

e Sintesi primi risultati delle attività di ARPA PIE

Luca Paro
Dipartimento Geologia e dissesto,
ARPA Piemonte, Torino

Mauro Guglielmin
Dipartimento di Scienze
Teoriche e Applicate,
Università dell'Insubria, Varese

Alcuni fenomeni gravitativi e di colata detritica verificatisi negli ultimi anni in Piemonte hanno avuto origine in aree di alta quota, evolvendo talvolta in modo preoccupante in quanto hanno coinvolto i settori vallivi distali ed antropizzati. Tali parossismi hanno evidenziato la necessità di ampliare, verso le quote altimetricamente più elevate, l'ambito sino ad ora indagato dai monitoraggi meteo-climatici, al fine di evidenziare le possibili interrelazioni fra cambiamenti climatici, ambiente periglaciale e degradazione del permafrost alpino che potrebbero causare un aumento della pericolosità geologica di ampie aree montane.

A tal scopo, ARPA Piemonte (in collaborazione con l'Università dell'Insubria) ha avviato a partire dal 2006 una serie di attività volte ad aumentare ed approfondire le conoscenze su questi temi, istituendo anche una rete di monitoraggio del permafrost distribuita su tutto l'arco alpino regionale. Le attività, che hanno goduto di un forte impulso in occasione del progetto europeo Alpine Space "PermaNet" (*Permafrost long-term monitoring Network*) nel triennio 2008÷2011, attualmente sono diventate parte integrante degli obiettivi istituzionali dell'Agenzia. I principali risultati ottenuti finora sono rappresentati dal catasto regionale aggiornato degli elementi morfologici indicatori del permafrost, da mappe e modelli di distribuzione potenziale del permafrost alpino, da stazioni di monitoraggio termico in pozzo e siti di monitoraggio superficiale; sono state inoltre condotte campagne di misura BTS (*Bottom Temperature of the Snow Cover*), rilievi geofisici ed alcuni studi di dettaglio finalizzati alla valutazione delle relazioni tra atmosfera, geosfera, criosfera e biosfera.



MONTE

su ambiente
periglaciale e
Permafrost nelle
Alpi Piemontesi

INTRODUZIONE

L'ambiente periglaciale è tipico delle regioni ad elevate latitudini di entrambi gli emisferi e delle aree ad elevata altitudine, dove si raggiungono temperature tali da mantenere il suolo congelato per molti mesi o per tutto l'anno (French, 2007). Tali ambienti sono caratterizzati dalla presenza di forme e depositi originati da processi geomorfologici legati all'azione del gelo (*frost action*) quali, ad esempio, il susseguirsi di cicli di gelo-disgelo e la crescita di masse di ghiaccio nel terreno (Tricart, 1968; Pewè, 1969).

Il termine "periglaciale" è stato attribuito dai primi studiosi all'inizio del XX secolo per descrivere le morfologie ed i processi che avvenivano intorno ai margini dei grandi ghiacciai di calotta del Pleistocene (Von Lozinski, 1909). In seguito, il suo significato fu ampliato fino a comprendere i processi e le forme associate ad un clima molto freddo in aree non necessariamente glacializzate. Per questo motivo, nella letteratura recente, per definire tali processi si preferisce utilizzare il termine "criotico", che fa riferimento esplicito al ghiaccio (dal greco "crios") ed alla neve, ma non ai ghiacciai.

Tipico dell'ambiente periglaciale è il *permafrost* (contrazione dei termini inglesi "*permanently frozen ground*") che definisce il terreno o la roccia che rimane al di sotto della temperatura di 0 °C per più di due anni consecutivi (Müller, 1943; Brown & Pewè, 1973), indipendentemente dalla presenza di ghiaccio. Infatti, la presenza del ghiaccio per la definizione del permafrost non è un elemento fondante in quanto il materiale può essere secco o può contenere acqua allo stato liquido, anche se le temperature sono < 0 °C (ad es. a causa di sali disciolti o di falde in pressione che abbassano la temperatura di congelamento). Il regime termico del suolo (e quindi il permafrost) è direttamente collegato alle condizioni climatiche sia globali che locali e gli ambienti con permafrost sono tra quelli in cui gli effetti del riscaldamento globale si manifestano probabilmente in modo più intenso. Tali alterazioni producono significativi impatti

sia sugli equilibri naturali (ad es. modificazioni nel ciclo del carbonio e nel ciclo dell'acqua), sia sulle attività umane in ambiente montano (instabilità dei versanti con danni alle infrastrutture, perturbazione dei circuiti idrogeologici, ecc.). Per questi motivi, il permafrost è stato individuato dalle organizzazioni internazionali, quali l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia (WMO) e l'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA), come indicatore privilegiato del cambiamento climatico. La conoscenza della distribuzione locale del permafrost alpino può quindi costituire la base di un programma di monitoraggio da inserire nelle reti internazionali, utile per comprendere e valutare gli effetti del cambiamento climatico sulle Alpi piemontesi e per la gestione dei rischi connessi a medio e lungo termine.

STATO DELLE CONOSCENZE NELLE ALPI ITALIANE ED IN PIEMONTE

Gli studi inerenti la conoscenza del permafrost nelle regioni montuose sono molto recenti. Studi sistematici iniziarono intorno agli anni '60 - '70 del XX sec. e le prime reti di monitoraggio a lungo termine furono installate solo agli inizi del XXI sec.

In Piemonte, la conoscenza dell'ambiente periglaciale e della distribuzione del permafrost, fino a qualche anno fa, risultava del tutto frammentaria e lacunosa. Per migliorare ed ampliare le conoscenze sulla tematica in oggetto, a partire dal 2006 ARPA Piemonte ha avviato una serie di studi in collaborazione con l'Università dell'Insubria volti inizialmente alla creazione di una base dati regionale relativa alla criosfera ed alla "vulnerabilità criotica", attività successivamente integrata nell'ambito del progetto europeo Alpine Space "PermaNet" (*Permafrost long-term monitoring Network*). Il progetto ha preso avvio nell'estate del 2008 con una durata di 38 mesi ed ha visto coinvolte quattordici istituzioni di cinque paesi (Italia, Austria, Germania, Francia e Svizzera) con lo scopo principale di realizzare una rete

di monitoraggio del permafrost alpino e di valutare la distribuzione potenziale del permafrost nelle Alpi; tutto ciò finalizzato alla implementazione di strategie di governance applicate alle aree di alta montagna (per ulteriori dettagli sul progetto si rimanda al sito web <http://www.permanet-alpinespace.eu>).

Prima dell'inizio del Progetto PermaNet nelle Alpi italiane la distribuzione del permafrost era stata stimata attraverso l'applicazione di modelli diversi in Valle d'Aosta, in Lombardia e più recentemente in Veneto e nella provincia di Bolzano. Solo in alcuni casi, limitati per lo più all'Alta Valtellina, la prospezione geofisica e la metodologia BTS (misure di temperatura alla base del manto nevoso) erano state applicate per calibrare i modelli e/o per caratterizzare la distribuzione del permafrost. Per quanto concerne le indagini geognostiche erano ancora più sporadiche e si limitavano ai sondaggi effettuati in Alta Valtellina, al Passo dello Stelvio in provincia di Bolzano e nei siti di Cervinia e di Punta Helbronner in Valle d'Aosta. In Piemonte le conoscenze erano abbastanza scarse prima dell'avvio del progetto, riferite a studi focalizzati soprattutto sulla distribuzione dei rock glaciers (quali ad es. il rock glacier di Schiantala in alta Valle Stura di Demonte nel cuneese - Ribolini, 2001; Ribolini & Fabre, 2006; Ribolini *et al.*, 2007- e il rock glacier del Passo della Mulattiera in alta Val Susa, nel torinese - Tiranti *et al.*, 2005). Altre conoscenze di carattere generale relative all'ambiente periglaciale derivavano dal catasto nazionale dei rock glaciers che aveva evidenziato 319 rock glaciers nel territorio piemontese con meno del 20% degli individui attivi (Guglielmin & Smiraglia, 1997).

Grazie al progetto PermaNet, che per ARPA Piemonte ha rappresentato un vero e proprio contributo di *start-up* per le attività ora integrate negli obiettivi istituzionali dell'Agenzia, nelle Alpi piemontesi è stata installata una rete di stazioni per il monitoraggio del permafrost alpino sia in pozzo che per misure termiche di superficie, sono stati applicati e sviluppati alcuni

modelli per la mappatura della distribuzione potenziale del permafrost e per la valutazione della "vulnerabilità criotica" (relazione tra evoluzione del permafrost ed instabilità dei versanti), è stato realizzato ed aggiornato un inventario degli indicatori morfologici del permafrost e sono stati avviati rilievi in campo (campagne di misura, rilievi geofisici) e studi di approfondimento locale che continuano ad arricchire la base dati della criosfera delle Alpi piemontesi.

DISTRIBUZIONE POTENZIALE DEL PERMAFROST E CATASTO DEGLI INDICATORI MORFOLOGICI

Il permafrost, a differenza degli altri elementi della criosfera come i ghiacciai o la neve, è un fenomeno puramente termico, quindi pressoché invisibile. Ne consegue che per valutarne la distribuzione, il ricorso a modelli matematici è spesso inevitabile. In Piemonte sono stati applicati due modelli: uno empirico, il PERMAROCK, ed uno fisico-basato, il PERMACLIM. Il primo modello si basa sul riconoscimento di alcuni elementi morfologici caratteristici dell'ambiente periglaciale e sulla loro distinzione in base allo stato di attività. Per questo motivo si è reso necessario rinnovare e dettagliare il ca-

tasto di tali elementi presenti nell'arco alpino piemontese. Rispetto al catasto precedentemente realizzato dal Comitato Glaciologico Italiano (Guglielmin & Smiraglia, 1997), il nuovo inventario raccoglie e classifica, oltre ai rock glacier, anche i protalus rampart (o nivomorene), i debris covered glacier (o giacciai neri) ed i principali lobi di geliflusso. L'aggiornamento dell'inventario ha consentito di realizzare una importante base dati informatizzata utilizzando applicativi GIS che facilitano le successive elaborazioni (FIG. 1).

Partendo da questo inventario è stato possibile realizzare, per la prima volta in Piemonte, una cartografia sperimentale sulla distribuzione del permafrost alpino applicando il modello empirico PERMAROCK (basato sul modello di Imhof, 1996, modificato da Guglielmin, 2009). La carta del permafrost potenziale si basa sull'assunzione che i rock glacier dinamicamente attivi siano indicatori di permafrost montano. Tale assunzione è stata recentemente messa parzialmente in discussione in quanto si è riscontrata la presenza di ghiaccio sedimentario relitto all'interno di rock glacier. Per questo motivo, nel realizzare questa carta, per la prima volta si è introdotto anche un altro potenziale indicatore morfologico di permafrost, i protalus rampart. La distribuzione dei rock glacier e dei protalus rampart è stata analizzata statisticamente

rispetto alla quota minima degli orli delle fronti e delle esposizioni medie dei corpi detritici. Si è quindi calcolata la media e la moda della quota minima di queste forme per ciascun ottante di esposizione. I valori così ottenuti permettono di definire delle quote minime al di sopra delle quali è possibile e/o probabile avere la presenza del permafrost. Trattando allo stesso modo anche i dati relativi alle forme inattive si ottiene la quota minima, per ciascun ottante di esposizione, in cui è possibile avere un permafrost relitto (non più in equilibrio con le condizioni climatiche attuali). Su questa base sono state quindi definite tre classi di potenziale presenza del permafrost (FIG. 2): 1) permafrost antico o relitto, 2) permafrost possibile e 3) permafrost probabile. In base a questo modello, le aree in cui è presente il permafrost rappresentano circa l'8,5% del territorio regionale e circa il 19% delle Alpi piemontesi.

La carta della distribuzione potenziale del permafrost, il catasto degli elementi morfologici indicatori del permafrost, unitamente ai dati sui ghiacciai ricavati dalla carta tecnica regionale numerica (CTRN Piemonte) e dal *Corine Land Cover* (dati aggiornati agli anni '90 del XX sec.), hanno contribuito alla realizzazione della prima carta della criosfera delle Alpi piemontesi (Guglielmin & Paro, 2009). Successivamente, è stato applicato an-

Fig. 1 - Inventario delle forme indicatrici del permafrost delle Alpi piemontesi. I profili dei ghiacciai neri (debris covered glacier, a), delle nivomorene (protalus rampart, b), dei rock glacier (c) e dei lobi di geliflusso (d) sono evidenziati in verde nelle immagini di sinistra. In alto a destra, uno stralcio dell'inventario con rappresentazione cartografica su GIS dei settori delle alte valli Pellice e Germanasca (Provincia di Torino). In basso a destra, la tabella riassuntiva dei dati cartografati con indicazione del numero di elementi censiti e della relativa tipologia di geometria vettoriale (aggiornamento 2010).

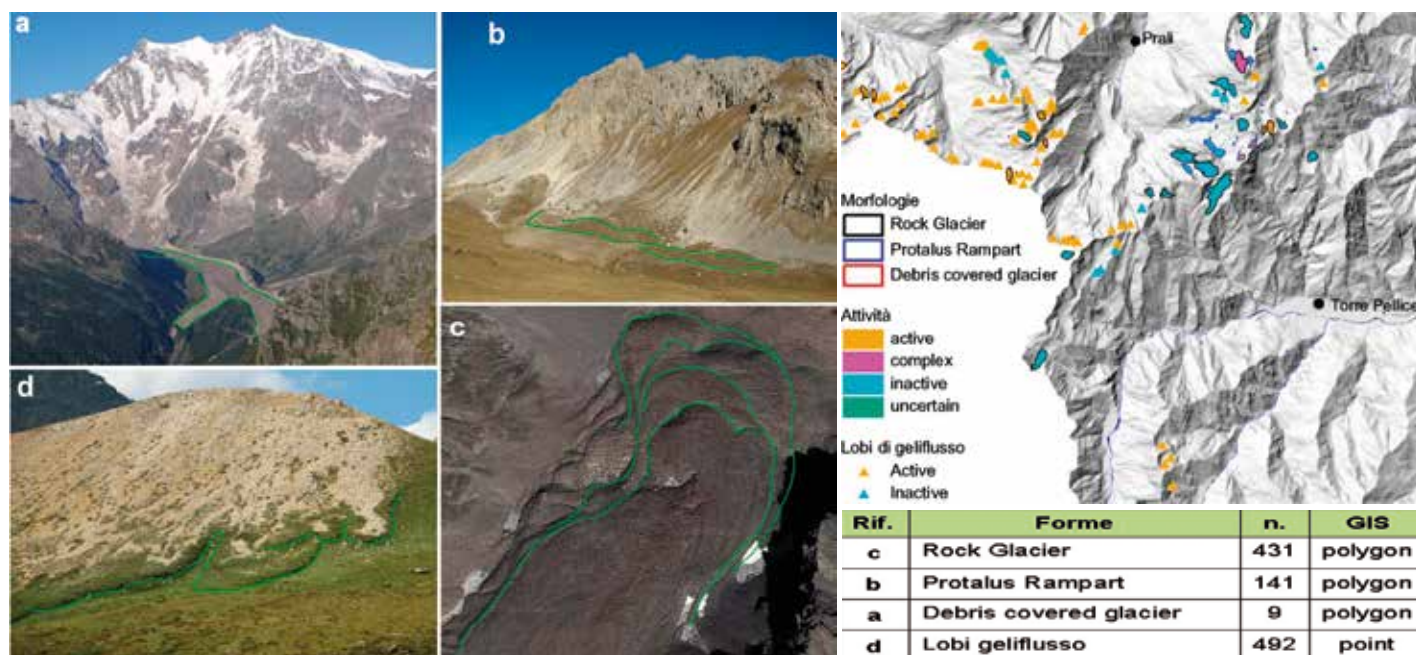


Fig. 2 - Stralcio della carta della distribuzione potenziale del permafrost delle Alpi piemontesi (settori delle alte valli Susa, Pellice e Germanasca, Provincia di Torino). Le tre classi del permafrost sono state elaborate con il modello PERMAROCK (modificato da Guglielmin, 2009) e sono basate sull'analisi statistica di quota minima ed esposizione media degli indicatori morfologici, anch'essi riportati in carta. Dettagli nel testo.

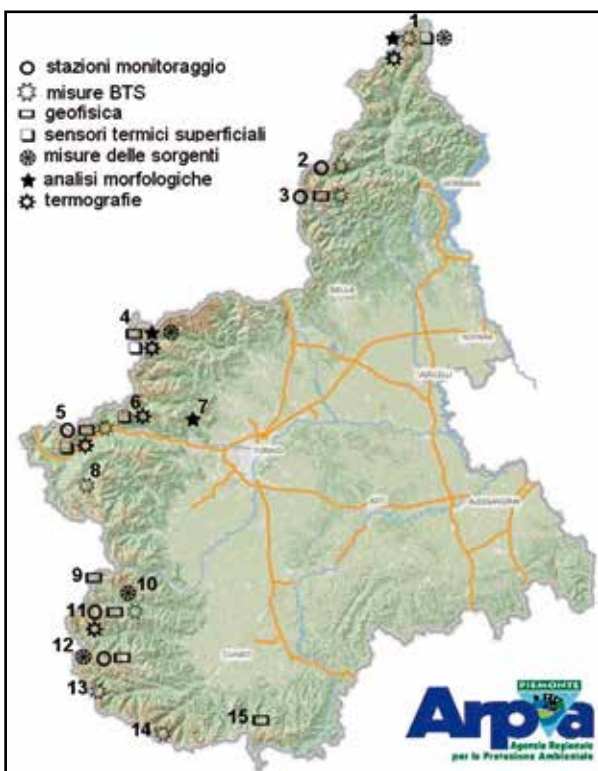
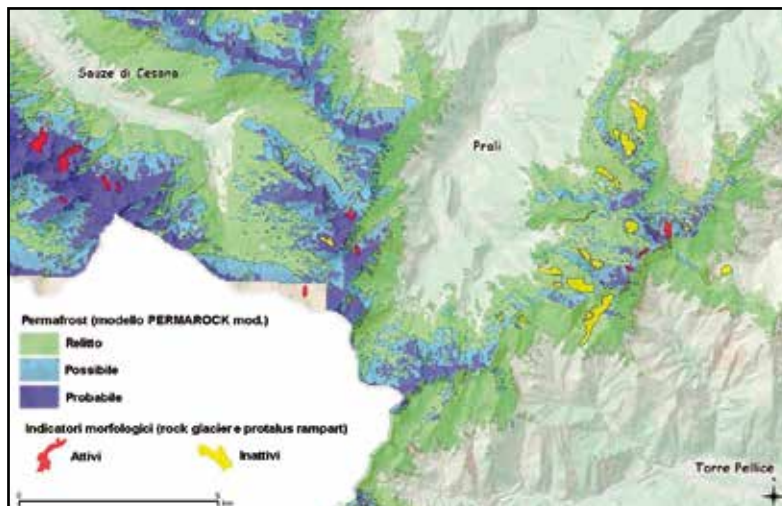


Fig. 3 - Rappresentazione schematica delle attività svolte da ARPA Piemonte nell'ambito dello studio dell'ambiente periglaciale e del permafrost nelle Alpi piemontesi. Siti: Provincia di Verbania - 1) alta Val Formazza, 2) Passo del Monte Moro; Provincia di Vercelli - 3) Passo dei Salati; Provincia di Torino - 4) alta Valle Orco, 5) Colle Sommeiller, 6) M. Rocciamelone, 7) Massiccio di Lanzo, 8) M. Banchetta; Provincia di Cuneo - 9) Colle dell'Agnello, 10) Sampeyre, 11) Passo de La Colletta, 12) Passo della Gardetta, 13) rock glacier di Schiantala, 14) Laghi di Valscura, 15) rock glacier del Seirasso

che il modello PERMACLIM (Guglielmin et al., 2003), modello fisico con approccio semplificato che ben si adatta alle applicazioni a scala regionale. Il modello considera come data input un modello digitale del terreno (DTM), dei dati spazializzati di temperatura aria ed altezza neve e le caratteristiche termiche principali del manto nevoso (calore sensibile e conducibilità termica). Il modello calcola la temperatura del suolo (T_s) per ogni cella del DTM includendo lo *snow buffering effect* (letteralmente effetto "cuscino" o "tampone") della neve in accordo alla teoria semplificata della conduzione verticale di calore. I valori di T_s mediati per almeno due anni consecutivi consentono di ge-

nerare una mappa in cui il permafrost è indicato come assente (T_s media > 0 °C), possibile (0 °C $> T_s$ media > -2 °C) e probabile (T_s media < -2 °C).

Benché si tratti di un modello semplificato, il PERMACLIM consente di effettuare valutazioni su aree ampie disponendo di una base dati che può derivare sia da misurazioni strumentali in sito, sia da modelli climatici predittivi, consentendo quindi di valutare gli effetti sul permafrost di diversi scenari del cambiamento climatico. Recentemente, per l'implementazione del modello, ARPA Piemonte ha sviluppato uno specifico applicativo (*plug-in*) per QuantumGIS (nell'ambito di un contratto con la ditta informatica Faunalia e con il contributo di una tesi magistrale dell'Università di Torino), apportando in questo modo un contributo anche alla comunità scientifica che ha a disposizione uno strumento gratuito a codice aperto (*open*) che potrà utilizzare e sviluppare liberamente (Colombo et al., 2013).

MONITORAGGIO DEL PERMAFROST

I modelli per la valutazione della distribuzione potenziale del permafrost non sono sempre di facile applicazione e non sempre hanno una adeguata accuratezza ma, comunque, possono fornire un quadro preliminare su cui sviluppare un piano di indagini più approfondite, volte sia a validare i modelli stessi, sia a monitorare nel tempo l'evoluzione del permafrost. ARPA Piemonte, a partire dal 2008 ha predisposto un programma di misure

periodiche che consistono in campagne di rilievi BTS, indagini geofisiche (in particolare prospezioni geoelettriche), termografie e misure termiche dirette. Nel 2009, nell'ambito del progetto PermaNet, sono state realizzate le stazioni di monitoraggio del permafrost in 5 diversi siti delle Alpi piemontesi costituite da catene termometriche inserite in pozzi verticali in roccia profondi fino a 100 m. A queste stazioni, nel 2013 si sono aggiunti alcuni siti per la misura della temperatura superficiale di terreni e roccia ed altre misurazioni (in FIG. 3 è riportata la rappresentazione di sintesi dello stato attuale delle attività di ARPA Piemonte).

Per quanto riguarda i sistemi indiretti di valutazione della presenza del permafrost, la metodologia delle misure BTS (*Bottom Temperature of the Snow cover*, Haeberli, 1973) è tra le più semplici ed economiche. Il metodo si basa sul principio che la temperatura alla base del manto nevoso, alla fine della stagione invernale, corrisponde alla quantità di calore immagazzinata dal terreno durante l'estate ed al flusso di calore terrestre dell'area. La metodologia consiste nel rilevare la temperatura del suolo al di sotto di una coltre di neve di potenza superiore a 100 cm nel raggio di 10 m, al termine dell'inverno ma prima che la fusione del manto nevoso abbia inizio (FIG. 4). In letteratura, i valori di temperature ≤ -3 °C indicano un'alta probabilità della presenza di permafrost, mentre i valori compresi tra $-1,7$ e -3 °C suggeriscono una sua possibile presenza. Nelle stagioni tardo-invernali dal 2009 al 2013 sono stati rilevati in totale oltre 950 punti misura BTS che hanno consentito sia di testare e validare la carta della distribuzione potenziale del permafrost, sia di verificare la variabilità spaziale dell'andamento termico superficiale (FIG. 5). Anche la prospezione geofisica rientra tra le analisi indirette per l'individuazione del permafrost e, in particolare, la tomografia elettrica (ERT - *Electrical Resistivity Tomography*) è certamente il sistema più idoneo per la determinazione della presenza del permafrost con ghiaccio in ambito montano.



Fig. 4 - Fasi del rilievo BTS. Preparazione del foro di misura nel manto nevoso tramite sonda metallica con punta conica per la perforazione di eventuali croste di ghiaccio (a sinistra), inserimento del termometro a contatto per la misurazione della temperatura della superficie del suolo alla base del manto nevoso (al centro), rilievo con GPS del punto misura BTS e inserimento dei dati nella scheda di rilievo (a destra).

Il sistema si basa sull'analisi della resistività del geomateriale (terreno o roccia) al passaggio della corrente elettrica.

Il materiale contenente ghiaccio nelle fratture o nei pori ha una elevata resistività (in genere dell'ordine di $10^4 \div 10^5 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$) anche se non sempre è facile discriminare tra una roccia in condizioni criotiche da una non criotica (FIG. 6). L'unico sistema per stabilire la presenza di permafrost è quello diretto, cioè il monitoraggio termico.

ARPA Piemonte ha sviluppato una tipologia di monitoraggio rivolta verso l'analisi degli effetti del cambiamento climatico, in base anche alle finalità del progetto PermaNet e, pertanto, le stazioni sono costituite da catene termometriche ubicate in fori verticali, effettuati in roccia, profondi alcune decine di metri (FIG. 7). Misurando l'andamento termico in roccia e mettendo in relazione queste misure con i dati meteo-climatici sarà possibile ottenere delle relazioni tra clima e permafrost, valutando le relazioni tra atmosfera e litosfera nelle aree di alta quota (FIG. 8). I fori realizzati sono di profondità variabile: 5 m (per avere informazioni relative al comportamento dello strato attivo), 30 m (per avere informazioni relativamente alle caratteristiche climatiche attuali) e 100 m (per un'analisi anche di tipo paleo-climatico; la maggiore profondità della perforazione consente di rilevare un record termico fossile, risalente probabilmente a 200-300 anni fa circa).

In base a criteri geologico-geomorfologici, climatici e logistico-progettuali, sono stati selezionati 5 siti nelle Alpi pie-

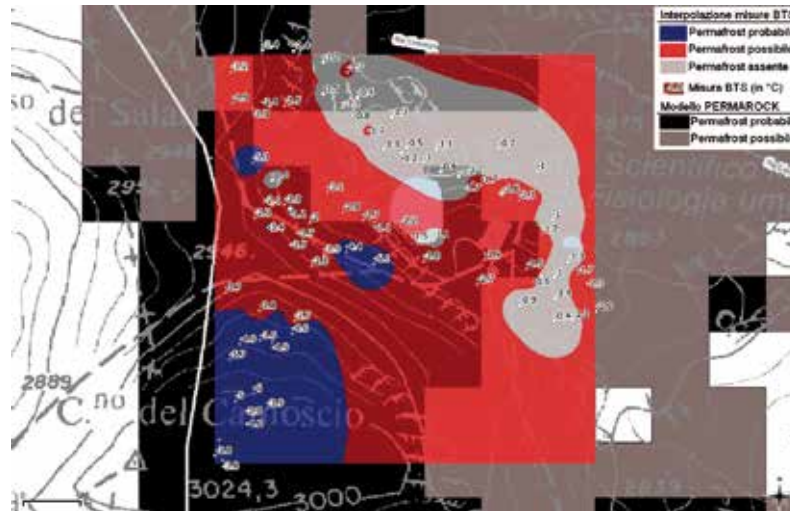


Fig. 5 - Esempio dei risultati del rilievo BTS effettuato presso il Passo dei Salati (Alagna Valsesia, VC) nell'aprile 2013. I dati puntuali sono stati interpolati e sovrapposti alla carta della distribuzione potenziale del permafrost (mod. PERMAROCK). Dal confronto tra le due coperture, si può osservare come i valori di BTS indicativi di permafrost probabile ($< -3^\circ\text{C}$) e possibile (compreso tra $-1,7^\circ\text{C}$ e -3°C) definiscano con maggiore precisione le aree di distribuzione del permafrost.

montesi (Tab. 1 a pag. 35) che sono stati successivamente sottoposti ad indagini preliminari per una corretta ubicazione delle perforazioni.

Tutti i siti della rete hanno una perforazione di profondità sufficiente ad intercettare sia la tavola del permafrost (limite tra permafrost e strato attivo), sia la profondità di oscillazione termica annua (ZAA - Zero Annual Amplitude, limite al di sotto del quale non si hanno oscillazioni termiche stagionali): entrambi questi elementi sono dei punti critici e degli ottimi indicatori del cambiamento climatico. Ove possibile, è stata raggiunta anche la base del permafrost, ossia la profondità massima alla quale si ritrova il permafrost. La profondità della tavola del permafrost cambia annualmente mentre la temperatura della ZAA può variare da un anno all'altro solo in caso di forti cambiamenti, altrimenti tale variazione necessita di qualche anno.

La profondità della base del permafrost varia solitamente solo a scala secolare o

millenaria ma, in fase di forte degradazione, anche a scala temporale più breve. Per valutare gli effetti superficiali degli scambi energetici tra atmosfera e litosfera, nel corso del 2013 sono stati installati 22 sensori per la misura termica superficiale (GST - Ground Surface Temperature) in 4 siti principali (FIG. 9, Tab. 2 a pag. 35). Unitamente a queste misure in continuo, i cui dati vengo raccolti in datalogger ubicati in sito, sono state effettuate una serie di misure dirette della temperatura di superficie tramite l'utilizzo sia di termometri a contatto, sia di termografie con fotocamere a raggi infrarossi (FIG. 10).

DATI PRELIMINARI E PROSPETTIVE FUTURE

I primi risultati ottenuti durante la fase conoscitiva sul permafrost e sull'ambiente periglaciale nelle Alpi piemontesi condotta da ARPA Piemonte negli ultimi anni ha portato ad un notevole incremento delle conoscenze sulla criosfera regionale. Il catasto degli elementi morfologici in-

Fig. 6 - Esempio di profilo di resistività elettrica ottenuto tramite rilievo tomografico lungo uno stendimento di 155 m (32 poli con interasse di 5 m, riportati sull'asse orizzontale), esteso longitudinalmente nella parte frontale del rock glacier inattivo del Seirasso (quota 2050÷2100 m circa, alto bacino del T. Corsaglia, Provincia di Cuneo). Nella rappresentazione grafica qui proposta, la resistività elettrica, espressa in Ohm*m, cresce dal viola, al rosso, al verde, al blu (da sinistra a destra nella scala grafica) e la profondità, espressa in m, è riportata sull'asse verticale. Nel profilo sono evidenziati due corpi principali particolarmente resistivi (con valori superiori a 10.000 Ohm*m) posti tra i 7 e i 16 m di profondità che potrebbero rappresentare corpi di permafrost con un contenuto di ghiaccio non estremamente alto o più probabilmente a temperatura prossima a quella di fusione (rilievo ed interpretazione eseguiti da Università dell'Insubria nell'estate 2011 per Arpa Piemonte).

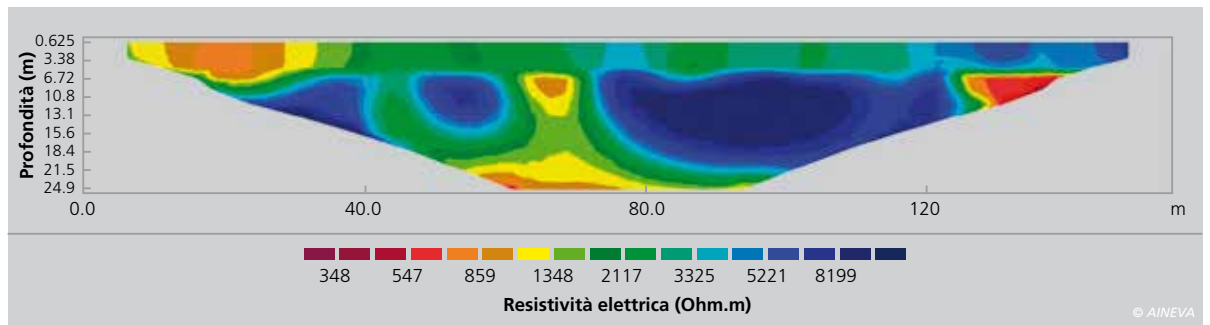


Fig. 7 - Fasi di realizzazione ed installazione della stazione di monitoraggio del permafrost (Colle Sommeiller, alta Val Susa, Provincia di Torino). a) Perforazione del pozzo di 100 m di profondità (esecuzione ditta So.Ge. Tec. s.r.l.); b) inserimento del tubo in HDPE nel pozzo, all'interno del quale verrà inserita la catena termometrica; c) installazione del datalogger alimentato da due batterie (inserite all'interno del tombino visibile in secondo piano) ricaricate da pannelli fotovoltaici.

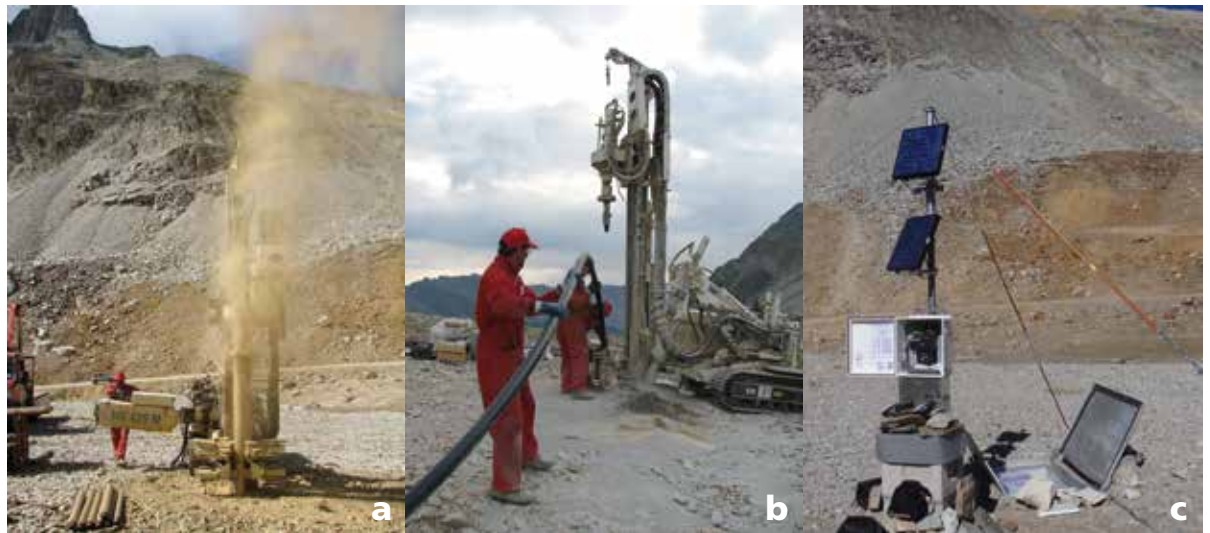
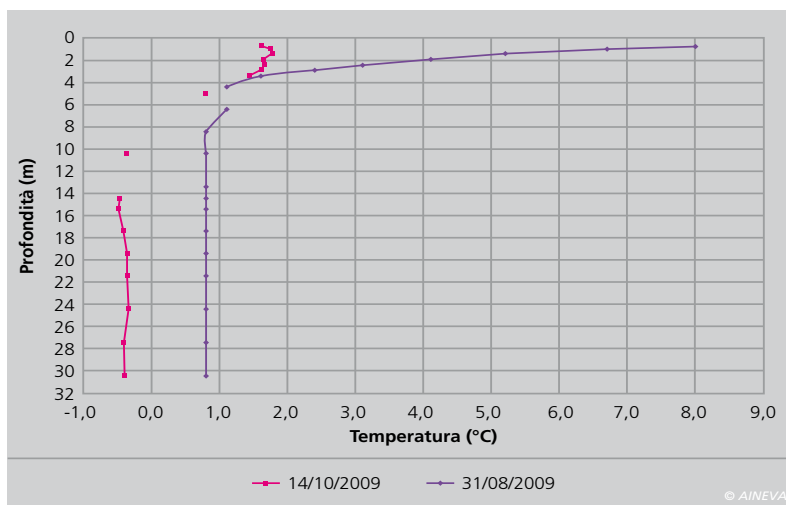


Fig. 8 - Confronto tra il profilo termico in foro da 30 m ottenuto con catena termometrica manuale circa 15 giorni dopo la fine della perforazione (31/08/09) e valori medi misurati dalla stazione automatica il 14 ottobre 2009 nel sito del Corno dei Camosci (alta Val Sesia, Provincia di Vercelli).



dicatori del permafrost di recente realizzazione ha fornito un importante aggiornamento rispetto al precedente catasto disponibile per tutto l'arco alpino italiano. Rispetto al catasto precedentemente realizzato dal Comitato Glaciologico Italiano pubblicato negli anni '90 del XX sec., il nuovo inventario raccoglie e classifica, oltre ai rock glacier, anche i protalus rampart (o nivomorene), i debris coverd glacier (o giacciai neri) ed i principali lobi di geliflusso, informazioni finora trascurate. Questo inventario è in continuo aggiornamento grazie anche al contributo di

studi di dettaglio svolti nell'ambito di tesi magistrali e di dottorato in collaborazione con l'Università di Torino (Paro, 2011; Colombo, 2013; Giaccone, 2013) (FIG. 11). Le elaborazioni condotte per analizzare la distribuzione potenziale del permafrost nella Alpi piemontesi hanno subito una serie di implementazioni ed aggiornamenti che stanno portando ad un considerevole affinamento dei modelli. Il modello empirico PERMAROCK modificato, basato sui dati dell'inventario dei rock glacier e dei protalus rampart, è stato applicato inizialmente su base regionale

e successivamente suddividendo l'arco alpino piemontese in 4 settori principali su base latitudinale (Ossola, Alpi Graie, Alpi Cozie, Alpi Marittime).

I risultati ottenuti evidenziano delle differenze sostanziali nella distribuzione del permafrost che indicano un forte legame tra le condizioni del sottosuolo e le caratteristiche climatiche locali.

Le recenti elaborazioni dei dati meteorologici finalizzate all'applicazione del modello fisico PERMACLIM hanno consentito di ottenere una distribuzione preliminare del permafrost più aderente alle caratteristiche climatiche attuali da cui è possibile trarre considerazioni su tendenze passate e future.

L'applicazione del PERMACLIM in Piemonte ha messo in evidenza da un lato la necessità di disporre di un modello di spazializzazione della neve molto accurato (modello in fase di studio e sperimentazione da parte del Dipartimento Sistemi Previsionali di ARPA Piemonte), dall'altro lato alcuni limiti del modello stesso che sono attualmente in fase di analisi per la sua implementazione. Le indagini indirette condotte finora mostrano situazioni molto

SITO	COMUNE	PROV.	QUOTA (m s.l.m.m.)	PROFONDITÀ POZZO (m)	SENSORI
Passo del Monte Moro	Macugnaga	VB	2870	30	23 termistori in pozzo e 2 termistori superficiali (uno in roccia ed uno in detrito)
Passo dei Salati - Ist. Mosso	Alagna Valsesia	VC	2890	5	7 termistori in pozzo, 2 termistori superficiali (uno in detrito grossolano ed uno in detrito fine), e 2 sensori di umidità del suolo in detrito fine
Passo dei Salati - Corno del Camoscio	Alagna Valsesia	VC	3020	30	23 termistori in pozzo e 2 termistori superficiali (uno in roccia ed uno in detrito)
Colle Sommeiller	Bardonecchia	TO	2990	5, 10 e 100	34 termistori in pozzo e 2 termistori superficiali (uno in roccia ed uno in detrito)
Passo de La Colletta	Bellino	CN	2840	30	23 termistori in pozzo e 2 termistori superficiali (uno in roccia ed uno in detrito)
Passo della Gardetta	Canosio	CN	2490	30	23 termistori in pozzo e 2 termistori superficiali (uno in roccia ed uno in detrito)

Tab. 1 - Elenco dei siti delle stazioni di monitoraggio del permafrost delle Alpi piemontesi, loro caratteristiche e dotazioni strumentali.

© AINEVA

irregolari e differenziate nei vari settori indagati anche se la loro interpretazione è ancora in via di ulteriore definizione.

Le misure effettuate, in alcuni casi concordano con i modelli applicati mentre, in altri casi, appaiono discordi o apparentemente di segnale opposto.

Gli approfondimenti successivi, già effettuati o in programmazione per i prossimi anni, consentiranno di valutare l'attendibilità dei modelli e l'affinamento delle interpretazioni dei dati indiretti.

A ciò contribuiranno in modo sostanziale i dati derivanti dalle reti di monitoraggio termico diretto, sia superficiale che in pozzo, al momento in fase di calibrazione. I primi dati disponibili dalla rete delle 5 stazioni realizzate sulle Alpi piemontesi forniscono un quadro piuttosto disomogeneo, come, peraltro, era nelle aspettative.

Ciò è legato, in generale, alla stabilizzazione termica dei fori in seguito alla fase di perturbazione creata durante la perforazione stessa (cfr. FIG. 8).

A ciò si aggiunge, per alcune delle stazioni installate, anche una fase di riequilibrio in seguito ad interventi di ripristino delle

SITO	VALLE	PROV.	QUOTA (m s.l.m.m.)	SENSORI
M. Rocciamelone	Valle Susa	TO	3000-3200	4 termistori (2 in roccia e 2 in frattura aperta)
Colle Sommeiller	Valle Susa	TO	2990	4 termistori in detrito
Ghiacciaio della Capra	Valle Orco	TO	2650	4 termistori nei rock glacier
Lago Sabbione	Formazza	VB	2575÷2615	10 termistori nei rock glacier e nei depositi circostanti

© AINEVA

Tab. 2 - Elenco dei siti delle stazioni di monitoraggio termico superficiale (GST), loro caratteristiche e dotazioni strumentali.

stazioni stesse in seguito ad infiltrazione di acqua che hanno allagato i pozzi e danneggiato la strumentazione.

Nel 2013 le stazioni sono state rese nuovamente tutte operative e i dati sono al momento ancora in fase di elaborazione al fine di calibrare gli strumenti di misura, di risolvere alcuni problemi tecnici incorsi durante il primo periodo di esercizio e per valutarne il corretto approccio interpretativo.

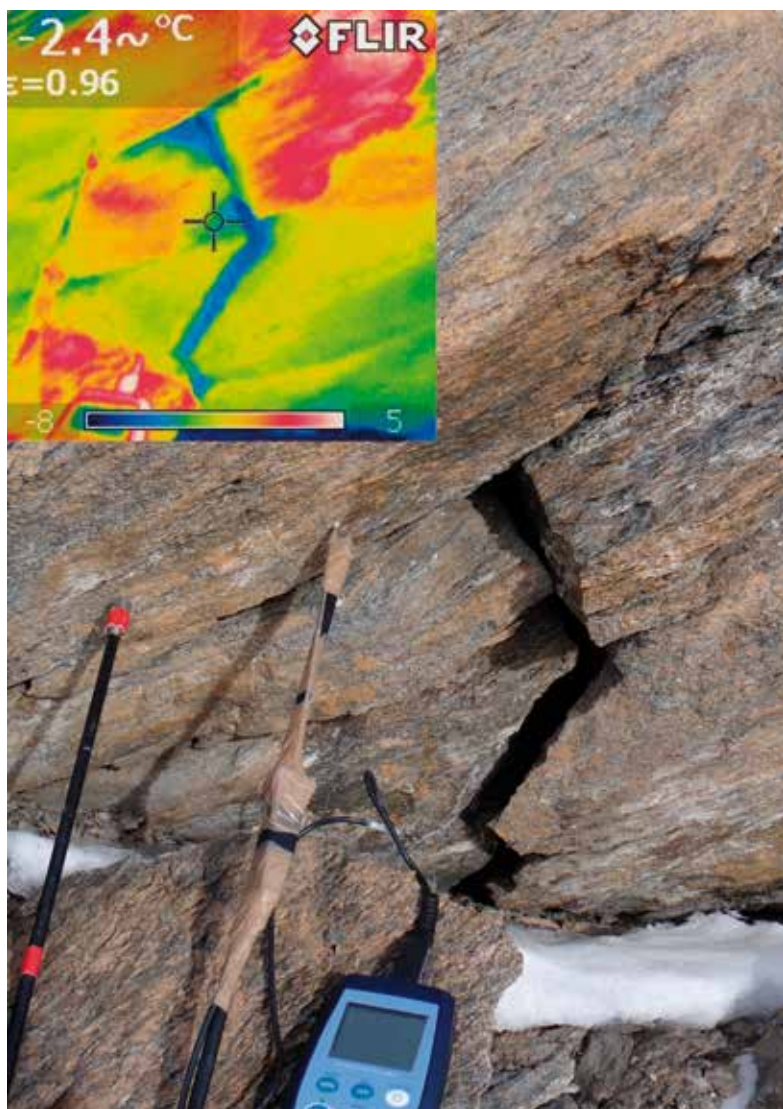
Nel frattempo, le stazioni per il monitoraggio del permafrost delle Alpi piemontesi sono entrate a far parte della rete europea PermaNet e nel prossimo futuro la rete verrà collegata alla rete globale

GTN-P (*Global Terrestrial Network-Permafrost*), istituita dall'IPA (*International Permafrost Association*) nell'ambito del GCOS (*Global Climate Observing System*) per valutare a livello globale gli effetti del cambiamento climatico. Con questo obiettivo, al monitoraggio del permafrost sono stati anche affiancati studi sulle relazioni tra permafrost e risorse idriche in alta quota, finalizzate sia a valutare qualitativamente la risorsa idrica scaturente da circuiti idrogeologici interferenti con acquiferi in condizioni di permafrost, sia per analizzare la risposta alle forzanti climatiche degli ecosistemi acquatici nei settori alto-montani.

Fig. 9 - Installazione di sensori termometrici in roccia collegati ad un mini-datalogger su una parete con apertura metrica sul M. Rocciamelone a circa 3000 m di quota (Provincia di Torino).



Fig. 10 - Termografia (nel riquadro in alto) di un affioramento roccioso con frattura aperta effettuata con termocamera a raggi infrarossi (calcescisti del M. Rocciamelone, Valle Susa, Provincia di Torino) da cui risulta evidente come la frattura sia molto più fredda della roccia circostante (la temperatura riportata nella termografia è riferita al crocicchio del puntatore). La temperatura di comparazione della superficie della roccia è stata rilevata in contemporanea con termistore a contatto (visibile nell'immagine).



Le attività condotte ed i principali risultati ottenuti da ARPA Piemonte nel campo dello studio della criosfera delle Alpi piemontesi vengono sintetizzati nel rapporto annuale pubblicato sul proprio sito istituzionale (www.arpa.piemonte.it) che prossimamente ospiterà una pagina web dedicata specificamente a tale tematica. Una sintesi in lingua inglese viene anche pubblicata annualmente nel *Italian Country Report* dell'IPA (ipa.arcticportal.org). Questa iniziativa che negli ultimi anni si è arricchita di numerosi soggetti e di molteplici attività, ha favorito la discussione per la creazione di un gruppo italiano nel quale far confluire le esperienze relative agli studi dell'ambiente periglaciale e del permafrost. Nel prossimo futuro, la grande sfida sarà quella di analizzare i possibili scenari legati ai rischi naturali in ambiente di alta montagna al fine di valutare le conseguenze e le strategie di mitigazione del rischio legato ai cambiamenti climatici. Ecco perché non solo la comunità scientifica, ma anche le amministrazioni pubbliche che si occupano di pianificazione del territorio, di protezione civile e di gestione del rischio hanno aumentato il proprio interesse verso il permafrost e l'ambiente periglaciale.

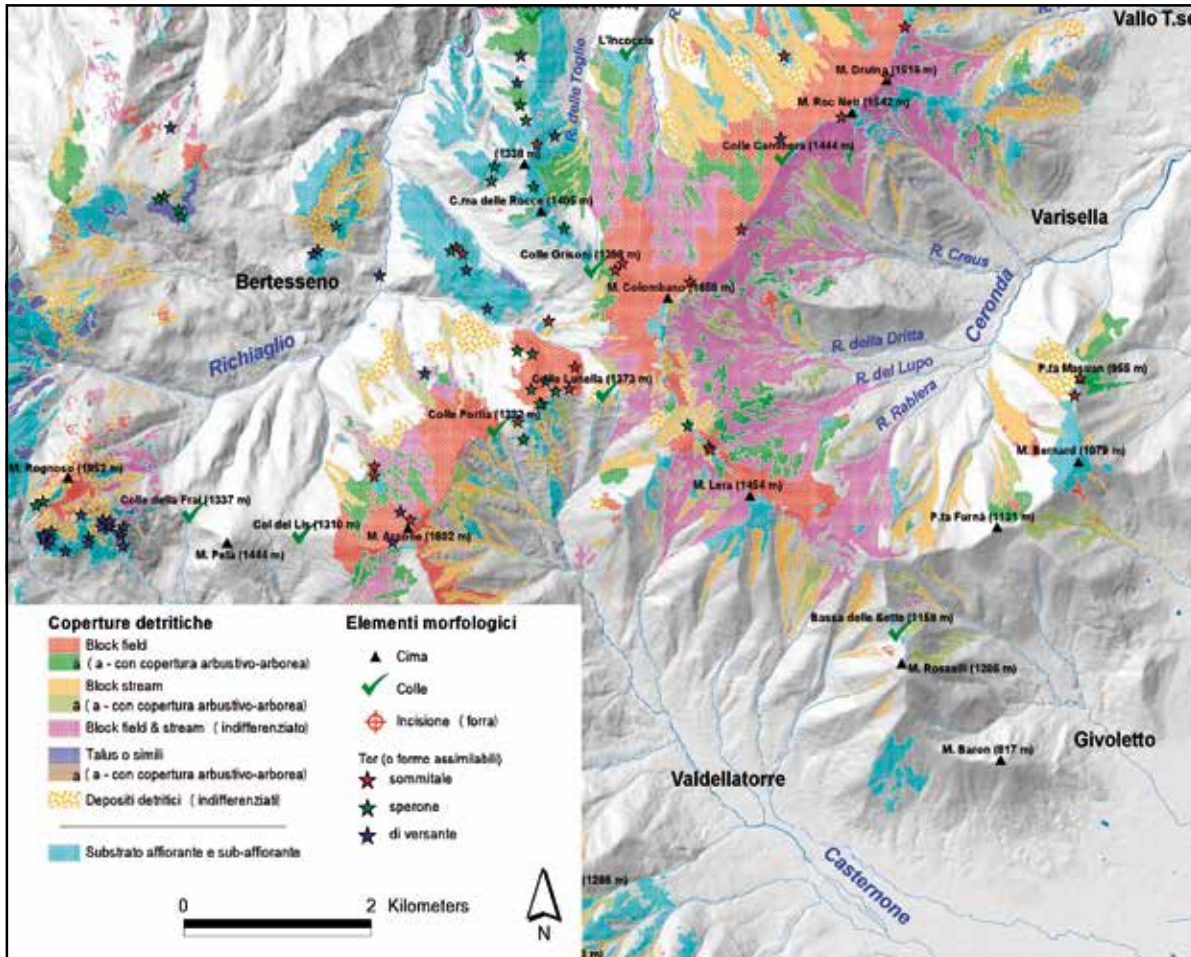


Fig. 11 - Stralcio della "Carta delle coperture detritiche del Complesso Ultrabasico di Lanzo e delle aree limitrofe" riferito ad uno studio geomorfologico di dettaglio di un'area a ridosso della pianura torinese con evidenze di forme e processi periglaciali relitti (Paro, 2011).

Bibliografia

- Brown R.J.E. & Pewè T.L. (1973) – Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review, 1963-1973, in Permafrost – The North American contribution to the Second International Conference, Yakutsk; Washington, D.C., National Academy of Sciences; pp. 71-100
- Colombo N., Fratianni S., Giaccone E. & Paro L. (2013) – Relationships among atmosphere-cryosphere-biosphere in a transitional glacial catchment (Sabbione Lake, North-Western Italian Alps), extended abstract in Proceedings of the International Snow Science Workshop, October 7-11, 2013 (Grenoble-Chamonix Mont Blanc, France); pp. 1201-1207
- Colombo N. (2013) – Relazioni tra ambiente periglaciale e ambiente glaciale. Il caso di studio del bacino dell'Hohsand in Val Formazza (Alpi Lepontine, Italia). Tesi di laurea magistrale interfacoltà in Geografia, Università di Torino (Relatore: S. Fratianni; relatori esterni: L. Paro, L. Perotti), A.A. 2012/2013, inedita; pp. 283 (1 tavola f.t.)
- French H.M. (2007) – The periglacial environment, 3rd Ed., John Wiley & Sons, Chichester; pp. 341
- Giaccone E. (2013) – Interazioni tra clima, permafrost e vegetazione nel bacino del Sabbione (Alta Val Formazza). Tesi di laurea magistrale in Biologia dell'ambiente, Università di Torino (Relatori: S. Fratianni, G. Buffa; relatore esterno: L. Paro), A.A. 2012/2013, inedita; pp. 224
- Guglielmin M. (2009) – Carta di distribuzione del permafrost nelle Alpi piemontesi. Modello PERMAROCK modificato, elaborazione 2008-2009, ArpaPiemonte-UnInsubria, Rapporto interno inedito
- Guglielmin M. & Smiraglia C. (1997) – Catasto dei rock Glacier delle Alpi italiane, Archivio del Comitato Glaciologico Italiano, Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia, Sez. Glaciologia, 3, Torino; pp. 103
- Guglielmin M., Aldighieri B. & Testa B. (2003) – PERMACLIM: a model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observation, Geomorphology, 51; pp. 245-257
- Guglielmin M. & Paro L. (2009) – The first cryosphere map of Piedmont Alps (NW Italy), Abstract of Geoitalia 2009, VII Forum Nazionale della Federazione Italiana Scienze della Terra (Rimini, 9-11/09/2009), Epitome, 3, 2009; p. 163
- Haerli W. (1973) – Die Basis-Temperatur der winterlichen Schneedecke als möglicher Indikator für die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 9; pp. 221-227
- Imhof M. (1996) – Modelling and Verification of the Permafrost Distribution in the Bernese Alps (Western Switzerland), Permafrost and Periglac. Process., 7; pp. 267-280
- Müller S.W. (1943) – Permafrost or permanently frozen ground and related engineering problems, U.S. Engineers Office, Strategic Engineering Study, Special Report No. 62; pp. 136 (Reprinted in 1947, J.W. Edwards, Ann Arbor, Michigan; pp.231).
- Paro L. (2011) – Ruolo dei processi criotici nell'evoluzione del paesaggio alpino: il caso di studio dei block stream del Complesso Ultrabasico di Lanzo (Alpi occidentali italiane) – Relationship between cryotic processes and block streams evolution in the Lanzo Ultrabasic Complex (Western Alps, Italy), ARPA Piemonte, ISBN 978-88-7479-100-2; pp. 209
- Pewè T.L. (1969) – The periglacial environment, in Pewè T.L. [Ed.] – The periglacial environment, McGill-Queen's University Press, Montreal; pp. 1-9
- Ribolini A. (2001) – Active and fossil rock glaciers in the Argentera Massif (Maritime Alps): surface ground temperatures and paleoclimatic significance, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 37; pp. 125-140
- Ribolini A. & Fabre D. (2006) – Permafrost existence in the rock glacier of the Argentera Massif Maritime Alps, Italy, Permafrost and Periglac. Process., 17; pp. 49-63
- Ribolini A., Chelli A., Guglielmin M. & Pappalardo M. (2007) – Relationships between glacier and rock glacier in the Maritime Alps, Schiantala Valley, Italy, Quaternary Research, 68; pp. 353-363
- Titanti D., Bosco F., Mensio L., Ponzzone M. & Lanteri L. (2005) – Instabilità dei versanti in ambiente periglaciale, Neve e Valanghe, 55, agosto 2005; pp. 60-69
- Tricart J. (1968) – Periglacial landscapes, in Fairbridge R.W. [Ed.] – Encyclopaedia of Geomorphology, Reinhold, New York; pp. 829-833
- Von Lozinski W. (1909) – Über die mechanische Verwitterung der Sandsteine im gemäßigten Klima, Bull. Int. Acad. des Sc. de Cracovie cl. des Sc. Math. et Nat., 1