

ROBERTO SEPPI <sup>(1)</sup>, ALBERTO CARTON <sup>(2)</sup>, MATTEO DALL'AMICO <sup>(3)</sup>,  
RICCARDO RIGON <sup>(4)</sup>, GIORGIO ZAMPEDRI <sup>(5)</sup> & MATTEO ZUMIANI <sup>(6)</sup>

## OSSERVAZIONI E STUDI SUL PERMAFROST IN TRENTINO: IL PROGETTO PERMANET

ABSTRACT - SEPPI R., CARTON A., DALL'AMICO M., RIGON R., ZAMPEDRI G. & ZUMIANI M., 2011 - Observations and studies on permafrost in Trentino: the project PermaNET.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 261, 2011, ser. IX, vol. I, B: 95-117.

This paper presents the studies on permafrost in Trentino and the key results of the PermaNET project (Permafrost Long-term Monitoring Network). A rock glacier inventory, a statistical model and a permafrost distribution map have been completed, and numerous monitoring activities were initiated. Among these, ground surface temperature measurements are in progress and measurements of the surface displacement of two active rock glacier were continued. Two sites were also equipped to measure the underground temperature and the external climatic parameters, in order to evaluate the permafrost thermal condition in relation to climate change. The cooperation to the project has significantly improved the knowledge of this important feature of the Alpine environment of Trentino.

KEY WORDS - Permafrost, Monitoring activities, Alps, Trentino.

RIASSUNTO - SEPPI R., CARTON A., DALL'AMICO M., RIGON R., ZAMPEDRI G. & ZUMIANI M., 2011 - Osservazioni e studi sul permafrost in Trentino: il progetto PermaNET.

Nell'articolo sono presentate le attività di ricerca svolte sul permafrost in Trentino e i principali risultati del progetto PermaNET (Permafrost Long-term Monitoring

---

<sup>(1)</sup> Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente - Università di Pavia; roberto.seppi@unipv.it.

<sup>(2)</sup> Dipartimento di Geografia «G. Morandini» - Università di Padova.

<sup>(3)</sup> Mountain-eering s.r.l., Via Siemens 19, Bolzano.

<sup>(4)</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università di Trento.

<sup>(5)</sup> Provincia Autonoma di Trento - Servizio Geologico.

<sup>(6)</sup> Geologo, Piazza S. Leonardo, Tenno (TN).

Network). Sono stati realizzati un catasto dei rock glacier e una carta dell'indice di diffusione del permafrost derivata da un nuovo modello statistico della sua localizzazione. Inoltre, sono state avviate numerose attività di monitoraggio: tra queste, sono in corso misure di temperatura della superficie del suolo e sono proseguite misure topografiche per quantificare lo spostamento di due rock glacier attivi. Sono stati inoltre attrezzati due siti per la misura della temperatura del sottosuolo e dei parametri climatici esterni, allo scopo di valutare la condizione termica del permafrost in funzione dei cambiamenti climatici. La collaborazione al progetto ha consentito di migliorare considerevolmente la conoscenza di questo importante aspetto dell'ambiente alpino del Trentino.

PAROLE CHIAVE - Permafrost, Attività di monitoraggio, Alpi, Trentino.

## 1. INTRODUZIONE: LA CRIOSFERA E IL PERMAFROST

La criosfera terrestre è composta da tutta l'acqua allo stato solido presente sul nostro pianeta. I ghiacciai sono i principali e più noti elementi della criosfera, ma anche il permafrost, pur meno visibile e conosciuto, ne costituisce un importante componente. Il permafrost, definito come un qualsiasi terreno (minerale, organico o roccioso) che rimane a temperature inferiori a 0°C per almeno 2 anni consecutivi (VAN EVERDINGEN, 1998), caratterizza soprattutto le regioni polari ma è molto diffuso anche sulle Alpi. Si stima che il 23-25% circa dei territori dell'emisfero Nord della Terra ne siano attualmente interessati (Fig. 1), con spessori che vanno da pochi decimetri a più di mille metri, come in alcune zone della Siberia o dell'Alaska (FRENCH, 2007).

Il permafrost si può formare dove il bilancio energetico della superficie del suolo è negativo ed è il risultato di una complessa interazione tra le condizioni climatiche, topografiche e le caratteristiche litologiche del substrato. I principali fattori climatici che determinano la formazione del permafrost sono la temperatura dell'aria e la radiazione solare, ma ha un ruolo di fondamentale importanza anche la presenza del manto nevoso. In genere, il terreno interessato da permafrost contiene ghiaccio, che può essere mescolato alla componente minerale o aggregato in lenti e ammassi di varie dimensioni. Se il permafrost interessa un ammasso roccioso, l'acqua presente nelle fratture è perennemente congelata.

Durante la stagione calda, lo strato superficiale di un terreno interessato da permafrost raggiunge temperature superiori a 0°C e l'acqua in esso contenuta può scongelare. Tale strato è denominato «strato attivo» e in esso, durante la breve fase stagionale di scongelamento, possono svolgersi i cicli biologici della fauna e della vegetazione. Anche i pro-

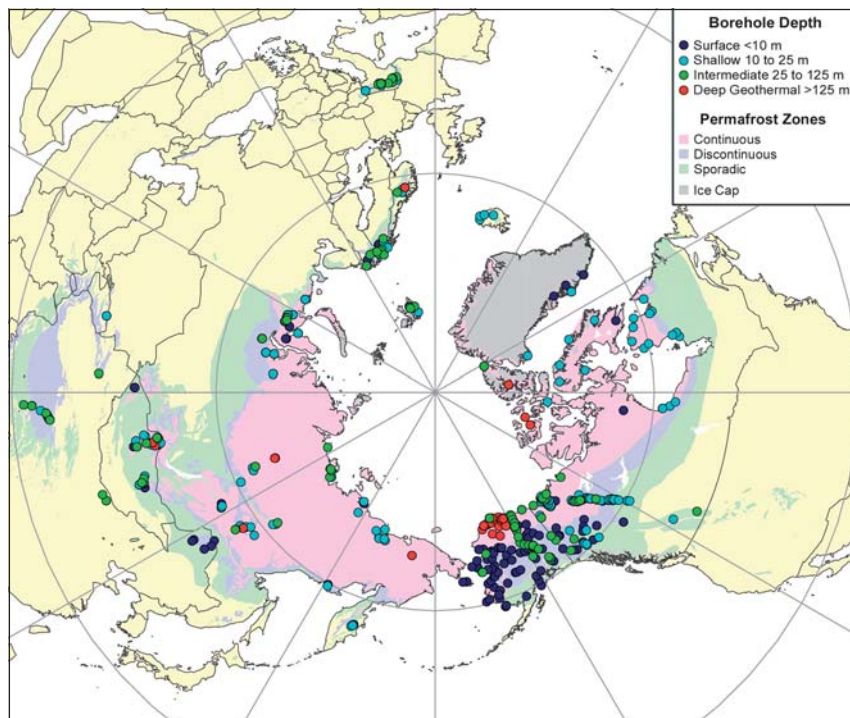


Fig. 1 - Carta della distribuzione del permafrost nell'emisfero settentrionale. I punti indicano i fori per la misura della temperatura del sottosuolo che fanno parte della rete globale «Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P)». Fonte: [www.gtnp.org/index\\_e.html](http://www.gtnp.org/index_e.html).

cessi morfogenetici e la genesi della maggior parte delle forme del paesaggio periglaciale si attuano nello strato attivo. Il suo spessore cambia di anno in anno in relazione alla variazione dei fattori climatici, ma generalmente è compreso tra pochi centimetri e alcuni metri.

A differenza delle alte latitudini, sulle Alpi il permafrost è distribuito in modo discontinuo. Negli ambienti alpini, infatti, la variabilità spaziale dei fattori microclimatici e topografici è estremamente elevata ed è quindi frequente riscontrare, anche alla stessa quota, aree con permafrost confinanti con altre dove esso non è presente (Fig. 2). Poiché la sua esistenza dipende innanzitutto dalla temperatura dell'aria e dall'esposizione del versante, è diffuso soprattutto sui versanti esposti a Nord, dove il suo limite inferiore raggiunge quote meno elevate rispetto ai versanti esposti a Sud. La presenza di permafrost nelle Alpi, tuttavia, è fortemente condizionata dall'entità delle precipitazioni nevose e dall'evoluzione annuale del manto nevoso al suolo (LUETSCHG *et al.*, 2008).



Fig. 2 - Esempio di un ambiente alpino caratterizzato dalla presenza di permafrost. Negli ambienti di questo tipo la variabilità spaziale dei fattori microclimatici e topografici è estremamente elevata.

Anche il colore della roccia può influire in modo determinante; tale aspetto va preso in particolare considerazione nella regione trentina in tutti quegli ambiti in cui, a causa della ben nota eteropia di facies che caratterizza gran parte dei rilievi del comparto orientale, affiorano rocce con cromatismo spiccatamente diverso. In generale, il permafrost può essere relativamente diffuso al di sopra dei 2300-2500 m, ma localmente può raggiungere quote di alcune centinaia di metri inferiori. Lo spessore massimo del permafrost nelle Alpi non è noto, ma alcune perforazioni in roccia profonde più di 100 m non hanno raggiunto la sua base (HARRIS *et al.*, 2003).

## 2. PERMAFROST E CAMBIAMENTO CLIMATICO

Analogamente agli altri componenti della criosfera terrestre, anche il permafrost è sottoposto a importanti cambiamenti dovuti al riscaldamento climatico, le cui conseguenze si risentono a diverse scale temporali. A scala annuale, temperature mediamente più elevate possono cau-

sare un aumento dello spessore dello strato attivo e la fusione degli strati e delle lenti di ghiaccio più superficiali. A scala da decennale a secolare si verificano perturbazioni nel profilo termico profondo del permafrost. Infine, a scala da secolare a millenaria si può ridurre il suo spessore complessivo, fino alla completa scomparsa (HAEBERLI & BENISTON, 1998). Un generale riscaldamento del permafrost è stato osservato dall'analisi del profilo termico del suolo soprattutto alle elevate latitudini (ISAKSEN *et al.*, 2007), mentre sulle Alpi i dati delle perforazioni profonde mostrano un'evoluzione contraddittoria, ancora una volta legata alle condizioni topografiche e microclimatiche locali (HARRIS *et al.*, 2003; HARRIS & ISAKSEN, 2008; HARRIS *et al.*, 2009).

Le variazioni termiche del permafrost costituiscono uno dei principali indicatori dei cambiamenti climatici, soprattutto su medie e lunghe scale temporali. Da questo punto di vista, nel più recente rapporto IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) sui cambiamenti climatici il permafrost è considerato come un sensore naturale della variabilità climatica e un'espressione visibile dei cambiamenti climatici (LEMKE, 2007).

Le conseguenze del riscaldamento e della degradazione del permafrost possono essere molto importanti. Nelle regioni artiche, ad esempio, la sua scomparsa dalle zone costiere sta causando un'accelerata erosione delle linee di costa, mentre non è ancora chiaro quale sia il contributo della sua fusione nell'emissione in atmosfera di rilevanti quantità di metano (un importante gas serra) dai fondali dei laghi (WALTER *et al.*, 2006).

Per quanto riguarda le Alpi, tra le principali conseguenze della degradazione del permafrost c'è senz'altro l'accentuato rischio di frane, smottamenti e fenomeni di instabilità dei versanti che possono interessare le aree antropizzate e le infrastrutture di alta quota (impianti di risalita, rifugi alpini, viabilità, ecc.). Il permafrost ha infatti un ruolo preminente nella stabilizzazione di molti versanti di alta quota, dove agisce come un «collante» nelle fratture della roccia, e per questo motivo, la sua degradazione sta causando in tutte le Alpi l'intensificazione dei fenomeni di dissesto (GRUBER & HAEBERLI, 2007; ALLEN *et al.*, 2009). L'aumento dell'instabilità legata all'innalzamento della temperatura dei versanti rocciosi con discontinuità (fratture) riempite di ghiaccio è stato messo in evidenza anche da esperimenti di laboratorio (DAVIES *et al.*, 2001); numerosi sono infatti gli esempi di grandi frane in roccia, verificatesi in alta quota, messe in relazione con la degradazione del permafrost e l'evoluzione dello strato attivo (PIRULLI, 2009; RAVANEL & DELINE, 2011) (Fig. 3). Una conseguenza importante e ancora poco cono-





Fig. 3 - La nicchia di distacco della frana in roccia che ha interessato il versante Sud-Est della Cima Thurwieser (Gruppo Ortles Cevedale) il 18 settembre 2004.

sciuta è legata alla modificazione della circolazione idrica e della qualità delle acque presenti nelle aree alpine soggette alla degradazione del permafrost.

### 3. I PRINCIPALI METODI DI STUDIO DEL PERMAFROST

Il permafrost non è direttamente osservabile e la sua individuazione, spesso problematica, si basa su metodi e tecniche che ne segnalano la presenza in modo indiretto. Tra questi, molti utilizzano le proprietà geofisiche dei terreni caratterizzati da permafrost, che possono essere anche molto diverse da quelle dove esso non è presente. I metodi geofisici attualmente più applicati sono quelli geoelettrici, elettromagnetici, sismici e radar. Con essi è possibile indagare numerose caratteristiche del sottosuolo, come ad esempio lo spessore dello strato attivo e del permafrost o la presenza di corpi di ghiaccio massivo (HAUCK & KNEISEL, 2008; KNEISEL *et al.*, 2008). Si tratta nella maggior parte dei casi di metodi che implicano l'uso di strumentazione sofisticata e che hanno notevoli complicazioni logistiche per l'utilizzo in alta quota.

Esistono tecniche indirette più semplici, basate sulla misurazione della temperatura della superficie del suolo in determinati momenti dell'anno e sull'analisi del suo andamento nel corso dell'anno. Mediante queste indagini, le indicazioni sulla presenza di permafrost possono essere ottenute dall'analisi della temperatura del suolo nei mesi tardo-invernali, quando è presente un manto nevoso di sufficiente spessore. La neve, infatti, ha un forte potere isolante e se è presente al suolo con uno spessore di almeno 1 m tende a disaccoppiare gli scambi termici con l'atmosfera. In queste condizioni, la temperatura misurata al contatto tra neve e suolo dipende dallo stato termico del sottosuolo e non dalla temperatura dell'atmosfera. Nel periodo tardo-invernale, il terreno raggiunge una fase di stabilità termica denominata «temperatura di equilibrio invernale» che, se fa registrare valori inferiori a  $-3^{\circ}\text{C}$ , indica la probabile presenza di permafrost. Se esso non è presente, si registrano temperature più elevate, vicine a  $0^{\circ}\text{C}$ . Queste misure possono essere effettuate occasionalmente (a fine inverno), utilizzando una sonda termometrica di lunghezza tale da penetrare tutto lo spessore del manto nevoso (metodo BTS - Bottom Temperature of the winter Snow cover; HAE-BERLI, 1973) (Fig. 4). È possibile anche utilizzare sensori termometrici autonomi collegati a data logger in grado di registrare e memorizzare la temperatura del suolo per lunghi periodi di tempo (HOELZLE *et al.*, 1999) (Fig. 5).

Altri metodi di indagine sono utilizzati per studiare le forme del paesaggio legate alla presenza di permafrost (soprattutto i rock glacier). Tra questi, strumenti topografici (stazioni totali, GPS, Laserscanner) e strumenti remoti come immagini aeree e riprese satellitari (KÄÄB, 2008).

Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo tecnologico degli strumenti di calcolo e all'utilizzo delle teorie statistico-numeriche nelle scienze ambientali, lo studio del permafrost ha ricevuto considerevoli contributi anche dalla modellazione statistico/matematica. In generale, la modellazione del permafrost può essere suddivisa in due settori:

- 1) modellazione della localizzazione del permafrost, volta a determinare le aree dove il terreno, ad una certa profondità, è caratterizzato da permafrost. Tale modalità si avvale di strumenti statistici a scala regionale o nazionale e usa come dati di validazione le evidenze indirette dell'esistenza del permafrost quali la presenza dei rock glacier o le misure di temperatura della superficie del suolo (KELLER, 1992; STOCKER-MITTAZ *et al.*, 2002, BOECKLI *et al.*, 2011);
- 2) modellazione dell'evoluzione del permafrost, volta ad analizzare il comportamento del profilo termico sulla base delle forzanti meteorologiche reali o ipotetiche secondo scenari di cambiamento clima-



Fig. 4 - Misure BTS effettuate nell'area di Cima Uomo (Dolomiti) con una sonda termometrica appositamente progettata. Il manto nevoso supera i 2 m di spessore.



Fig. 5 - Data logger dotato di sonda termometrica esterna per la misura della temperatura della superficie del suolo durante il corso dell'anno.



tico. Tale modalità utilizza modelli matematico-numeric, solitamente a scala locale, e si pone l'obiettivo di calibrare i parametri termici attraverso misure di temperatura profonda rilevati nel sito (RISEBOROUGH *et al.*, 2008; ZHANG *et al.*, 2008).

La modellazione del permafrost è caratterizzata da alcune problematiche scientifiche che la rendono ancora soggetta a cautela nell'interpretazione dei risultati. In particolare, l'elevata eterogeneità della topografia e delle caratteristiche del terreno richiede un'adeguata caratterizzazione del sito e dei parametri termici. Questo sottende l'utilizzo di modelli fisicamente basati, quale ad es. GEOtop (RIGON *et al.*, 2006), che permettono di parametrizzare l'elevata eterogeneità ambientale. Inoltre, il manto nevoso determina un disaccoppiamento termico tra suolo e atmosfera, per cui è opportuno utilizzare un modello che tenga in considerazione la neve e il suo spessore (ZANOTTI *et al.*, 2004). Inoltre, la modellazione dello strato attivo richiede un modello che consideri il cambiamento di fase acqua-ghiaccio nel terreno, che rappresenta una considerevole fonte di calore latente (DALL'AMICO *et al.*, 2011). Infine, il modello deve utilizzare appropriate condizioni iniziali e queste, a grande profondità, sono difficilmente stimabili in quanto dipendono dal calore geotermico, dalla presenza di acqua e dai parametri termici.

La presenza di permafrost nei territori alpini può essere indirettamente rivelata da varie forme del terreno, tra le quali i rock glacier. Si tratta di corpi geologici costituiti da materiale detritico di varie dimensioni (dalla sabbia fine ai massi di molti metri) frammisto a ghiaccio che si formano in condizioni di permafrost (HAEBERLI *et al.*, 2006). Si originano a seguito della deformazione del materiale congelato e si muovono verso valle con velocità che vanno da pochi centimetri ad alcuni metri all'anno. La loro superficie, spesso molto accidentata, ricorda una colata di lava ed è generalmente coperta da massi di grandi dimensioni (Fig. 6). Possono raggiungere lunghezze di molte centinaia di metri e spessori di alcune decine. La distribuzione dei rock glacier negli ambienti alpini viene spesso utilizzata come indicatore indiretto della presenza di permafrost e per la realizzazione di cartografie della sua diffusione.

La prova certa della presenza di permafrost in una certa area si ottiene soltanto misurando per alcuni anni consecutivi la temperatura del sottosuolo in fori perforati in roccia o sedimenti. Raramente, inoltre, si possono osservare evidenze dirette come l'affioramento di materiale congelato o di corpi di ghiaccio sepolti in corrispondenza di scarpate di erosione o di frana.



Fig. 6 - Un rock glacier attivo situato sul versante orientale del Monte Vioz. Sulla superficie sono evidenti le particolari strutture che ricordano una colata di lava.

#### 4. LE RICERCHE SUL PERMAFROST IN TRENTINO

Le osservazioni sulla presenza e la diffusione del permafrost nelle aree alpine del Trentino sono relativamente recenti e hanno avuto un considerevole impulso dalla collaborazione al progetto Alpine Space PermaNET (Permafrost Long-term Monitoring Network), che si è svolto tra il 2008 e il 2011.

Precedentemente al progetto PermaNET, le indagini si erano prevalentemente concentrate sul censimento e la caratterizzazione dei rock glacier di regioni montuose come l'Adamello Presanella e alcuni settori del Gruppo Ortles Cevedale. In questo contesto, sono state svolte varie ricerche, confluite anche in alcune tesi di laurea (GARDINI, 2005; ZUMIANI, 2007; VIVIANI, 2009) e di dottorato (SEPPI, 2006; DALL'AMICO, 2010). I risultati delle ricerche sono stati inoltre pubblicati su riviste scientifiche italiane e internazionali (BARONI *et al.*, 2004; SEPPI *et al.*, 2005; 2010). In alcuni siti di particolare rilevanza sono state svolte misure della temperatura di sorgenti considerate in relazione con il permafrost e misure di temperatura della superficie del suolo con il metodo BTS e utilizzando data logger. Un monitoraggio di particolare interesse riguarda le misure di spostamento di due rock glacier attivi situati nel Gruppo della Presanella, effettuate mediante rilievi topografici di precisione con

teodolite laser. Il monitoraggio, effettuato annualmente dal 2001 e tuttora in corso, ha consentito di avere la più lunga serie italiana di misure di questo tipo (SEPPI *et al.*, 2006; 2009).

#### 4.1. Il progetto PermaNET: le attività svolte in Trentino

Il progetto PermaNET aveva lo scopo di studiare il permafrost alpino e la sua degradazione in conseguenza dei cambiamenti climatici. Si è trattato di un progetto europeo che ha coinvolto tutte le regioni alpine e che, per la prima volta, ha messo in contatto studiosi ed esperti di tutte le nazioni che comprendono settori dell'arco alpino. Gli obiettivi principali del progetto erano: sviluppare una rete di monitoraggio del permafrost per tutta la regione alpina; creare una base comune di dati sulle caratteristiche del permafrost; realizzare un modello matematico e una carta della sua distribuzione spaziale; contribuire alla mitigazione dei rischi naturali connessi all'impatto dei cambiamenti climatici sul permafrost mediante l'elaborazione di una strategia comune. Il progetto ha coinvolto 14 partner tra enti di ricerca ed enti pubblici territoriali appartenenti ad Austria, Francia, Germania, Italia, Svizzera, sotto la guida, in qualità di leader, dell'Ufficio Geologia e Prove Materiali della Provincia autonoma di Bolzano.

In Trentino è stato coinvolto come partner del progetto il Servizio Geologico della Provincia autonoma di Trento, che si è avvalso della collaborazione scientifica delle università di Padova, Pavia e Trento e di professionisti del settore. Il progetto, che ha avuto inizio nel 2008 e si è concluso nel settembre del 2011, ha dato un considerevole impulso alle attività di ricerca e monitoraggio del permafrost in Trentino, contribuendo a definire un quadro preciso della sua distribuzione e delle sue caratteristiche.

Nel contesto del progetto: 1) è stato compilato un catasto completo dei rock glacier del Trentino, 2) è stata realizzata una carta della distribuzione del permafrost, 3) sono state avviate alcune attività di monitoraggio in aree selezionate, 4) sono proseguite le misure topografiche del movimento superficiale di due rock glacier attivi iniziate nel 2001, 5) sono state allestite due stazioni di misura a lungo termine della temperatura del sottosuolo (DALL'AMICO *et al.*, 2010). I siti scelti per le indagini sono situati nelle principali aree montuose del Trentino (Fig. 7).

##### 4.1.1. Catasto dei rock glacier del Trentino

Uno degli obiettivi del progetto PermaNET era quello di realizzare un database delle evidenze di permafrost per tutte le Alpi. Il database



Fig. 7 - Siti di indagine scelti nell'ambito del progetto PermaNET.

ha accolto, con procedure e modalità comuni, i dati di tutti i partner del progetto e, tra le principali evidenze della presenza di permafrost, include anche i rock glacier (CREMONESE *et al.*, 2011). In questo ambito, quindi, anche in Trentino è stato realizzato un catasto completo dei rock glacier, che comprende sia le forme intatte (contenenti attualmente permafrost e in molti casi dotate di movimento) sia quelle relitte (che non contengono attualmente permafrost ma che si sono conservate sul terreno come unità morfologiche). Il catasto è stato realizzato in ambiente GIS e le caratteristiche di ciascun rock glacier sono descritte da una serie di parametri significativi.

In Trentino sono stati censiti in totale 705 rock glacier, il 25% dei quali sono stati classificati come intatti, i rimanenti come relitti (Fig. 8). Sono distribuiti prevalentemente nei gruppi montuosi dell'Ortles Cevedale e del Lagorai, dove sono presenti quasi esclusivamente forme relitte. L'area totale dei rock glacier in Trentino ammonta a circa 33 km<sup>2</sup> (1,4% circa dell'area totale della provincia situata sopra i 1600 m di quota) ed è confrontabile con quella coperta dai ghiacciai (circa 38 km<sup>2</sup>).

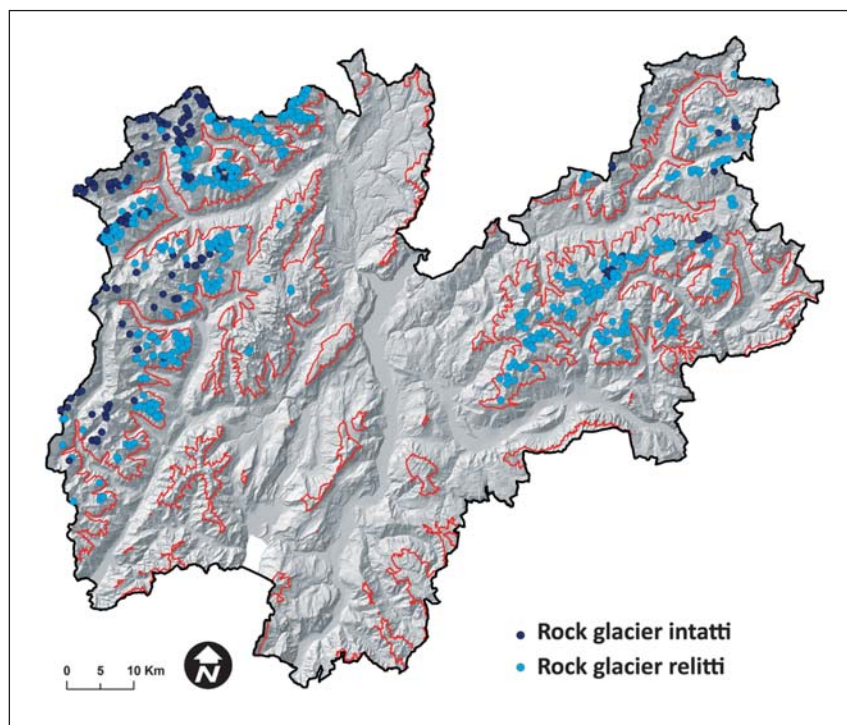


Fig. 8 - Distribuzione dei rock glacier intatti e relitti in Trentino. La linea rossa indica l'isoipsa di quota 1600 m.

Questo dato sottolinea l'importanza di queste forme nell'ambiente periglaciale del Trentino.

#### 4.1.2. Carta del permafrost del Trentino

La carta di distribuzione del permafrost in Trentino è stata sviluppata in collaborazione con il Dipartimento di Geografia Fisica dell'Università di Zurigo (Dr. Stephan Gruber e Lorenz Boeckli), secondo il metodo APMOD (BOECKLI *et al.*, 2011). Esso include due sotto-modelli: il modello «detrito», adatto alle aree di terreno coperte da detrito superficiale, ed il modello «roccia», preparato per le pareti rocciose ad elevata pendenza. Il modello statistico utilizza come regressori la temperatura media annua dell'aria, la radiazione potenziale in arrivo e la precipitazione media annuale. La mappa (Fig. 9) riporta un indice qualitativo della probabilità di presenza di permafrost, accoppiato ad una legenda per facilitarne la lettura e l'interpretazione. Il colore blu indica che il permafrost può essere trovato in tutte le condizioni, il colore viola



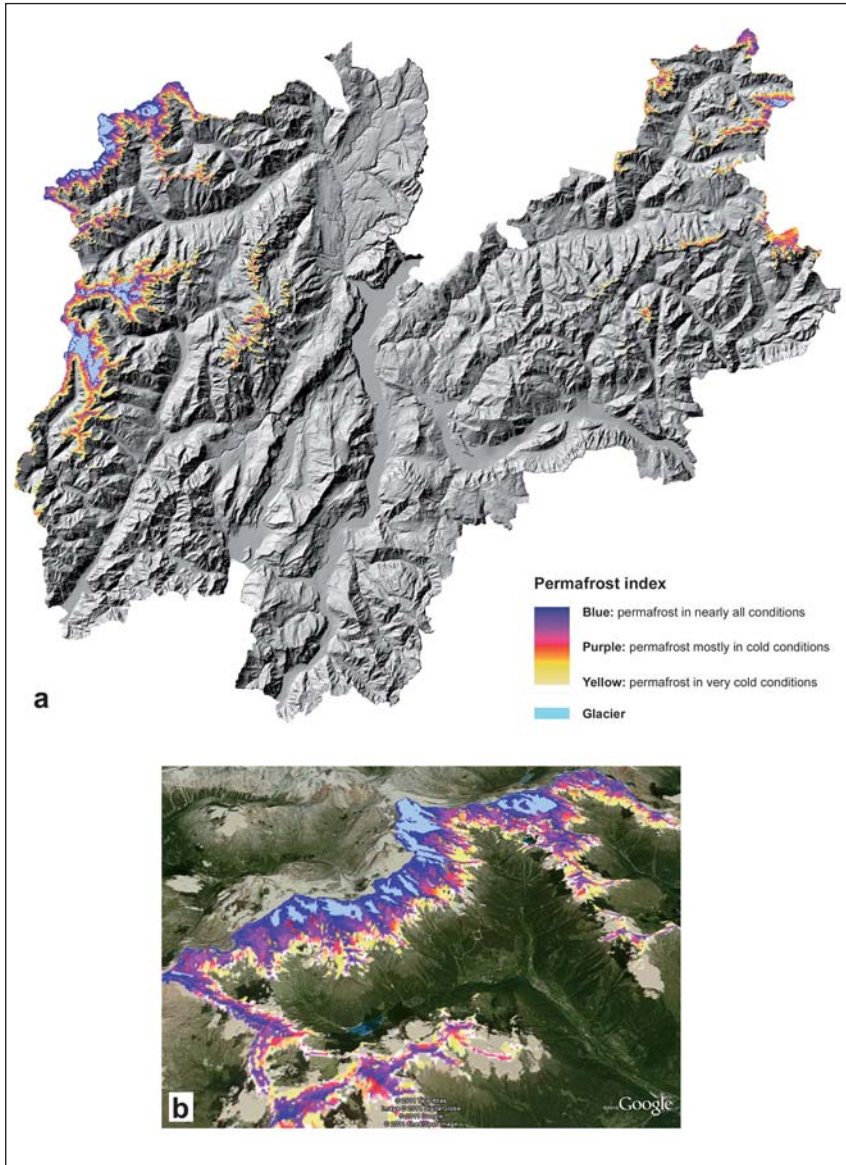


Fig. 9 - Carta del permafrost del Trentino (a) secondo il modello APMOD (BOECKLI *et al.*, 2011). Le parti in azzurro chiaro rappresentano i ghiacciai. I colori rappresentano l'indice di presenza del permafrost: il blu riporta le aree in cui il permafrost può trovarsi in tutte le condizioni, il viola in quasi tutte le condizioni mentre il giallo solo in condizioni molto fredde. Zoom sull'area dell'Ortles Cevedale visualizzata in Google Earth (b).

in quasi tutte le condizioni, mentre il giallo indica che il permafrost può trovarsi solo in condizioni locali molto fredde.

#### 4.1.3. Monitoraggio termico della superficie del suolo

Tra le attività di monitoraggio messe in atto nel contesto del progetto, alcune sono consistite nelle misure di temperatura della superficie del suolo mediante le tecniche BTS e con l'uso di data logger. Tali misure sono in parte servite per scegliere il sito più adatto dove realizzare una perforazione profonda e una stazione di monitoraggio a lungo termine delle condizioni termiche del permafrost.

Per effettuare le misure sono state selezionate alcune aree-campione situate nei principali gruppi montuosi della provincia. Nel Gruppo Ortles Cevedale sono state scelte un'area pianeggiante situata poco a monte del Lago del Careser (area del Cavaion), un rock glacier attivo situato sul versante Est del Monte Vioz e l'area dove è situato l'omonimo rifugio. Nell'area di Cavaion, le misure BTS hanno fatto registrare valori particolarmente bassi (compatibili con la presenza di permafrost) sul settore a quota più elevata (circa 3000 m) e sulle aree caratterizzate da una copertura detritica grossolana. I valori di temperatura hanno mostrato una considerevole variabilità interannuale, dovuta principalmente allo spessore e all'evoluzione del manto nevoso durante la stagione invernale. Il monitoraggio con data logger ha sostanzialmente confermato le misure BTS, mostrando temperature di equilibrio invernali particolarmente basse sulla falda detritica situata sul settore a monte dell'area studiata (Fig. 10).

Nel Gruppo Adamello Presanella è stata presa in considerazione l'area sciistica della Presena tra le quote di circa 2600 e 2700 m, a valle

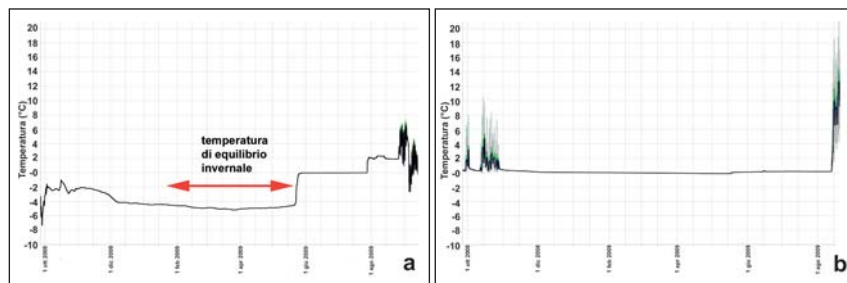


Fig. 10 - Evoluzione della temperatura della superficie del suolo misurata presso due siti nell'area di Cavaion tra il 2008 e il 2009. La falda detritica, situata a circa 3000 m di quota, mostra una temperatura di equilibrio invernale molto fredda (tra -4 e -5°C), indicando la probabile presenza di permafrost (grafico a). Il sito a quota meno elevata (2800 m) ha fatto registrare valori di temperatura vicini a 0°C nel corso di tutto l'inverno, indicando la probabile assenza di permafrost (grafico b).

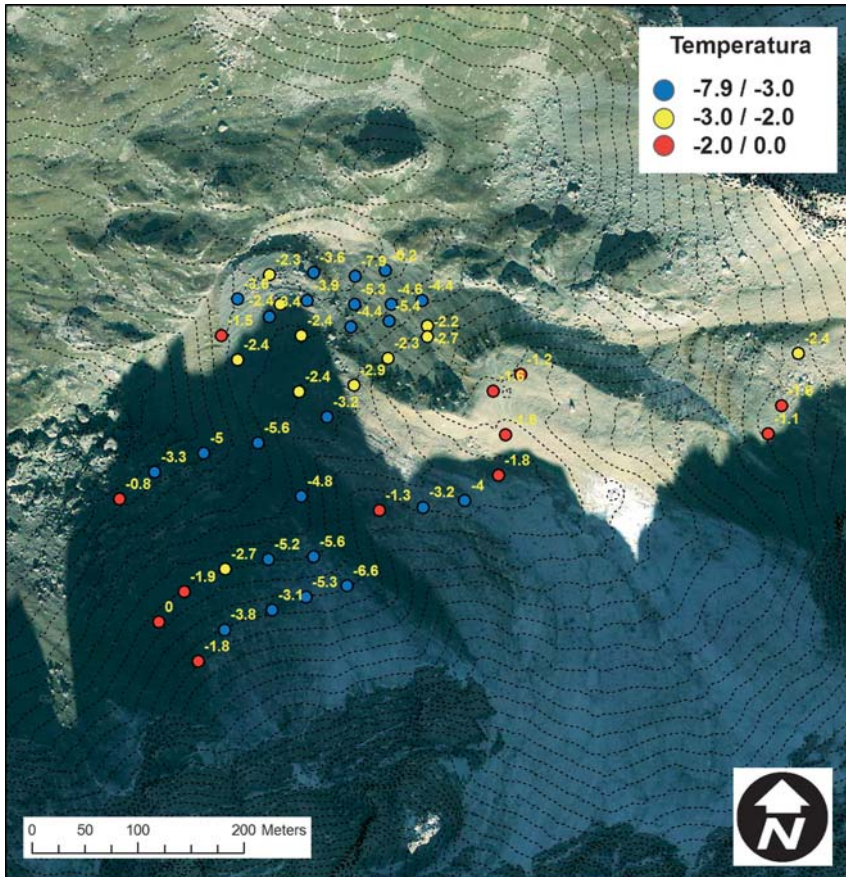


Fig. 11 - Risultati delle misure BTS nell'area di Cima Uomo effettuate nel marzo 2010. Numerosi punti di misura hanno mostrato temperature basse (punti di colore blu), compatibili con la presenza di permafrost.

dell'omonimo ghiacciaio. I monitoraggi avevano la funzione di verificare preliminarmente la presenza di permafrost in alcuni settori caratterizzati dall'affioramento di roccia in posto. Le misure di temperatura della superficie del suolo, effettuate sia con il metodo BTS che con l'uso di data logger hanno mostrato valori invernali piuttosto elevati, indicando la probabile assenza di permafrost in questa area.

Nell'area dolomitica, è stato scelto un sito di particolare interesse geomorfologico, situato tra 2400 e 2600 m di quota nei pressi di Cima Uomo (alta Val San Nicolò). In questa area, è presente un piccolo ghiacciaio rappresentativo degli apparati dolomitici, quasi sempre caratterizzati da ingenti coperture detritiche che ne favoriscono la conservazione



anche a quote relativamente basse. Il settore inferiore di questo ghiacciaio, caratterizzato dalla presenza di un corpo di ghiaccio morto coperto da materiale detritico di ingente spessore, sta probabilmente evolvendo in condizioni di permafrost, come indicato dalle misure di temperatura della superficie del suolo effettuate sia con il metodo BTS che con l'uso di data logger. I dati hanno mostrato temperature invernali compatibili con la presenza di permafrost, anche nel settore meno elevato dell'area indagata (Fig. 11).

#### 4.1.4. Misure di spostamento superficiale di due rock glacier attivi

Come accennato in precedenza, nel contesto del progetto PermaNET sono proseguite le misure di spostamento di due rock glacier attivi iniziate nel 2001 nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dal Parco Naturale Adamello Brenta. I due rock glacier si trovano nel Gruppo della Presanella, rispettivamente in alta Val di Genova (rock glacier «Maroccaro») e in Val d'Amola (rock glacier «Val d'Amola»). Le misure di spostamento sono effettuate annualmente al termine dell'estate con un teodolite laser e sono coadiuvate da misure della temperatura della superficie del suolo mediante data logger (iniziate nel 2004). I dati raccolti mostrano come la velocità di movimento interannuale sia variabile (da pochi cm/anno a più di 20 cm/anno) e come il comportamento dei due rock glacier sia sincrono, nonostante si tratti di forme con caratteristiche diverse. I settori più dinamici del rock glacier «Maroccaro» han-

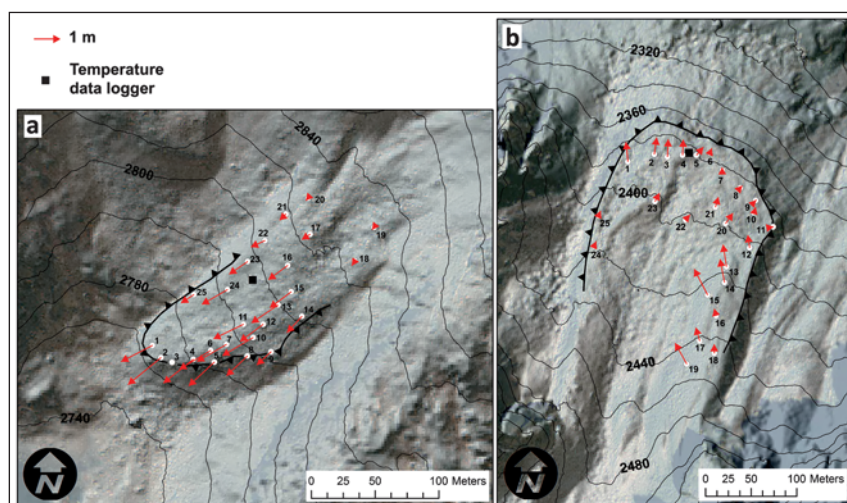


Fig. 12 - Spostamento totale (2001-2010) dei punti misurati sul rock glacier «Maroccaro» (a) e «Val d'Amola» (b).

no mostrato spostamenti totali compresi tra 1,5 e 2 m in tutto il periodo di osservazione (2001-2010) (Fig. 12a). Il rock glacier «Val d'Amola» ha mostrato complessivamente spostamenti inferiori, con alcuni settori che sono risultati dinamicamente inattivi. Gli spostamenti massimi, limitati ad alcuni specifici settori caratterizzati da un comportamento più dinamico, sono stati dell'ordine di circa 1,5 m per tutto il periodo di osservazione (Fig. 12b). È stata osservata, inoltre, una relazione tra la velocità di spostamento e la combinazione di fattori climatici quali la temperatura dell'aria, lo spessore e la durata del manto nevoso.

#### 4.1.5. Stazioni di misura della temperatura del sottosuolo

Lo stato termico del sottosuolo, la presenza di permafrost e la sua evoluzione a medio e lungo termine in relazione alle condizioni climatiche sono studiati in due importanti siti (Rifugio ai Caduti dell'Adamello e Cavaion), presso i quali sono in corso misure di temperatura in alcuni fori perforati in roccia. Oltre allo stato termico del sottosuolo, sono raccolti in loco i dati sui principali parametri climatici.

Presso il sito del Rifugio ai Caduti dell'Adamello, sono stati attrezzati con catene di sensori di temperatura due fori verticali profondi 20 m perforati in roccia. I dati registrati nei due fori hanno mostrato che il sottosuolo ha temperature costantemente negative ad una profondità superiore a 12 m. Il permafrost presente presso questo sito, tuttavia, è ad una temperatura poco al di sotto degli  $0^{\circ}\text{C}$  ed è quindi particolarmente sensibile ad una degradazione legata al riscaldamento climatico (Fig. 13).

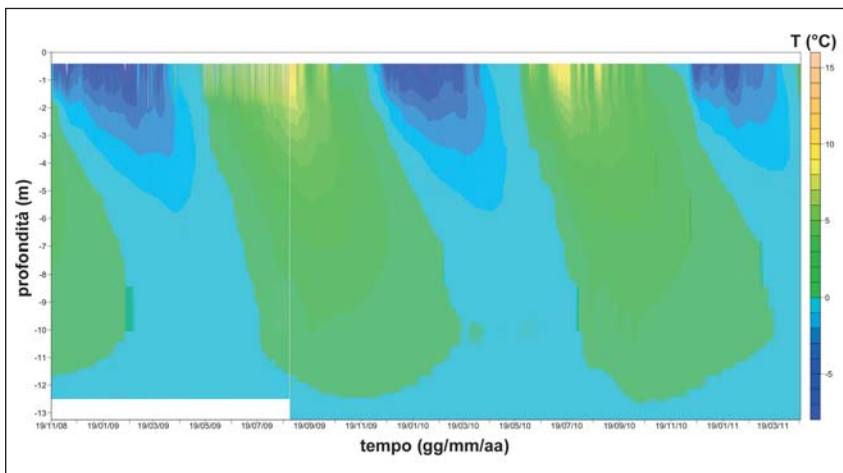


Fig. 13 - Temperatura del sottosuolo misurata da novembre 2008 ad aprile 2011 presso il foro profondo 20 m situato vicino al Rifugio ai Caduti dell'Adamello.



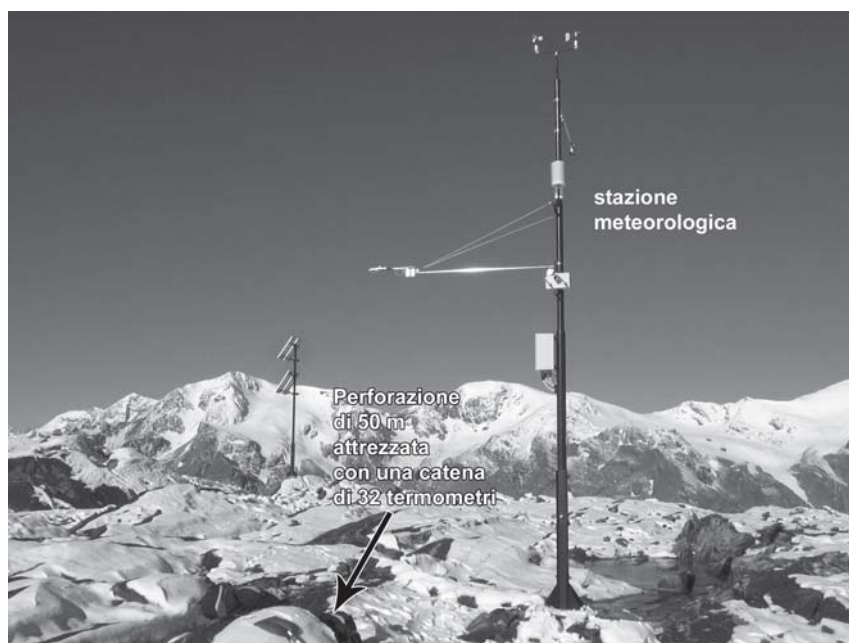


Fig. 14 - La stazione di monitoraggio del permafrost allestita presso il sito di Cavaion, costituita da un foro verticale trivellato in roccia profondo 50 m e da una stazione meteorologica.

Il sito di monitoraggio a lungo termine di Cavaion è situato ad una quota di circa 2900 m ed è costituito da una perforazione in roccia profonda 50 m e da una stazione meteorologica (Fig. 14). Il foro è stato attrezzato con una catena di 32 sensori di temperatura, mentre la stazione meteorologica rileva le variabili climatiche quali temperatura e umidità dell'aria, precipitazioni, velocità e direzione del vento, radiazione solare e altezza del manto nevoso. Dopo la fase di installazione e messa a punto, questo sito di monitoraggio ha iniziato da poco l'acquisizione dei dati e sarà necessario attendere almeno un anno per poter definire le caratteristiche termiche del sottosuolo in questa area.

## 5. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE

Le attività di studio del permafrost in Trentino sono relativamente recenti e hanno ricevuto un importante impulso dalla collaborazione al progetto Alpine Space PermaNET. Il progetto ha consentito di migliorare considerevolmente le conoscenze di questo importante aspetto del

territorio Trentino. Nell'ambito del progetto, e utilizzando procedure e metodologie condivise tra i diversi partner, sono state portate a termine alcune indagini conoscitive di base valide a scala regionale, come il catasto delle evidenze di permafrost e dei rock glacier e la carta della diffusione del permafrost. Tali indagini hanno mostrato come il permafrost e le forme del paesaggio ad esso correlate siano di considerevole importanza per l'ambiente alpino del Trentino.

Sono state avviate (o in alcuni casi sono proseguite) numerose attività di monitoraggio (rilievi topografici, misure di temperatura del suolo con il metodo BTS e con l'uso di strumenti automatici), che hanno contribuito a scegliere il sito dove installare una stazione per lo studio a lungo termine delle condizioni termiche del sottosuolo e delle sue variazioni in funzione dei cambiamenti climatici. I dati dei monitoraggi, inoltre, sono di fondamentale importanza per la taratura e la validazione dei modelli matematici predittivi della presenza e diffusione del permafrost.

Per la loro stessa natura, i dati di monitoraggio del permafrost assumono progressivamente maggiore rilievo quanto più le serie storiche si prolungano nel tempo. Per questo motivo, risulterà di particolare importanza garantire nel medio e lungo periodo la prosecuzione delle misure intraprese con il progetto PermaNET, migliorandone costantemente la qualità.

#### RINGRAZIAMENTI

Un particolare ringraziamento a: Mauro Degasperi, Claudio Cimadom e Franco Rippa (Servizio Geologico della PAT); Giancarlo Degasperi (Servizio Bacini Montani della PAT); Sergio Benigni (Meteotrentino); VVFF Nucleo Elicotteri della Provincia autonoma di Trento.

PermaNET (Permafrost long-term monitoring network) is a project part of the European Territorial Cooperation and co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) in the scope of the Alpine Space Programme ([www.alpine-space.eu](http://www.alpine-space.eu)).

Le ricerche presentate in questo articolo sono state in parte finanziate dal progetto PRIN 2008 «La degradazione della criosfera nelle Alpi centro orientali», responsabile prof. A. Carton.

## BIBLIOGRAFIA

- ALLEN K., GRUBER S. & OWENS I.F., 2009 - Exploring steep bedrock permafrost and its relationship with recent slope failures in the Southern Alps of New Zealand. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20: 345-356.
- BARONI C., CARTON A. & SEPPI R., 2004 - Distribution and behaviour of rock glaciers in the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps). *Permafrost and Periglacial Processes*, 15: 243-259.
- BOECKLI L., BRENNING A., GRUBER S. & NOETZLI J., 2011 - A statistical permafrost distribution model for the European Alps. *The Cryosphere Discussion*, 5: 1419-1459.
- CREMONESE E., and 17 Others, 2011 - Brief Communication: «An inventory of permafrost evidence for the European Alps». *The Cryosphere*, 5: 651-657.
- DALL'AMICO M., 2010 - Coupled water and heat transfer in permafrost modeling, Ph.D. thesis, Institute of Civil and Environmental Engineering, Università degli Studi di Trento, Trento.
- DALL'AMICO M., ENDRIZZI S., GRUBER S. & RIGON R., 2011 - A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. *The Cryosphere*, 5: 469-484.
- DALL'AMICO M., SEPPI R., CARTON A., ZUMIANI M., ZAMPEDRI G. & RIGON R., 2010. The Alpine Space «PermaNET» project in Trentino (eastern Italian Alps): advance of the research and monitoring activities. *Geophysical Research Abstracts* 12: EGU2010-10657.
- DAVIES M., HAMZA O. & HARRIS C., 2001 - The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 137-144.
- FRENCH H.M., 2007 - *The Periglacial Environment*, Third edition. Wiley, 458 pp.
- GARDINI M., 2005 - Le acque di sorgente dei rock glacier delle valli d'Ultimo, Rabbi e Peio. Tesi di Laurea Specialistica non pubblicata, relatore prof. A. Carton, correlatore dott. R. Seppi. Università di Pavia, 92 pp.
- GRUBER S. & HAEBERLI W., 2007 - Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, F02S18.
- HAEBERLI W., 1973 - Die Basis Temperatur del winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 9: 221-227.
- HAEBERLI W. & BENISTON M., 1998 - Climate change and its impact on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio*, 27: 258-265.
- HAEBERLI W. and 10 Others, 2006 - Permafrost creep and rock glacier dynamics, *Permafrost and Periglacial Processes*, 17: 189-214.
- HARRIS C., VONDER MÜHLL D., ISAKSEN K., HAEBERLI W., SOLLID J.L., KING L., HOLMLUND P., DRAMIS F., GUGLIELMIN M. & Palacios D., 2003 - Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change*, 39: 215-225.
- HARRIS C. & ISAKSEN K., 2008 - Recent warming of European permafrost: evidence from borehole monitoring. In: KANE D.L. & HINKEL K.M. (Eds.), *Proceedings vol. 1, Ninth International Conference on Permafrost*, University of Alaska Fairbanks: 655-661.

- HARRIS C. and 21 Others, 2009 - Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92: 117-171.
- HAUCK C. & KNEISEL C. (Eds.), 2008 - Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge University Press, pp 256.
- HOELZLE M., WEGMANN M. & KRUMMENACHER B., 1999 - Miniature temperature dataloggers for mapping and monitoring of permafrost in high mountain areas: first experience from the Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 10: 113-124.
- KÄÄB A., 2008 - Remote Sensing of permafrost-related problems and hazards. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 107-136.
- KELLER F., 1992 - Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3: 133-138.
- KNEISEL C., HAUCK C., FORTIER R. & MOORMAN B., 2008 - Advances in geophysical methods for permafrost investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 157-178.
- ISAKSEN K., SOLLID J.L., HOLMLUND P. & HARRIS C., 2007 - Recent warming of mountain permafrost in Svalbard and Scandinavia, *Journal of Geophysical Research*, 112: F02S04.
- LEMKE P. and 10 Others, 2007 - Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press: 337-383.
- LUETSCHG M., LEHNING M. & HAEBERLI W., 2008 - A sensitivity study of factors influencing warm/thin permafrost in the Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 54: 696-704.
- PIRULLI M., 2009 - The Thurwieser rock avalanche (Italian Alps): Description and dynamic analysis. *Engineering Geology*, 109: 80-92.
- RAVANEL L. & DELINE P., 2011 - Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: The north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age', *The Holocene*, 21: 357-365.
- RIGON R., BERTOLDI G. & T. M. OVER T.M., 2006 - GEOTop: a distributed hydrological model with coupled water and energy budgets. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 371-388.
- RISEBOROUGH D., SHIKLOMANOV N., ETZELMULLER B., GRUBER S. & MARCHENKO S., 2008 - Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19: 137-156.
- SEPPI R., 2006 - I rock glaciers delle Alpi Centrali come indicatori ambientali (Gruppo Adamello-Presanella e settore orientale del Gruppo Ortles-Cevedale). Tesi di dottorato non pubblicata, Università di Pavia, 199 pp.
- SEPPI R., BARONI C., CARTON A. & BASSI L., 2006 - Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel Gruppo Adamello-Presanella. *Studi Trentini di Scienze Naturali Acta Geologica*, 81 (2004): 75-85.
- SEPPI R., BARONI C. & CARTON A., 2005 - Proposta di nuova scheda per il censimento dei rock glaciers da fotografie aeree: applicazione sull'Alta Val d'Ultimo (Gruppo Ortles-Cevedale). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria Supplementi*, 7: 329-338.

- SEPPI R., CARTON A., BARONI C., ZUMIANI M. & DEGASPERI M., 2009 - Surface displacement of two active rock glaciers in the Adamello-Presanella Group (Central Italian Alps): a 7-year monitoring series. In: *The role of geomorphology in land management*. III National AIGeo Conference, Abstract Volume: 140-141.
- SEPPI R., CARTON A. & BARONI C., 2010 - Rock glacier relitti e antica distribuzione del permafrost nel Gruppo Adamello Presanella (Alpi Centrali). *Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences* 23(1): 137-144.
- STOCKER-MITTAZ C., HOELZLE M. & HAEBERLI W., 2002 - Modelling alpine permafrost distribution based on energy-balance data: a first step. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13: 271-282.
- VAN EVERDINGEN R. (eds), 1998 - Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms. International Permafrost Association. Revised 2005, 230 pp.
- VIVIANI A., 2009 - Modellazione della temperatura superficiale del suolo in un bacino di alta montagna attraverso il modello GEOTop. Master's thesis, Università di Trento, relatori: R. Rigon, M. Dall'Amico.
- WALTER K.M., ZIMOV S.A., CHANTON J.P., VERBYLA D. & F. S. CHAPIN III F.S., 2006 - Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming. *Nature*, 443: 71-75.
- ZANOTTI F., ENDRIZZI S., BERTOLDI G. & RIGON R., 2004 - The GEOTOP snow module. *Hydrological Processes*, 18: 3667-3679.
- ZHANG Y., CAREY S. & QUINTON W., 2008 - Evaluation of the algorithms and parameterizations for ground thawing and freezing simulation in permafrost regions. *Journal of Geophysical Research*, 113: D17116.
- ZUMIANI M., 2007 - Applicazioni di tecniche di monitoraggio topografico e termico per lo studio dei rock glacier: verifica della presenza di permafrost e caratteristiche dinamiche di due forme attive. Tesi di Laurea Specialistica non pubblicata, relatore: prof. M. Meneghel, correlatore: dott. R. Seppi. Università di Padova, 136 pp.



