2) main bédrières; 3) glacial sinkholes; 4) glacial doline; 5) foliations and fractures; 6) temporary lake.

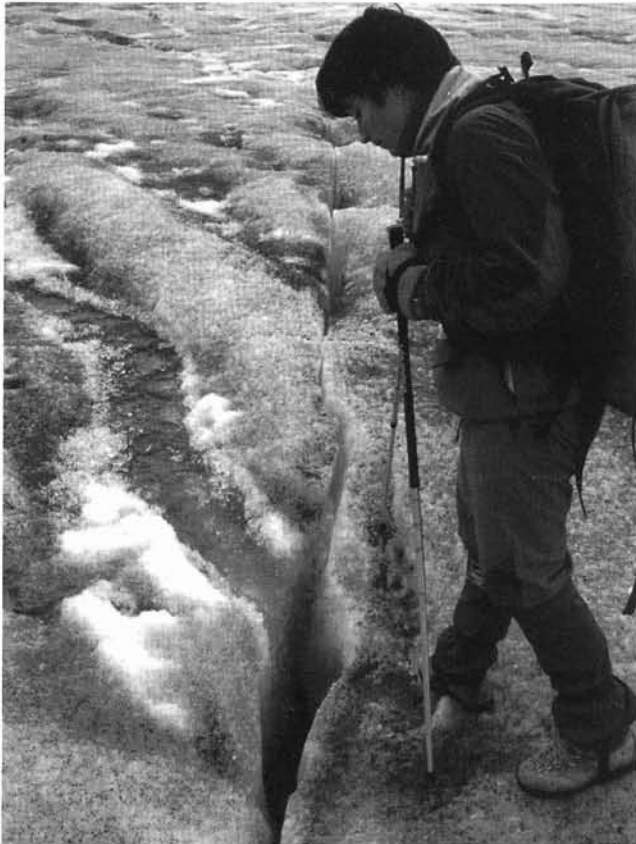


FIG. 5 - Formazione incipiente di un proto-mulino a partire da una discontinuità aperta che cattura una piccola *bédière*: si noti come l'azione morfologica dell'acqua possa esplicarsi efficacemente solo quando la portata del corso d'acqua inghiottito è relativamente elevata rispetto alle dimensioni della frattura iniziale (fotografia M. Inglese).

FIG. 5 - Early phases in the formation of a proto-moulin originating from an open discontinuity capturing a small *bédière*: note that the morphological modelling by water flow is effective and powerful only when the sinking water flow is large with respect to the dimension of the initial fracture (photo by M. Inglese).

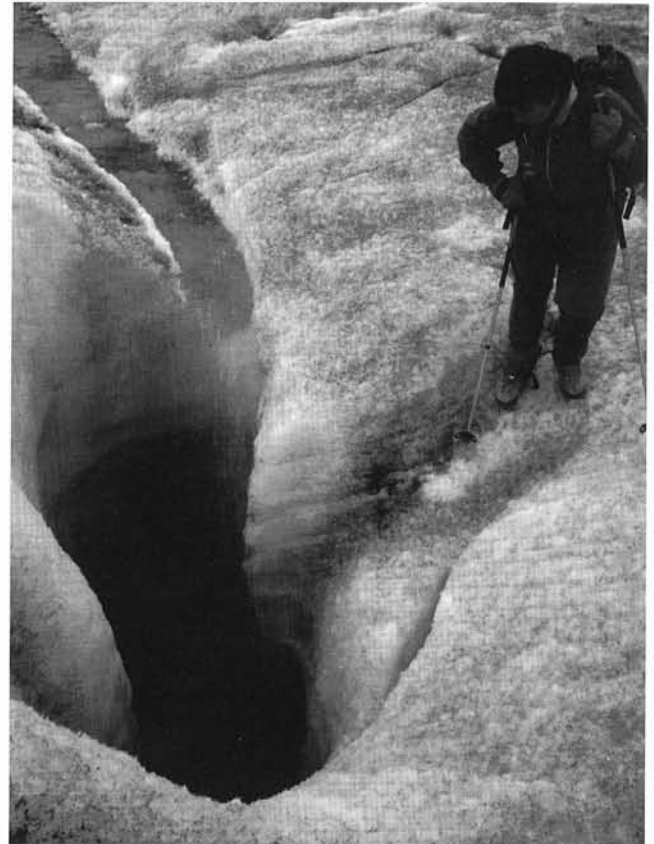


FIG. 6 - Evoluzione morfologica di un mulino a partire da un proto-mulino (fig. 5), con progressivo aumento delle dimensioni e della profondità con l'avanzare della stagione estiva. Si osservi come il ruolo delle discontinuità divenga sempre meno importante nel controllo della forma della cavità con il progressivo aumentare delle dimensioni di quest'ultima (fotografia M. Inglese).

FIG. 6 - Morphological evolution of a moulin from a proto-moulin (fig. 5), by progressive enlargement and deepening over the hot season. Note that the control of discontinuities on caves morphology is the lesser important the larger the sinkholes grow (photo by M. Inglese).

FIG. 7 - Morfologie interne di un pozzo glaciale attivo nel corso di più anni: si osservi la complessità delle forme, dovute a piccole migrazioni del corso della *bédière* che lo alimenta in anni successivi (fotografia M. Inglese).

FIG. 7 - Inner morphology of a glacial pit which remained active over many years: note the complex shape, due to small changing in the sinking *bédière* over the years (photo by M. Inglese).



m (Robin, 1974; Paterson, 1994; Badino, 1995b, 1999; Bini & alii, 1998).

Nell'agosto 1993, nell'ambito di una campagna di ricerca del Comitato Glaciologico Italiano (Uggeri & Corvi, 1995), sono stati effettuati test con traccianti, allo scopo di definire i tempi e le modalità di arrivo alla fronte di due differenti traccianti fluorescenti (Fluoresceina sodica e Tinopal CBS-X) immessi in due diversi mulini (la cui posizione non è stata precisata dagli Autori, ma probabilmente situati a E della morena mediana principale). Secondo quanto riferito da Uggeri & Corvi (1995), entrambi i traccianti sono stati restituiti dopo circa 20 ore dall'immissione: le curve di restituzione sono state sostanzialmente simili, ma con un leggero sfasamento tra i due picchi di concentrazione (rispettivamente 24 ore per il Tinopal e 28 ore per la Fluoresceina). Questo suggerisce una certa anisotropia nella strutturazione della rete di scorrimento endo- o sub-glaciale, e indica probabilmente percorsi indipendenti per le acque inghiottite nei due diversi mulini, che devono, quindi appartenere a due sistemi di deflusso distinti ed indipendenti, che entrano in comunicazione solo in prossimità della fronte. Le velocità di scorrimento, calcolate dagli Autori in, rispettivamente, 81 m/h e 66 m/h sono molto elevate e suggeriscono la presenza di vie di drenaggio ben strutturate, mentre la presenza di picchi minori sembra suggerire l'esistenza di una sia pur limitata zona saturata endo- o sub-glaciale.

(Un altro test eseguito nell'Agosto 1994 (Meneghel & alii, 1995) versando cloruro di sodio in un torrente sopra-glaciale nella zona più occidentale non ha dato alcun risultato, probabilmente a causa della diluizione del tracciante al di sotto del limite di rilevabilità strumentale.)

L'esistenza di un sistema acquifero complesso, costituito da sotto-sistemi indipendenti, è confermata anche da altre osservazioni. Per esempio, l'osservazione che molti sistemi di inghiottitoi si trovino allineati in prossimità sia della morena mediana principale sia di piccole morene mediane minori fa ritenere che le zone di taglio sottese dalle morene agiscano come barriere di permeabilità, impedendo l'interconnessione di sistemi adiacenti.

Temporanee ostruzioni di condotti endo-glaciali, dovute, per esempio, a deformazioni di gallerie a causa di movimenti del ghiacciaio, o a crolli sotterranei, spesso creano ostacoli al deflusso endo-glaciale, provocando risalite, talvolta assai rapide, del livello dell'acqua nei mulini, che può risalire in pochi minuti di parecchi metri (Smiraglia, com. pers.; Meneghel & alii, 1998): l'osservazione che la risalita del livello dell'acqua avviene solo in un ristretto numero di mulini in un certo intorno, senza interessare mulini adiacenti (Meneghel & alii, 1998), fa pensare che le vie di deflusso endoglaciale siano più di una e siano tra loro indipendenti. I tempi di residenza delle acque negli acquiferi endo-glaciali del Ghiacciaio dei Forni appaiono quindi brevi, con percorsi indipendenti e non interconnessi per acque provenienti da inghiottitoi appartenenti a sistemi differenti.

In prossimità della fronte, in zona sub-glaciale, si verifica invece un certo mescolamento delle acque dei diversi sistemi, tuttavia sembrerebbe che anche nella zona sub-

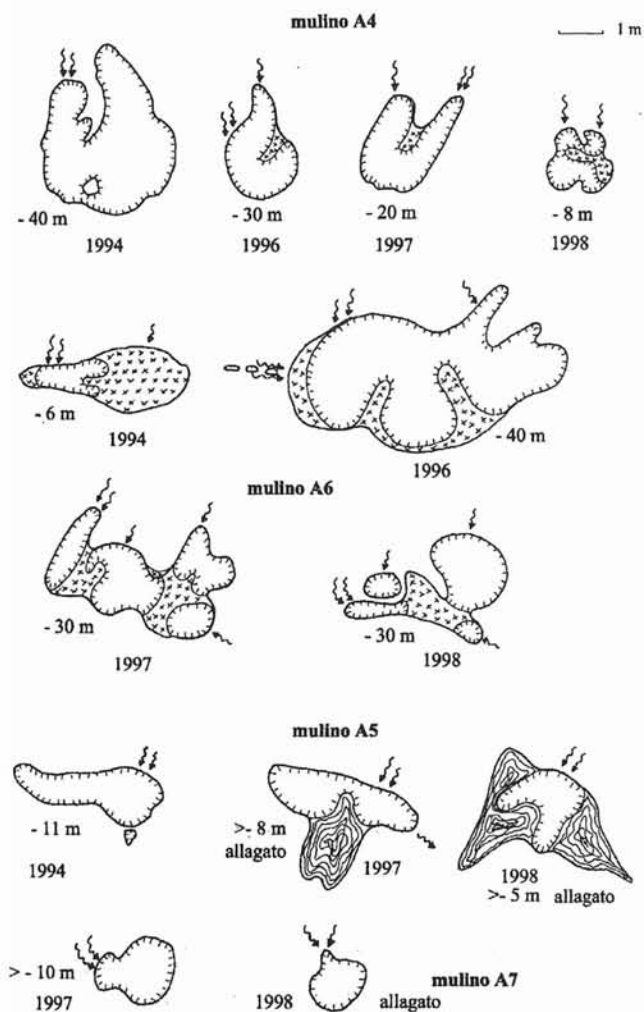


FIG. 8a - Evoluzione delle sezioni degli ingressi e delle profondità dei mulini del sistema A della zona E dal 1994 al 1998. Si sono in particolare osservati: 1- il declino del mulino A₄; 2- il progressivo ingrandirsi ed approfondirsi del mulino A₆; 3- l'evoluzione anomala del mulino A₅, il cui allagamento ha probabilmente contribuito ad allungare di almeno un anno il tempo di permanenza del mulino A₄, situato immediatamente a valle; 4- la comparsa del nuovo mulino a monte A₇, il cui allagamento nel 1998 ha però introdotto una nuova anomalia nell'evoluzione del sistema.

FIG. 8a - Evolution of cross section and depth of the moulins of A system in the E zone from 1994 to 1998. It was particularly noted: 1- the decline of A₄ moulin, 2- the enlargement and deepening of A₆ moulin, 3- the anomalous evolution of A₅ moulin, whose drowning probably added at least one year to the downstream A₄ moulin life-span, 4- the formation of a new upstream A₇ moulin, whose 1998 drowning caused a new disturbance in the evolution of the system.

glaciale esistano almeno due sistemi di drenaggio indipendenti e distinti, relativi, rispettivamente, alle porzioni a E e a W rispetto alla morena mediana principale. La rete di deflusso idrico endo- e sub-glaciale appare quindi piuttosto complessa, e risulta evidente che per una sua più precisa caratterizzazione sono necessari altre, e più sistematiche, indagini.

In ciascun sistema, gli inghiottitoi più a valle vengono di anno in anno fossilizzati dall'apertura di mulini più a monte (Tognini & Inglese, 1995). Come tutto ciò che si trova sopra o all'interno di un ghiacciaio, i mulini subiscono una progressiva migrazione verso valle, che li allontana dal punto in cui si sono originati, in funzione della velocità di flusso del ghiacciaio: è perciò possibile osservare inghiottitoi in tutti i gradi di evoluzione, dallo stadio di «proto-mulini», poco più che fratture allargate dall'acqua (fig. 5), a grandi pozzi a sezione sub-circolare, del diametro di qualche metro e profondità superiore ai 40 m (fig. 6 e 7), fino ad arrivare a mulini completamente fossilizzati, le cui dimensioni si riducono gradualmente per collasso plastico quando viene a mancare l'alimentazione idrica (fig. 8a e 9a).

Si è osservata la formazione annuale di nuovi mulini in punti fissi rispetto al substrato (fig. 3), presumibilmente in corrispondenza di dossi o rilievi, che originano nel ghiaccio soprastante una situazione tensionale tale da indurre la formazione di fratture aperte, che favoriscono l'infiltrazione in profondità delle acque di scorrimento superficiale, in genere all'intersezione di due o più sistemi di discontinuità (fig. 5) (Tognini & Inglese, 1995). Nel corso della stagione estiva, i mulini di neoformazione aumentano di dimensione, fossilizzando i mulini più a valle, sopravvivendo alla stagione invernale precedente.

Normalmente, ciascun sistema è costituito da 2-3 mulini, difficilmente da più di 4, di cui quello più a valle è generalmente assai poco sviluppato (fig. 2 e 3). A valle di quest'ultimo si osservano talvolta strutture che sembrano suggerire la presenza di «cicatrici» lasciate da preesistenti mulini. Un solo sistema presenta un numero più elevato di cavità (fig. 3) (variabile da 6 a 8) e ciò è probabilmente dovuto ad una sua evoluzione anomala, che verrà chiarita più avanti.

L'osservazione sistematica di queste cavità (come suggerito da Schroeder, 1995) ha permesso una stima delle età e dei tempi di permanenza di tali strutture, tempi in questo caso valutati in circa 6 anni, dal momento in cui si forma un proto-mulino (fig. 5), a quando il mulino, dopo aver raggiunto le sue dimensioni massime in circa 2 anni (fig. 7), viene fossilizzato e privato dell'alimentazione idrica dall'apertura di nuovi inghiottitoi a monte, e si riduce gradualmente di dimensioni fino a scomparire.

L'osservazione di depositi di ghiaccio secondario con una particolare struttura all'interno dei mulini (fig. 9a) fa supporre che nel corso della stagione invernale le cavità vengano completamente allagate dalla risalita della superficie piezometrica, a causa, probabilmente dell'occlusione delle vie di drenaggio alla fronte. L'entità della risalita della superficie piezometrica è ovviamente condizionata dall'equilibrio della pressione idrostatica nell'acquifero con la pressione atmosferica, e pertanto può arrivare ad occupare quasi totalmente le cavità endo-glaciali, in prossimità della superficie. L'allagamento delle strutture e la conseguente formazione di ghiaccio secondario, che può occupare gran parte del volume dei vuoti, è probabilmente il motivo per cui i mulini possono sopravvivere da una stagione all'altra: se private dell'alimentazione idrica, infatti,

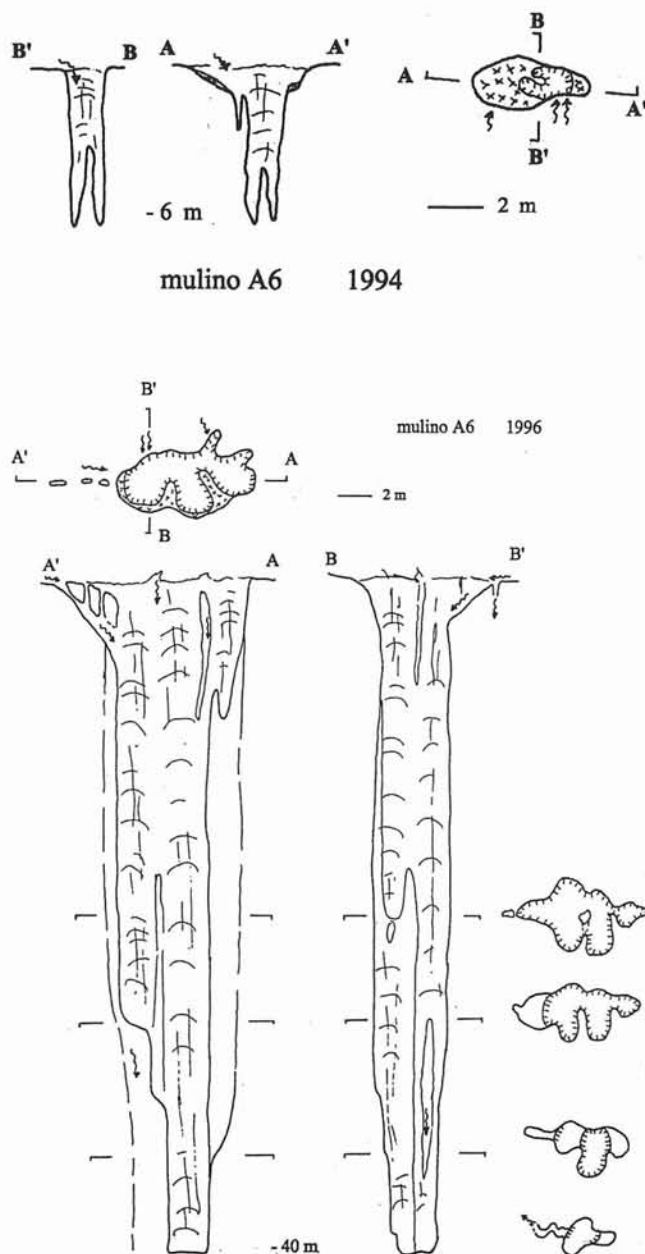


FIG. 8b - Evoluzione del mulino A_6 da una fase di formazione, nel 1994, alla fase di massimo sviluppo nel 1996. L'allagamento del mulino di neoformazione a monte, A_7 , nel 1998 ha fatto sì che in quest'anno il declino di A_6 fosse temporaneamente rallentato (la profondità, infatti, è rimasta invariata).

FIG. 8b - Evolution of A_6 moulin from a formation phase, in 1994, to a climax phase in 1996. The drowning of the neo-formed upstream A_7 moulin temporarily slowed the A_6 decline (so that its depth did not change in 1998).

queste strutture tendono a chiudersi per collasso plastico nel giro di poche settimane (fig. 9a e 9b), tanto più rapidamente quanto più sono profonde (Nye, 1952, 1953; Rothlisberger, 1972; Schroeder, 1991a; 1995; Badino, 1995 a, 1999; Badino & Piccini, 1995; Tognini & Inglese, 1995).

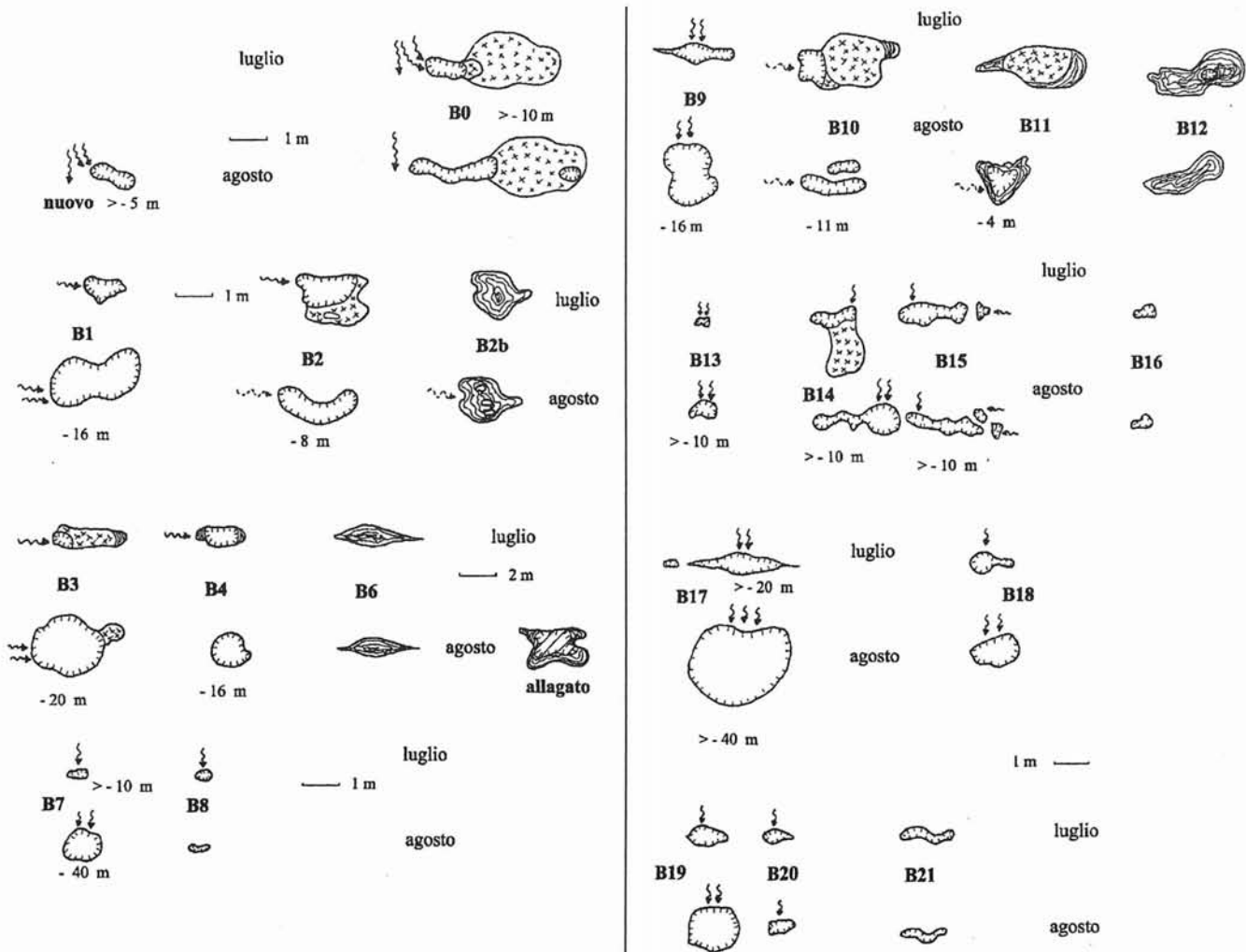


FIG. 9a - Evoluzione dei mulini della zona W nel corso dell'estate 1998. Le osservazioni sono state fatte a fine luglio e a fine agosto. Si noti come i mulini più a monte, i più giovani, di neoformazione, non siano inizialmente in grado di assorbire interamente le portate delle *bédières*, con la conseguenza che anche i mulini più a valle ricevono una discreta alimentazione, che è in grado di riaprire i tappi di neve o di ghiaccio da rigelo eventualmente formati nella stagione invernale. Si osservi però come, con l'aumentare delle portate delle *bédières* nel corso della stagione, si abbia un progressivo aumento delle dimensioni dei mulini più a monte, che finiscono per catturare interamente i corsi d'acqua superficiali. I mulini più a valle vengono quindi fossilizzati, ricevendo eventualmente limitata alimentazione dalla fusione locale, nel loro immediato intorno. Si noti come un solo mese con alimentazione ridotta sia sufficiente a iniziare il collasso delle cavità, tanto più evidente quanto maggior sono le dimensioni. Si noti, infine, come le cavità più a valle di ogni sistema, le più vecchie, rimangano invece pressoché immutate, segno questo di una completa fossilizzazione: la conservazione di queste strutture è dovuta in questo caso soltanto a riempimento da parte di ghiaccio da rigelo.

FIG. 9a - Sinkholes evolution in the W zone during 1998 summer. Surveys were made at the end of July and August. Note that at the beginning of the melting season neo-formed upstream sinkholes are unable to sink the whole *bédière* water flow, so that older downstream sinkholes may be fed with a certain water supply, which is able to melt snow or re-frozen ice fillings eventually formed during winter. Anyway, while *bédières* water flows increase during summer, upstreams sinkholes get larger and larger, thus capturing the whole surface water flow. Downstream moulins are therefore fossilized, and just receive local meltwater. Note that just one month of reduced water supply may start caves collapse, which is the more evident, the larger the dimensions of the caves. Note that the most downstream caves of a system, that is to say the oldest ones, do not exhibit any change, thus showing complete fossilization: the existence of these caves is in this case only due to re-frozen ice filling.

Le modalità di formazione del ghiaccio di riempimento secondario sono al momento ignote, tuttavia è possibile avanzare due ipotesi, che non necessariamente si escludono a vicenda e potrebbero anche essere attive contemporaneamente. L'ipotesi più semplice è che la cristallizzazione delle acque, pressoché immobili a stagione invernale

avanzata, all'interno dei pozzi glaciali si propaghi dalla superficie in profondità, per effetto delle rigide temperature esterne: in questo caso, la presenza di ghiaccio all'interno della cavità sarebbe però limitata ad una profondità relativamente esigua, e con spessori sulle pareti progressivamente decrescenti.

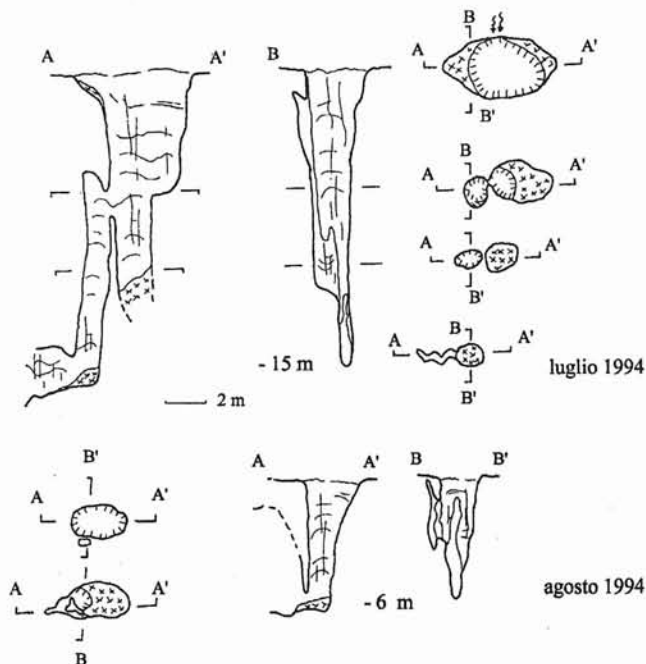


FIG. 9b - Evoluzione del mulino α_6 , nel 1994, a distanza di 3 settimane: la rapida modificazione delle forme e della profondità è probabilmente legata al fatto che la cavità è venuta a trovarsi in prossimità di una zona fortemente crepacciata, cosa che ne ha provocato la scomparsa alla fine della stagione estiva.

FIG. 9b - α_6 moulin evolution during summer 1994, after 3 weeks: the rapid changing of forms and depth is probably due to the fact that the cave was entering an intensely crevassed and jointed zone, which later caused the disappearing of the moulin at the end of 1994 summer.

Recentemente è stata invece avanzata un'ipotesi di grande interesse. Secondo un modello matematico proposto da Badino (1995a, 1999), la risalita di acque endo-glaciali lungo un condotto verticale, a causa della variazione di pressione idrostatica, che influisce sulla temperatura del punto di congelamento, porterebbe alla cristallizzazione di ghiaccio sulle pareti delle condotte. Ciò è compatibile con quanto osservato sul Ghiacciaio dei Forni, dove le strutture radiali di ghiaccio secondario, che occupano totalmente o in parte i mulini, sembrano interessare in profondità l'intera struttura, ricoprendo uniformemente le pareti con spessori che si mantengono costanti per decine di metri di profondità.

In realtà, questo tipo di riempimento è poco conosciuto, sia per quanto riguarda la struttura del ghiaccio, sia la sua distribuzione e i processi che possono averlo originato. I due meccanismi proposti sono soltanto due possibili ipotesi, ma occorrono osservazioni di terreno più dettagliate e approfondite a questo proposito. Sarebbe interessante, per esempio, uno studio sulle modalità di cristallizzazione del ghiaccio nelle due differenti ipotesi, unitamente alla stima numerica delle quantità di ghiaccio che il meccanismo di ascesa di acque profonde può produrre, in

funzione della diminuzione di pressione, che nel caso del Ghiacciaio dei Forni sembra interessare uno spessore di poco superiore ai 40 m (profondità alla quale è stata osservata acqua in lento movimento, ma che non necessariamente coincide con la superficie piezometrica dell'acquifero, o degli acquiferi endo-glaciali).

Il ghiaccio di formazione secondaria può occludere totalmente alcuni mulini (spesso di diametro ragguardevole, fino a 3-4 m), che restano visibili solo per la presenza di queste anomalie nella struttura macroscopica del ghiaccio, o può rivestire solo parzialmente le pareti (fig. 8a e 9a). Spesso si osservano sistemi di fratture che si propagano con continuità dal ghiaccio di ghiacciaio all'interno delle strutture di riempimento secondario, a testimonianza di movimenti del ghiacciaio successivi alla risalita delle acque endo-glaciali e al loro congelamento nei condotti. La struttura di questo tipo di ghiaccio, a grana grossolana, estremamente porosa, con cristalli fibrosi a disposizione radiale, lo rende assai più permeabile del ghiaccio circostante, e quindi soggetto a rapida erosione da parte delle acque di fusione: la presenza di riempimenti di ghiaccio secondario anche in grandi quantità non preclude quindi la ripresa della circolazione idrica nella stagione calda.

La profondità massima dei mulini osservati è circa 40 m. È stata segnalata la presenza, precedentemente al 1994, di un pozzo stimato profondo 80 m (Smiraglia, com. pers.), ma tale cavità non è più stata ritrovata. Curiosamente, le profondità dei pozzi esplorati o sondati (circa una trentina) non mostrano una distribuzione omogenea dei valori. Sembra di osservare essenzialmente tre classi di profondità: intorno a 2-3 m, intorno a 10-15 m e intorno a 35-40 m. A questo proposito, sarebbe interessante un'analisi delle proprietà meccaniche e reologiche del ghiaccio alle varie profondità, per verificare se la distribuzione in classi di profondità dei mulini possa avere una relazione con le caratteristiche del ghiaccio stesso. Naturalmente, i pozzi attivi sono quelli più profondi, e la profondità decresce con il grado di fossilizzazione (vale a dire, con l'età) (fig. 8a). I proto-mulini in via di formazione presentano spesso profondità ragguardevoli (10-20 m) se confrontate con l'esiguità dei diametri (pochi centimetri o decimetri).

I pozzi inattivi si chiudono, in profondità, con stretti meandri impraticabili o tappi di neve, mentre quelli attivi presentano meandri non percorribili a causa della grande quantità d'acqua che vi entra (fig. 8b), e talvolta presentano il fondo allagato; non necessariamente questo indica però la presenza di una zona satura continua, almeno per quanto riguarda il Ghiacciaio dei Forni.

Ostacoli, variazioni, occlusioni delle vie di drenaggio endo-glaciali possono portare alla locale risalita di acque all'interno di una, o più strutture di un sistema anche nel corso della stagione estiva (fig. 8a).

Sul Ghiacciaio dei Forni è abbastanza comune osservare mulini, che risultavano attivi durante la stagione estiva precedente, divenire completamente allagati, con acqua immobile, l'anno successivo, per poi tornare ad essere percorsi da un drenaggio attivo uno o due anni più tardi. Come in numerosi altri ghiacciai in tutto il mondo, sono stati inoltre segnalati (Meneghel & alii, 1995; Smiraglia,

com. pers.) i già citati casi di risalita rapida di acque all'interno di pozzi.

L'allagamento di parte di un sistema di cavità interferisce con il semplice modello evolutivo di fossilizzazione progressiva dei mulini da valle verso monte, portando alla riattivazione di mulini anche in stadi evolutivi avanzati e ritardandone la chiusura per collasso plastico: ciò ha come conseguenza un allungamento dei tempi di sopravvivenza di tali strutture. Questo processo è probabilmente alla base dell'esistenza dei già citati sistemi costituiti da un elevato numero di cavità, che rappresentano un'anomalia (fig. 3 e 8a), poiché raramente i sistemi mostrano più di 3-4 cavità.

Ogni sistema presenta una distanza grossomodo costante tra i mulini che lo costituiscono, distanza che è evidentemente pari allo spostamento annuale del ghiacciaio. Tale distanza varia da 4-5 m a 15-20 m a seconda dei sistemi (fig. 2 e 3): se ne deduce che il ghiacciaio presenta parti a differente velocità, con conseguente formazione di zone sottoposte a forti sollecitazioni di taglio, probabilmente alla base dell'esistenza di sistemi di cavità paralleli ed indipendenti (Eraso & Pulina, 1994; Schroeder, 1995; Tognini & Inglese, 1995; Bini & alii, 1998). In mancanza di misure dirette, quindi, la distanza tra mulini appartenenti allo stesso sistema potrebbe offrire una stima abbastanza attendibile delle velocità di flusso di un ghiacciaio: le prossime campagne di osservazioni sul Ghiacciaio dei Forni saranno volte proprio a verificare questa ipotesi.

Per quanto riguarda la distribuzione areale degli ingressi di cavità, si individuano due zone, rispettivamente a E e a W della morena mediana (fig. 1, 2, 3, e 4), che mostrano caratteristiche differenti per quanto riguarda lo sviluppo geometrico delle cavità.

La zona a W (fig. 2) presenta una topografia superficiale regolare, sub-pianeggiante o debolmente inclinata, interrotta da una serie di rotture di pendenza trasversali, che attraversano la porzione W dalla morena mediana fino alla sponda rocciosa. Vi si osserva una serie di sistemi paralleli (fig. 2), regolarmente allineanti lungo un sistema di foliazioni (nel senso di Paterson, 1994) a direzione 330° N, lo stesso che guida l'andamento delle *bédières* che alimentano i mulini. Tutti gli inghiottitoi si formano all'intersezione della foliazione 330° N con un sistema di fratture ortogonale, a direzione circa 250° N.

Poiché mulini di pari grado evolutivo si trovano allineati alla stessa quota lungo tale direttrice, è facile dedurre che la formazione degli inghiottitoi è legata alla presenza di una soglia allungata trasversalmente alla direzione di flusso del ghiacciaio.

La zona a E della morena mediana, invece, presenta una topografia più complessa (fig. 1 e 3), con sistemi di *bédières* ad andamento non più parallelo, che sembrano convergere verso una depressione centrale. In quest'area sono stati misurati gli spessori di ghiaccio maggiori, superiori a 100 m (Guglielmin & alii, 1995). Curiosamente, però, la profondità massima dei mulini è la stessa nelle

due zone, ed è di poco superiore ai 40 m. È probabile che in questa zona il substrato presenti una soglia ad anfiteatro, o, più probabilmente, un andamento irregolare, con una serie di dossi di cui i gruppi di mulini rappresenterebbero l'espressione superficiale. Qui le distanze tra i mulini risultano più irregolari e più ravvicinate che nella zona W, a dimostrazione dell'esistenza di una topografia più accidentata che determina movimenti e spinte differenziali all'interno del ghiacciaio.

Interessante risulta il confronto della distribuzione dei sistemi di cavità nel corso degli anni (fig. 3).

In particolare, il sistema A della zona a E della morena laterale offre un esempio significativo (fig. 8a e 8b). Nel corso degli anni si sono osservate la scomparsa per collasso plastico di alcuni mulini, la formazione di altri ed è stata seguita l'evoluzione di questi ultimi fino al raggiungimento delle dimensioni massime, seguito da un progressivo declino, fino alla totale scomparsa. Si è anche osservata la completa distruzione delle cavità quando, per effetto della migrazione verso valle, sono entrate nella zona fortemente crepacciata che separa la zona E dei mulini dal piano sottostante (fig. 9b).

CONCLUSIONI

Le osservazioni condotte sui sistemi di cavità endoglaciali del Ghiacciaio dei Forni hanno permesso di confermare ed affinare il modello genetico ed evolutivo proposto dai vari Autori citati, che, in sintesi, si può schematizzare nelle seguenti fasi:

1 - formazione di discontinuità legate alla situazione tensionale del ghiacciaio (connesse con la topografia del substrato e/o con le modalità di flusso del ghiacciaio, e probabilmente con lo spessore del ghiaccio). La concentrazione di sistemi di cavità lungo morene mediane e laterali suggerisce che un ruolo particolarmente importante sia giocato da sforzi di taglio connessi a movimenti differenziali in porzioni diverse del ghiacciaio;

2 - cattura del deflusso sopra-glaciale da parte delle discontinuità (fig. 5), con progressivo allargamento e modellamento degli inghiottitoi, in funzione della quantità e dell'energia, termica e meccanica, delle acque di scorrimento (fig. 6 e 7). La formazione di pozzi sub-circolari o ellittici è favorita dalla presenza di discontinuità a disposizione ortogonale rispetto alla direzione del flusso idrico, mentre discontinuità parallele alla direzione di flusso tendono ad originare forre e pozzi-meandro (di cui si osservano solo rarissimi esempi sul Ghiacciaio dei Forni, ma che sono molto comuni in altri ghiacciai, come, per esempio, al Ghiacciaio del Morteratsch, in Engadina, Svizzera);

3 - allargamento e approfondimento degli inghiottitoi (fig. 7), che raggiungono le massime dimensioni nel giro, in genere, di due anni. Con il progressivo ridursi delle portate idriche inghiottite, la sezione tende ad assumere forma sub-circolare, indipendentemente dalla iniziale di-

sposizione delle discontinuità che originano i mulini. Ciò è presumibilmente dovuto ad una tendenza del ghiaccio al raggiungimento di una ripartizione uniforme e simmetrica degli sforzi nell'intorno e sulla superficie interna della cavità. Naturalmente, ciò può avvenire solo in zone del ghiacciaio non sottoposte a sforzi di taglio dinamici, legati a movimenti differenziali all'interno della massa di ghiaccio. Questo implica che la formazione di mulini avvenga in compartimenti a velocità di flusso uniforme, separate da zone di taglio lungo le quali si realizzano variazioni di velocità, zone che agiscono come barriere, tensionali e di permeabilità, alla propagazione di cavità endo-glaciali. Queste ultime assumono così le caratteristiche di sistemi acquiferi compartimentati ed indipendenti;

4 - dopo circa due anni (a volte anche un solo anno, nelle zone a velocità di flusso più elevata), la migrazione verso valle delle strutture le allontana in modo significativo dal punto di origine rispetto al substrato, dove nuove discontinuità provocano la formazione di un proto-mulino. Si osserva che all'inizio della stagione estiva i mulini dell'anno precedente sono ancora discretamente attivi (fig. 9a), mentre il proto-mulino in formazione ha ancora un'apertura insufficiente a drenare la totalità delle portate delle *bédières* che alimentano il sistema. L'alimentazione dei vecchi mulini viene successivamente ridotta dal progressivo allargamento del nuovo mulino più a monte, fino a quando quest'ultimo non è in grado di assorbire interamente le portate che lo alimentano. A questo punto il mulino dell'anno precedente diviene quasi completamente fossile: il tratto di *bédière* compreso tra questo e il più giovane a monte diviene così una «valle secca» e il vecchio mulino risulta alimentato solo dalle acque di fusione locale provenienti dalla zona immediatamente circostante. Naturalmente, se la distanza tra il vecchio e il nuovo inghiottitoio è elevata, e/o l'ablazione importante, l'alimentazione locale può anche essere cospicua, assicurando la sopravvivenza del vecchio mulino per almeno una stagione in più;

5 - si è osservato che, dopo la fase di accrescimento, in media le strutture permangono di grandi dimensioni e attive per 1-2 anni, dopo di che inizia la fase di declino, con progressiva riduzione delle dimensioni, sia in profondità che in diametro. La scomparsa di un mulino fossile avviene in teoria per collasso plastico delle pareti, al termine del quale il mulino dovrebbe scomparire senza lasciare alcuna traccia nel ghiaccio stesso: unici indizi della precedente esistenza di cavità endo-glaciali potrebbero venire dalla presenza di sedimenti a disposizione particolare all'interno del ghiaccio. Non sempre la scomparsa di cavità endo-glaciali è così lineare: la progressiva migrazione verso valle del ghiacciaio e delle strutture in esso contenute, infatti, è ben lontana dall'essere una semplice traslazione a corpo rigido, in cui le cavità sono sottoposte solo alla uniforme pressione idrostatica del ghiaccio. Spesso intervengono movimenti differenziali del ghiacciaio che provocano una distorsione delle forme, fino ad un possibile

smembramento per fratturazione al raggiungimento, per esempio, di zone fortemente crepacciate, come sta attualmente accadendo (anni 1999-2000), per esempio, nella zona Est.

Da queste brevi osservazioni preliminari, appare evidente come l'osservazione dei sistemi di cavità sia di notevole interesse per la comprensione della circolazione idrica endo-glaciale, e possa fornire interessanti informazioni circa la dinamica dei flussi glaciali. Queste strutture, a lungo trascurate e considerate come una mera curiosità morfologica, meritano quindi studi più accurati ed integrati in un contesto di analisi della dinamica e della idrologia glaciale.

BIBLIOGRAFIA

- BADINO G. (1995a) - *Phenomenology and first numerical simulations of the phreatic drainage network inside glaciers*. Proc. 3rd Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Chamonix, 1994, Ann. Litt. Univ. Besançon 561, Ser. Géographie, 34, 47-54.
- BADINO G. (1995b) - *L'estrema Thule: penultimo o ultimo limite della speleologia?* Speleologia 32, 27-32.
- BADINO G. (1999) - *Il carsismo glaciale*. Le Scienze, 372, Agosto 1999, 44-51.
- BADINO G. & PICCINI L. (1995) - *Aspetti morfologici ed evolutivi delle cavità endoglaciali di origine criocarsica*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 18, 225-228.
- BINI A., TOGNINI P. & ZUCCOLI L. (1998) - *Rapport entre karst et glaciers durant les glaciations dans les vallées préalpines du Sud des Alpes*. Karstologia, 32, 7-26.
- CELI M. (1995) - *Esperienze speleologiche e scientifiche nel Ghiacciaio dei Forni*. Speleologia Veneta, 3, 35-36.
- ERASO A. & PULINA M. (1994) - *Cuevas en hielo y rios bajo los glaciares*. Mc Graw-Hill, Madrid, 242 pp.
- GUGLIELMIN M., NARDO A. & SMIRAGLIA C. (1995) - *Lo spessore dei ghiacciai della Valfurva: misurazioni tramite sondaggi elettrici verticali*. Neve e valanghe - AINEVA, 24, 58-67.
- MAVLYUDOV B.R. (1995) - *Problems of en- and sub-glacial drainage origin*. Proc. 3rd Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Chamonix, 1994, Ann. Litt. Univ. Besançon 561, Ser. Géographie, 34, 77-82.
- MAVLYUDOV B.R. (1999) - *Glacier caves origin*. Proc. 4th Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Salzburg, 1996, 123-130.
- MENEGHEL M., CELI M. & BONDESAN A. (1998) - *The moulins of the Forni Glacier (Italian Alps)*. Proc. 4th Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Salzburg, 1996, 47-54.
- MONTERIN U. & SOMIGLIANA C. (1930) - *Sulla costanza di posizione dei pozzi glaciali*. Boll. Com. Glac. It., 10, ser. 1, 211-225.
- NYE J.F. (1952) - *The mechanics of glacier flow*. Journ. Glaciol. 2, 82-93.
- NYE J.F. (1953) - *The flow law of ice*. Proc. of the Royal Society, A, 219, 1139.

- PATERSON W.S.B. (1994) - *The Physics of Glaciers*. Pergamon, London, 480 pp.
- REYNAUD L. & MOREAU L. (1995) - *Moulins glaciaires des glaciers tempérés et froids de 1986 à 1994 (Mer de Glace et Groënland) - Morphologie et techniques de mesures de la déformation de la glace*. Proc. 3rd Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Chamonix, 1994, Ann. Litt. Univ. Besançon 561, Ser. Géographie, 34, 109-113.
- ROBIN G. (1974) - *Depth of water-filled crevasses that are closely spaced*. Journ. Glac., 13, 543.
- RÖTHLISBERGER H. (1972) - *Water pressure in intra- and subglacial channels*. Journ. Glac., 11, 177-203.
- RÖTHLISBERGER H. & LANG H. (1987) - *Glacial hydrology*. In: Gurnell A.M. & Clark M.J. (eds), *Glacio-fluvial sediment transfer*. Wiley, New York, 207-284.
- SCHROEDER J. (1991a) - *Les cavités du Hansbreen creusées par les eaux de fonte, Svalbard, 77° lat. N. 992*. Proc. 1st Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Madrid, 1991, 21-33.
- SCHROEDER J. (1991b) - *Dossier: la spéléologie glaciaire. Une nouvelle spéléologie?* Spéléo, 4 (Spécial Spéléoglacière), 3-6.
- SCHROEDER J. (1991c) - *Comprendre le glacier*. Spéléo, 4 (Spécial Spéléoglacière), 7-8.
- SCHROEDER J. (1995) - *Les Moulins du glacier Hans de 1988 à 1992*. Proc. 3rd Int. Symp. on Glacier Caves and Cryokarst in Polar and High Mountain Regions, Chamonix, 1994, Ann. Litt. Univ. Besançon 561, Ser. Géographie, 34, 31-39.
- SHREVE L. (1972) - *Movement of water in glacier*. Journ. Glac., 11, 205-214.
- TOGNINI P. & INGLESSE M. (1995) - *Speleologia glaciale: un piccolo contributo all'esplorazione dei ghiacciai alpini*. Il Grottesco 52, Boll. Gruppo Grotte Milano CAI-SEM, 30-46.
- UGGERI A. & CORVI M. (1995) - *Nel Ghiacciaio dei Forni (Alta Valtellina)*. Poligrotta, Boll. Gruppo Speleol. CAI Varese, 3, 109-111.
- WENGER R. (1994) - *Exploration des moulins glaciaires de la Mer de Glace (Chamonix, France) et du Gornergletscher (Zermatt, Ch)*. Cavernes (Neuchatel), 2, 3-11.