

PERMAFROST E FORME PERIGLACIALI NELLE NORTHERN FOOTHILLS (BAIA TERRANOVA, TERRA VITTORIA SETTENTRIONALE, ANTARTIDE)

Mauro Guglielmin¹, Hung M. French² & Francesco Dramis³

¹PRNA, Via G. Matteotti, 22, 20035 Lissone (MI), Italia

²Department of Geography and Earth Sciences, University of Ottawa, Ottawa, Ontario K1N 6N5, Canada

³Dipartimento di Scienze Geologiche, Università "Roma Tre", Largo S. Leonardo Murialdo, 1, 00146 Roma, Italia

RIASSUNTO

Permafrost e forme periglaciali nelle Northern Foothills (Baia Terranova, Terra Vittoria Settentrionale, Antartide) - Le forme periglaciali presenti nel territorio di Baia Terra Nova sono rappresentate essenzialmente da poligoni, fessure da gelo (*frost fissures*) e coni di iniezione (*injection cones*). I poligoni, sviluppati su i terreni del Younger Drift, sono caratterizzati dalla presenza di cunei di ghiaia e sabbia (*gravel and sand wedges*) mentre su i terreni riferibili all'Older Drift sono stati rinvenuti cunei e vene di ghiaccio (*ice wedges and veins*). La contrazione termica responsabile della formazione di ambedue i tipi di cunei risulta attiva anche nelle attuali condizioni climatiche. I coni di iniezione sono comunemente associati a laghi perennemente gelati e vengono interpretati come forme dovute all'iniezione di acqua nel permafrost, così come accade in Artico per la genesi dei pingo e dei ghiacciamenti superficiali (*icings*). Notevole importanza per la dinamica morfologica dell'area riveste il numero di cicli di gelo e disgelo che si alternano nel terreno. L'azione del crioclastismo (*frost shattering*) non è però molto diffusa ed anche il fenomeno di fessurazione per gelo (*frost wedging*) nel substrato roccioso è limitato all'azione di espansione delle discontinuità naturali preesistenti.

ABSTRACT

Permafrost and frozen phenomena of the Northern Foothills (Terranova Bay, Northern Victoria Land, Antarctica) - *Permafrost-related landforms in the Terra Nova Bay territory are mainly polygons, frost fissures, and injection cones. The polygons developed on Younger Drift are characterized by gravelly-sandy filling while those affecting Older Drift show the occurrence of ice wedges and veins. Thermal contraction responsible for the genesis of both landforms shows to be active at present. Injection cones are commonly associated to perennially frozen lakes. They are interpreted as landforms due to the injection of water into the permafrost as it happens for the genesis of pingos and seasonal icings in the Arctic. A relevant role in the morphodynamic context of the area is that played by the high number of freezing/thawing cycles in the ground. However, frost shattering is not widespread and even frost-wedging in the bedrock is only restricted to the expansion of the pre-existing natural discontinuities.*

Parole chiave: permafrost, poligoni da fessure da gelo, coni di iniezione, cunei di ghiaccio, Antartide.

Keywords: permafrost, frost fissure polygons, injection cones, ice wedges, Antarctica.

1. INTRODUZIONE

Il Progetto Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), avviato nel 1985, ha affrontato essenzialmente nelle sue prime fasi di svolgimento temi legati al glacialismo e all'evoluzione delle spiagge oloceniche; solo a partire dal 1996 è stato approvato un progetto focalizzato sulla distribuzione del permafrost e sul suo regime termico nel territorio di Baia Terranova (Terra Vittoria Settentrionale), sede della Base Scientifica Italiana in Antartide.

Questo territorio è contraddistinto da una alta percentuale di aree deglacciate, una tra più elevate del continente antartico, se si eccettuano le Dry Valleys e la Penisola Antartica. I valori della temperatura media mensile variano tra -1,5 °C in Gennaio e -22,5 °C in Agosto; la temperatura media annua è di -14,7 °C (nel periodo 1987-1994). I venti dominanti provengono dai quadranti occidentali con velocità che spesso superano i 17 nodi (Baroni, 1996); le precipitazioni a carattere interamente nevoso vengono stimate attorno i 270 mm/anno (Piccardi *et al.*, 1994).

Nei mesi di novembre e dicembre 1998 è stata

svolta, in collaborazione con l'Università di Ottawa, una campagna di ricerche morfologiche avente come obiettivo principale lo studio della geomorfologia periglaciale nelle Northern Foothills, in prossimità della Base Italiana (Fig.1).

Nel presente lavoro vengono illustrati i primi risultati delle indagini suddette con particolare riguardo alle forme generate nell'area da processi criogenici connessi con la presenza di permafrost continuo.

2. IL PERMAFROST A BAIA TERRANOVA

Si definisce permafrost un qualsiasi materiale che rimane congelato per almeno due anni consecutivi (Muller, 1959) indipendentemente dalla sua natura e dal contenuto o meno di ghiaccio al suo interno.

Nell'area in esame sono presenti diversi tipi di permafrost:

- depositi glaciali sovrastanti corpi di ghiaccio relitto massivo (Simpson Crags; Boulder Clay Glacier);
- depositi glaciali rimaneggiati da soli/geliflusso sovrastanti il substrato roccioso;

- substrato roccioso ricoperto da uno strato sottile e discontinuo di depositi glaciali e ubicato a quote superiori a quelle dell'Ultimo Massimo Glaciale (350-400 m s.l.m.);
- substrato roccioso ubicato a quote più basse di tale limite;
- cordoni morenici olocenici e *rock glaciers*;
- spiagge oloceniche sollevate isostaticamente.

A partire dal 1996 è in funzione nell'area una stazione automatica di monitoraggio del regime termico del permafrost (Guglielmin & Dramis, 1998). La stazione, ubicata sul Boulder Clay Glacier, alla quota di 205 m s.l.m., circa 5 km a sud della Base di Baia Terra Nova, registra i valori orari, della radiazione solare incidente, della temperatura dell'aria a 4 m di altezza sul terreno e della temperatura del suolo a sei diverse profondità. I primi due sensori sono posti a 2 e 30 cm di profondità all'interno di un *till* di ablazione, il terzo è posto a -60 cm, immediatamente al di sotto del limite superiore del ghiaccio massivo che caratterizza il sottosuolo dell'area. I rimanenti tre (posti rispettivamente a -160, -260 e -360 cm) sono ubicati all'interno del ghiaccio, del quale è stata determinata la diffusività termica pari a $0,106 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}^2$. In base a questo valore la profondità della minima variazione termica annua (*Zero Annual Amplitude - ZAA*) risulta ubicata a circa -11 m, con una temperatura di -15°C .

3. REGIME TERMICO DELLO STRATO ATTIVO

Lo strato attivo è per definizione la porzione più

superficiale del permafrost, interessata da periodici scongelamenti stagionali e ne rappresenta quindi la parte termicamente più dinamica e più efficace sotto l'aspetto morfogenetico. Il regime termico dello strato attivo è infatti importante per la genesi e l'evoluzione di diverse forme direttamente legate al permafrost oltre che di alcune forme dovute a meccanismi di gelificazione.

Nell'area in esame lo spessore dello strato attivo è piuttosto esiguo, essendo in genere compreso tra i 15 e i 20 cm anche se localmente, specie nelle spiagge oloceniche e sui pendii settentrionali più ripidi con roccia affiorante, si ritiene che possa arrivare sino ad 1 m o poco più.

In particolare l'andamento del regime termico di Boulder Clay Glacier è mostrato in Fig. 2, mentre i valori massimi, minimi e medi delle temperature registrate nel 1996-97 alle diverse profondità sono illustrati in Tab. 1a.

Notevole importanza per la dinamica morfologica del permafrost riveste il numero di cicli di gelo e disgelo che si alternano nel terreno. In Tab. 1b è illustrato l'andamento giornaliero dei cicli alla profondità di 2 cm, calcolati rispettivamente per un punto di congelamento pari a 0, -2 e $-4 \text{ } ^\circ\text{C}$ (valori legati alla presenza di elevati tenori salini nella neve e nel suolo). Come è possibile osservare nella tabella il numero di cicli di gelo e disgelo registrati risulta rilevante e maggiore di quanto misurato nella maggior parte degli ambienti periglaciali (French, 1996). L'azione del crioclastismo (*frost shattering*) non è però molto diffusa ed anche il fenomeno di fessurazione per gelo (*frost wedging*) nel substrato roccioso è limitato all'azione di espansione delle discontinuità naturali preesistenti.

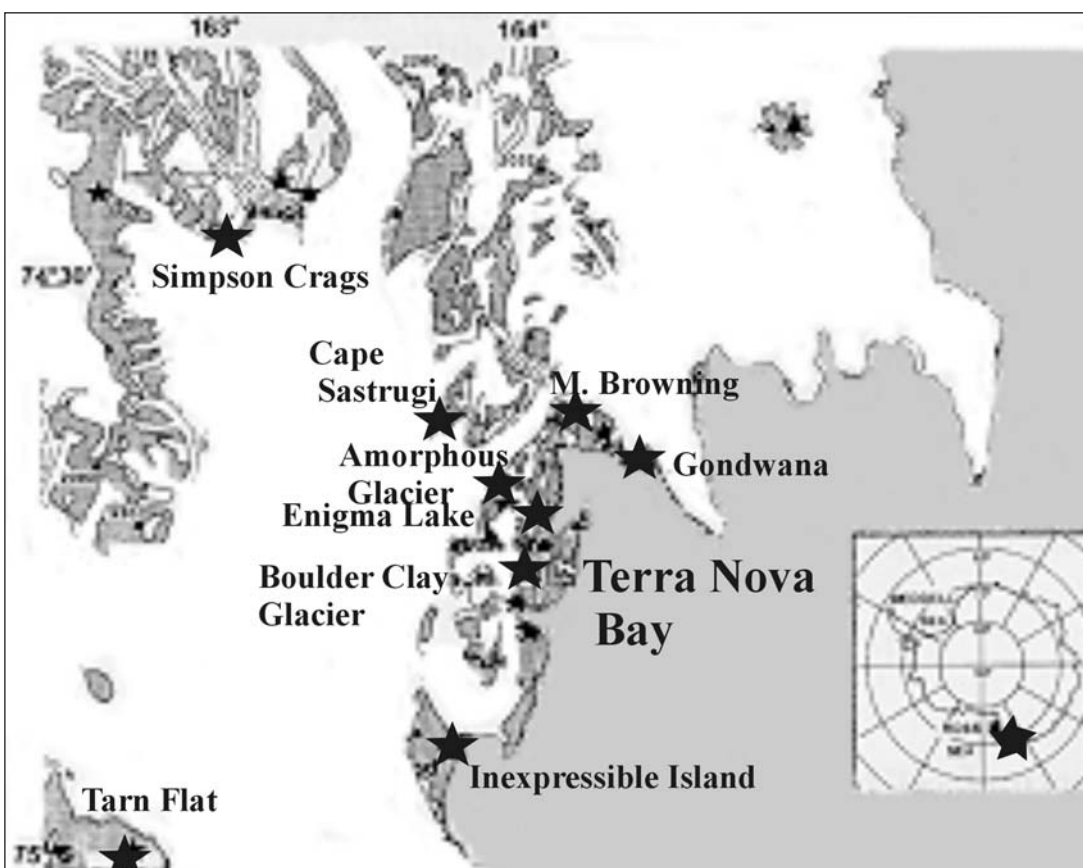
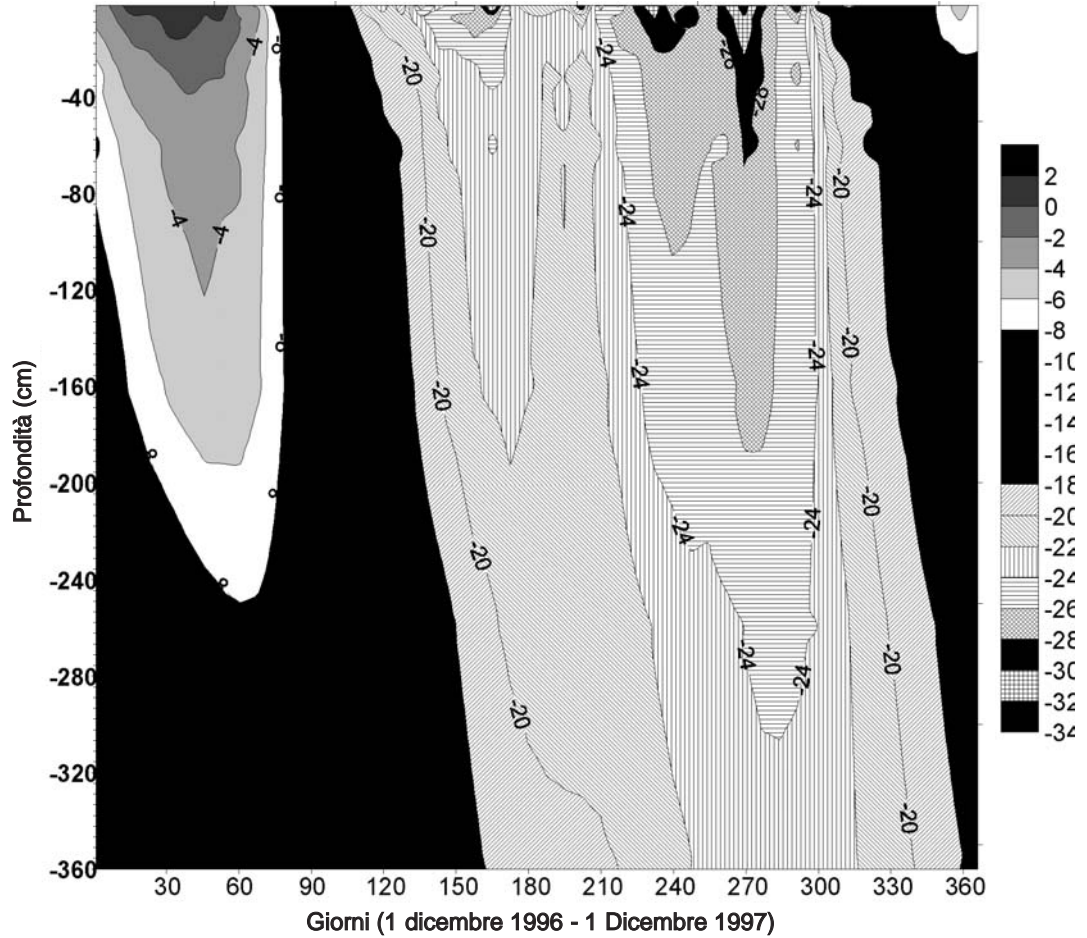


Fig. 1 - Ubicazione delle forme investigate: suoli strutturati (stelle nere) e cunei di iniezione (triangoli neri) a Northern Foothills e vicino alla base italiana di Baia Terra Nova, Antartide.

Locations of the investigated landforms: patterned grounds (black stars) and frost heaved mounds (black triangles) of the Northern Foothills and near Terra Nova Bay Station, Antarctica.

Fig. 2 - Regime termico del permafrost presso la stazione di monitoraggio di Boulder Clay Glacier del periodo 1996-97 (da Guglielmin & Dramis, 1998).

Ground temperature regime at Boulder Clay Glacier permafrost monitoring station, 1996-97 (from Guglielmin & Dramis, 1998).



Tab. 1 - Temperature del terreno registrate dal 1 dicembre 1996 al 7 novembre 1997 alla stazione di monitoraggio di Boulder Clay Glacier. Ground temperatures recorded at Boulderclay Glacier monitoring site, December 1, 1996 - November 7, 1997.

1a) Valori massimi, minimi e medi (°C).

1a) Maximum, minimum and average temperatures (°C).

	T °C -360 cm	T °C -260 cm	T °C -160 cm	T °C -60 cm	T °C -30 cm	T °C -2 cm	T °C aria
Massimo	-10,2	-8,3	-4,4	-2,4	-1,1	10,7	5,4
Minimo	-23,7	-24,9	-27,7	-29	-30,2	-35,3	-38
Media	-17,45	-17,28	-17,08	-16,98	-16,83	-16,9	-16,06

1b) Frequenza giornaliera delle oscillazioni termiche attraverso le temperature di 0 °C, -2 °C e -4 °C, usando i valori medi orari: totale > 0°C = 42; >-2°C = 100; > -4°C = 97.

1b) Number of daily occurrences per day of ground temperature cycles passing 0 °C, -2 °C, and -4 °C, using hourly data: total > 0 °C = 42; >-2 °C = 100; > -4 °C = 97

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Dic. '96																															
>0°C	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0	3	0	0	2	1	1	0	0	0	0	3	1	1
>-2°C	1	1	2	2	0	0	3	0	0	5	0	0	1	2	1	2	1	2	3	1	1	2	0	2	2	2	3	1	4	1	2
>-4°C	2	1	1	0	3	1	1	1	2	0	4	3	1	0	2	2	2	2	1	1	1	2	0	0	0	1	1	0	0	0	
Gen. '97																															
>0°C	4	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
>-2°C	0	3	1	1	1	3	2	0	2	2	2	0	3	2	2	4	3	1	0	2	1	3	2	0	0	0	1	0	0	0	
>-4°C	0	0	0	0	1	1	1	2	1	0	3	2	1	0	0	1	1	1	2	1	1	2	3	4	2	1	2	0	1	1	
Feb. '97																															
>0°C	0	0	0	0	0																										
>-2°C	0	0	0	0	0																										
>-4°C	1	0	0	1	1																										
Nov. '97																															
>0°C							0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	2	0	0	0	2	1	0	0	0	0	
>-2°C							0		0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	2	0	0	0	3	0	1	0	0	0	
>-4°C							2		2	1	3	1	0	1	2	1	2	1	0	0	0	3	1	1	0	0	2	0	0	0	

4. POLIGONI DI FESSURE DA GELO

Una delle forme più diffuse nelle aree deglaciata delle Northern Foothills è quella dei suoli strutturati poligonali (*non sorted polygons*). Queste forme, già descritte nella letteratura precedente (Péwé, 1959; Black & Berg, 1966, Black 1973; Bondesan *et al.*, 1997*), interessano sia i depositi glaciali dello Younger Drift (sovrastanti ghiaccio morto), sia i depositi glaciali dell'Older Drift (sovrapposti al basamento roccioso), sia le spiagge oloceniche. I poligoni sono caratterizzati da diametri di 15-20 m e da solchi perimetrali di larghezza compresa tra 1 e 2 m e profondità media di 0,5 m.

Bisogna inoltre sottolineare come non siano in realtà visibili fessure aperte sulla superficie ma solamente allineamenti preferenziali di massi e ciottoli. La rete generata da questi poligoni è essenzialmente di due tipi: random-ortogonale ed esagonale. Talora sono stati osservati anche pattern diversi di tipo rettilineo come quello di Simpson Crags, che sembra essere controllato dalla presenza sottostante di crepacci nel ghiaccio morto massivo. Lo stesso tipo di pattern rettilineo è stato osservato anche presso Capo Sastrugi, dove sono visibili numerose fessure, con una spaziatura regolare tra gli 8 e i 12 m, e ortogonali rispetto alla direzione di elongazione della dorsale rocciosa. Con ogni probabilità il pattern delle fessure è in questo caso influenzato dall'assetto strutturale delle fratture nel substrato roccioso uno dei cui set principali presenta una direzione coincidente con quella prevalente delle fessure stesse.

In tutte le sezioni eseguite la parte più superficiale delle fessure risulta riempita da ghiaia e ciottoli con struttura *openwork*. I clasti risultano nettamente iso-orientati secondo la direzione delle fessure e spesso verticalizzati.

Da un punto di vista dinamico è da ritenere che queste forme siano attive anche ai giorni nostri per diverse ragioni. Una evidenza dell'attività della fessurazione da gelo (*frost cracking*) durante la stagione invernale è rappresentata dall'osservazione (con l'ausilio di una sonda metallica) di fessure aperte in profondità (fino oltre 80 cm presso Simpson Crags e fino a 15 cm presso M. Browning). Un'altra testimonianza della contemporaneità del processo di fessurazione è data dal ritrovamento della prosecuzione delle fessure attraverso corpi di ghiaccio di rigelo stagionale (Simpson Crags).

La maggior parte dei poligoni osservati non presenta cunei di ghiaccio al di sotto dei solchi mostrando invece cunei di ghiaia e sabbia a sezione triangolare, con larghezza compresa tra 0,5 e 1 m e di analoga profondità. I sedimenti suddetti hanno la stessa composizione litologica dei depositi circostanti anche se, in generale, con un'arricchimento nella frazione sabbiosa.

La presenza di cunei di ghiaccio è stata riscontrata solamente sul M. Browning, alla quota di 720 m s.l.m., su un *till* di ablazione sovrastante il substrato roccioso. In questa località sono presenti poligoni poco sviluppati e delineati solamente da piccoli solchi con ciottoli allineati e verticalizzati.

In base al colore della matrice del *till* (5YR 5/6; 2.5 YR 5/6) e tenuto conto dell'assenza di clasti di vulcaniti provenienti dal M. Melbourne, si ritiene che questo deposito sia da riferire al "Older Drift" definito da Orbelli *et al.* (1991). I cunei di ghiaccio sono in genere abbastanza sottili (10-15 cm di larghezza) e si esten-

dono per 30-50 cm al di sotto della tavola del permafrost; anche in questo caso sono presenti nello strato attivo sovrastante cunei di ghiaia e sabbia (Fig. 3).

5. DISCUSSIONE

Dalle osservazioni fatte appare chiaro come la maggior parte dei poligoni presenti nel territorio delle Northern Foothills sia soggetto a processi di fessurazione tuttora attivi ma che l'accrescimento dei cunei sia alquanto limitato come testimoniato dall'esiguità dei "rampart" laterali (20-30 cm di altezza) e dalle ridotte dimensioni dei cunei stessi (1 m al massimo di profondità e larghezza). Tali dimensioni sono nettamente inferiori a quelle medie note in Artico (6-10 m di profondità e 2-3 m di larghezza). Bisogna inoltre sottolineare come gli unici e modesti cunei di ghiaccio rinvenuti presso M. Browning non esprimano morfologicamente veri e propri poligoni e siano circoscritti al di sopra di *till* più antichi suggerendo così condizioni genetiche relativamente più



Fig. 3 - Cuneo di ghiaccio ritrovato all'interno del Older Drift a M. Browning. Si noti la forte alterazione del suolo nella parte inferiore della trincea.

Ice wedge found in Older Drift at Mt. Browning. Note the high grade of soil alteration in the lower part of the trench.

umide di quelle attuali. I poligoni osservati sono per la maggior parte attivi, con cunei costituiti da sabbia e ghiaia, e si rinvengono in tutti i tipi di terreno (specialmente nei *drift* più recenti e nei depositi di spiaggia). Essi sono a luoghi contraddistinti da profili convessi e da *ramparts* laterali poco accentuati che non sembrano riflettere un processo di "upthrusting" quanto piuttosto una forma di accumulo connessa con l'espansione termica dello strato attivo (Mackay, 1980). Questo processo di espansione e il relativo movimento laterale del materiale secondo direttrici radiali rispetto al centro del poligono si producono quando esistono rilevanti variazioni termiche nel terreno (anche rimanendo al di sotto di 0 °C). Tale fatto è dimostrato dai dati rilevati nella stazione di Boulder Clay dove si registrano temperature del suolo anche di 10 °C maggiori di quelle dell'aria e variazioni termiche anche superiori all'interno della medesima giornata. Per quantificare l'entità del movimento in gioco basta ricordare che Mackay (1980) nella regione del Mackenzie Delta in Canada ha misurato movimenti di circa 0.25 cm/anno: considerando che la temperatura dell'aria e del suolo sono certamente più basse nell'area in esame, si può ragionevolmente ritenere che l'entità del movimento sia qui sensibilmente inferiore.

In generale appare chiaro che, sotto l'aspetto tipologico, i poligoni osservati non sono riferibili a cunei di ghiaccio ma non risultano neppure riferibili ai tipici cunei di sabbia (*sand wedges*) quali quelli descritti da Carter (1983) e Murton & French (1993) nell'Artico nordamericano. Infatti il riempimento delle fessure non risulta mai costituito dalla sola frazione sabbiosa ma in prevalenza da ghiaie con sabbia e ciottoli in cui si è avuto certamente un arricchimento di sabbia per trasporto eolico.

Terminologicamente si preferisce però non utilizzare il termine proposto da Péwé (1959) "tesselations" (mosaici) in quanto non esprime chiaramente né i processi morfogenetici né le caratteristiche sedimentologiche dei cunei e si propone quindi di utilizzare il termine "poligoni di fessure da gelo" (*frost fissure polygons*) per

enfaticizzare soprattutto il processo che genera la fessurazione e non la tipologia del riempimento. Bisogna inoltre sottolineare come i piccoli cunei di ghiaccio ritrovati nell'Older Drift del M. Browning sono i primi realmente documentati in Antartide in quanto né nei lavori di Black né in quelli di Péwé è possibile vedere sezioni riferibili a questa tipologia.

Si vuole sottolineare infine che i poligoni di fessure da gelo sono forme tipicamente connesse al permafrost indipendentemente dalla tipologia del substrato e quindi non attribuibili ad altri processi connessi con la dinamica glaciale. Data la discontinuità nel tempo del processo di fessurazione, tali poligoni non possono essere utilizzati per la datazione relativa dei terreni su cui sono sviluppati, ma il loro monitoraggio risulta di grande interesse in quanto connesso con le variazioni di bilancio energetico della superficie e quindi con le variazioni climatiche.

6. CONI DI INIEZIONE

Nell'area in esame sono stati da tempo stati riconosciuti numerosi accumuli detritici di forma conica a base circolare o ellittica, di altezza compresa tra i 2 e 4 m (eccezionalmente fino ai 8-10 m), costituiti per lo più da ghiaia, ciottoli e blocchi con scarsa matrice in superficie e talora contraddistinti (nella parte più superficiale) dalla presenza di mirabilite (Chinn *et al.*, 1989). Molti degli accumuli sono ubicati in prossimità o nel mezzo di laghi perennemente congelati (Fig. 4). Questi elementi morfologici sono stati considerati in letteratura come forme di ablazione differenziale associate a ghiacciai ricoperti o a ghiaccio morto (Chinn *et al.*, 1989; Orombelli *et al.*, 1991; Lozej *et al.*, 1992).

Quattro accumuli conici sono stati analizzati nella zona di Boulder Clay Glacier, attorno alla stazione di monitoraggio del permafrost: due ad Enigma Lake, uno sull'Amorphous Glacier e uno a Tarn Flat. Caratteristica comune a tutti i coni osservati in prossimità o in corri-



Fig. 4 - Cono di iniezione all'interno del lago localizzato presso la stazione di Boulder Clay Glacier. Si noti anche il doming del ghiaccio lacustre.

The frost-heaved mounds of the pond near the Boulder Clay Glacier station. Note the doming of the ice surface of the lake.

spondenza di laghi gelati è la minore alterazione superficiale del deposito rispetto al *drift* circostante. Tale differenza di alterazione è particolarmente evidente nel caso di Amorphous Glacier e Tarn Flat. Proprio nel caso di Tarn Flat (Fig. 5) è possibile osservare come il fondale dei laghi completamente drenati appaia meno alterato degli affioramenti circostanti analogamente a quanto avviene per la superficie del cono.

Sulle superfici gelate dei laghi di Boulder Clay, Enigma Lake ed Inexpressible Island sono state osservate anche forme di doming sempre accompagnate da fessurazioni radiali. Tali feno-

meni sono del tutto simili a quelle riscontrate nei blister da ghiacciamento superficiale (*icing blisters*) in molte località del Artico canadese e che si formano nella stagione invernale e primaverile. Si ricordano, a titolo esemplificativo, gli esempi di Churchill, Manitoba nel maggio 1981 (French & Gilbert, 1982), dello Yukon centrale nel marzo 1982 (Pollard & French, 1984) e della parte centrale dell'isola di Banks nell'aprile 1979 (French, 1996).

7. IL CASO DI ENIGMA LAKE

Enigma Lake è stato oggetto di numerose e dettagliate indagini geofisiche (Lozej *et al.*, 1992; 1994) e di indagini geomorfologiche e glaciologiche (Chinn *et al.*, 1989; Lozej *et al.*, 1992) in quanto presenta la peculiarità di avere nella sua parte centrale una sottile copertura glaciale e due coni detritici, dei quali il maggiore raggiunge i 5 m di altezza ed il minore di circa 2 m. Chinn *et al.*, (1989) hanno ipotizzato che tale forma rappresenti la parte visibile di un corpo glaciale risalente al Ross Sea Drift e presente nella depressione prima della formazione del lago. Del tutto simile è la spiegazione di Lozej *et al.* (1992) secondo i quali il ghiaccio lacustre avrebbe circondato e in parte sepolto un corpo glaciale relitto. Dalle osservazioni effettuate durante il mese di novembre 1998 è stato tuttavia possibile osservare come siano presenti non solo alcune zone di *doming* con numerose fratture radiali ma anche una rilevante quantità di acqua liquida in superficie ed in tasche al di sotto della superficie. E' stata inoltre rilevata la presenza di ghiaccio di rigelo, di tipo non colonnare, intruso all'interno del ghiaccio lacustre circostante a dimostrazione dell'esistenza di processi di iniezione idrostatica. In questo contesto appare utile ricordare che gli stessi Autori hanno già rilevato l'esistenza di un emissario verso la Tethys Bay e che la presenza di acqua superficiale e di variazioni areali del bacino lacustre sono documentate anche dall'analisi di fotografie aeree dalle quali risulta circa il 5% di aumento di area nella porzione settentrionale nel 1985 rispetto al 1956 (Orombelli, 1990). Alla luce di queste evidenze è possibile rielaborare i dati prodotti nel corso degli anni dagli Autori precedenti seguendo una diversa ipotesi genetica. Utili risultano in particolare le analisi del contenuto in trizio riportate in Chinn *et al.* (1989) che evidenziano la presenza a circa 3 m di profondità di un orizzonte riferibile al periodo postnucleare (1954-1963) interposto

tra ghiaccio prenucleare con un valore isotopico di 23 T.U. La presenza di un valore così elevato significa senza dubbio che acqua recente si è intrusa in ghiaccio più antico e che questa si è congelata durante la stagione invernale (mantenendo così un valore isotopico più basso di quello attuale).

Per tutte le considerazioni sopra esposte si ritiene più semplice spiegare la formazione dei coni detritici come prodotti del medesimo processo che genera il *doming* nei laghi. La formazione di ghiaccio di iniezione generato dalla presenza di acqua allo stato liquido, congelando nei mesi invernali, può esercitare una pressione idrostatica tale sia da creare il *doming*, che da rialzare il letto del lago (sul quale è presente uno strato di sedimenti dello spessore di 30-50 cm), dando così origine ai coni detritici stessi.

Nelle zone artiche, forme analoghe vengono distinte in perenni (come i *pingo*) e stagionali, note in generale come "*seasonal frost mounds*" (Porsild, 1938; Mackay, 1979), entrambe connesse con il processo di iniezione di ghiaccio generato dal rigelo di acque sotterranee circolanti. Talvolta però le forme perenni mostrano sui fianchi la formazione di forme stagionali (Porsild, 1938) come, per altro verso, alcune forme stagionali (*blister* da ghiacciamento) possono riprodursi per diversi anni nel medesimo sito (Van Everdingen, 1978; Pollard & French, 1985). Si ritiene che nel caso delle forme individuate nelle Northern Foothills si tratti di forme originate stagionalmente ma di durata perenne dal momento che non vengano smantellate con il disgelo durante la stagione estiva.

Di rilevante interesse paleoclimatico ed ambientale sarebbe capire se questi episodi di crescita stagionali siano continui oppure discontinui e corrispondenti a stagioni estive particolarmente od eccezionalmente calde tali da generare la quantità di acqua circolante necessa-



Fig. 5 - Il cono di iniezione di Tarn Flat. Si noti la differenza di alterazione tra il materiale costituente il cono e la circostante copertura detritica.

The frost-heaved mound of Tarn Flat. Note the different weathering of the rocks that composed the mounds and the surrounding debris cover.

ria all'iniezione del ghiaccio durante il successivo inverno. Proprio per questo motivo come indicato da Overpeck et al. (1998) si potrebbe utilizzare il monitoraggio di queste forme per evidenziare eventuali cambiamenti climatici globali.

RINGRAZIAMENTI

La presente ricerca è stata svolta all'interno del progetto 2a.1.3. del PRNA (Progetto Nazionale di Ricerca in Antartide). Si ringraziano i responsabili dell'organizzazione e della logistica della Base Italiana di Baia Terra Nova ed i piloti della New Zealand Helicopters. Un particolare ringraziamento a Luigi Bonetti per l'aiuto sostanziale nella realizzazione delle sezioni criostatigrafiche e delle perforazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Baroni C., 1996 - *Antarctic geomorphological and glaciological 1:250,000 map series. Mount Melbourne Quadrangle (Victoria Land)*. PNRA. Museo Nazionale dell'Antartide Siena, Italy.
- Black R.F., 1973 - *Growth of patterned ground in Victoria Land, Antarctica*. In: Permafrost; North American Contribution, Second Int. Permafrost Conf., Yakutsk, USSR, Washington D.C., National Academy of Science, Publ. 2115, 193-203.
- Black R.F. & Berg T.E., 1966 - *Patterned ground in Antarctica*. Proceed. First Int. Permafrost Conf., National Academy of Sciences, National Research Council of Canada, Publ. 1287, 121-127.
- Bondesan A., Meneghel M., Salvatore M.C. & Stenni B., 1997 - *Non sorted polygons in the Terra Nova Bay area (Victoria Land)*. In: Antarctic Region: Geological Evolution and Processes, Ricci C.A. Ed., Terra Antartica Publ., Siena, 957-963.
- Carter L.D., 1983 - *Fossil sand wedges on the Alaskan Arctic Coastal plain and their palaeoenvironmental significance*. Proceed. Fourth Int. Permafrost Conf., National Academy Press, Washington D.C., 109-114.
- Chinn T.J., Whitehouse I.E. & Hofle H.C., 1989 - *Report on a reconnaissance of the glaciers of Terranova Bay area*. Geol. Jb., Ser. E, **38**, 299-319.
- French H.M., 1996 - *The periglacial environment, 2nd Ed.* Longman Ltd., 341 pp.
- French H.M. & Gilbert R., 1982 - *Periglacial phenomena near Churchill, Manitoba*. Can. Nat., **109**, 433-444.
- Guglielmin M. & Dramis F., 1998 - *Permafrost as a climatic indicator in Northern Victoria Land (Antarctica)*. Proceed. Seventh Int. Permafrost Conf., Yellowknife, N.W.T., Canada, Vol. 1, 147-148.
- Lozej A., Tabacco I., Meneghel M., Orombelli G., Smiraglia C. & Longinelli A., 1992 - *Radio-echo soundings of Enigma Lake (Northern Foothills, Victoria Land, Antarctica)*. Mem. Soc. Geol. It., **46**, 103-115.
- Mackay J.R., 1979 - *An equilibrium model for hummocks (non-sorted circles), Garry Island, Northwest Territories*. Geological Survey of Canada, Paper 79-1 A, 165-167.
- Mackay J.R., 1980 - *The origin of hummocks, western Arctic coast*. Can. J. Earth Sci., **17**, 996-1006.
- Müller F., 1959 - *Beobachtung über pingos*. Meddelelser om Gronland, **153** (3), 127 pp.
- Murton J.B. & French H.M., 1993 - *Sand wedges and permafrost history, Crumbling Point, Pleistocene Mackenzie Delta, Canada*. Proceed. Sixth Int. Permafrost Conf., Vol. 1, Beijing Science Press, 482-487.
- Orombelli G., 1990 - *Glaciers and glacial morphology at Terra Nova Bay: an opportunity for significant studies on environmental and climatic global changes*. Mem. Soc. Geol. It., **46**, 9-16.
- Orombelli G., Baroni C. & Denton G.H., 1991 - *Late Cenozoic glacial history of the Terra Nova Bay region, northern Victoria Land, Antarctica*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **13**, 139-163.
- Overpeck J., Hughen K., Hardy D., Bradley R., Case R., Douglas M., Finney B., Gajewski K., Facoby G., Jennings A., Lamoureaux S., Lasca A., MacDonald G., Moore J., Retelle M., Smith S., Wolfe A. & Zielinski G., 1997 - *Arctic environmental change of the last four centuries*. Science, **278**, 1251-1256.
- Péwé T.L., 1959 - *Sand wedge polygons (tesselations) in the McMurdo Sound region, Antarctica*. Am. J. Sci., **257**, 545-552.
- Piccardi G., Udisti R. & Casella F., 1994 - *Seasonal trends and chemical composition of snow at Terra Nova Bay (Antarctica)*. Int. J. Envir. Anal. Chem., **55**, 219-234.
- Pollard W.H. & French H.M., 1984 - *The groundwater hydraulics of seasonal frost mounds, Northern Yukon*. Can. J. Earth Sci., **21**, 1073-1081.
- Pollard W.H. & French H.M., 1985 - *The internal structure and ice crystallography of seasonal frost mounds*. J. Glaciol., **31**, 157-162.
- Porsild A.E., 1938 - *Earth mounds in unglaciated Arctic northwestern America*. Geogr. Rev., **28**, 46-58.
- Van Everdingen R.O., 1978 - *Frost mounds at Bear Rock near Fort Norman, N.W.T. 1975-1976*. Can. J. Earth Sci., **15**, 263-276.

Ms. ricevuto il 21 agosto 2002
 Testo definitivo ricevuto il 28 gennaio 2003

Ms. received: August 21, 2002
 Final text received: January 28, 2003