

LO STUDIO DEL PERMAFROST IN VALLE D'AOSTA

LO STATO PERENNE DI CONGELAMENTO DEL SOTTOSUOLO È UN PARAMETRO DA CONTROLLARE PERIODICAMENTE PERCHÉ ESTREMAMENTE SENSIBILE AGLI EFFETTI DEL CAMBIAMENTO CLIMATICO. LA RICERCA SCIENTIFICA STA SVILUPPANDO EFFICACI METODI DI MONITORAGGIO UTILIZZANDO ANCHE I DATI SATELLITARI.

Il permafrost, a differenza degli altri componenti della criosfera come neve e ghiacciai, non è qualcosa di tangibile, ma è uno stato termico di congelamento perenne del sottosuolo che si manifesta alle alte latitudini e alle alte quote, in quei luoghi dove la temperatura annua dell'aria è mediamente inferiore a -3 °C. Questo fenomeno può interessare qualunque tipo di materiale litosferico come terreni, rocce o detriti e può manifestare o meno la presenza di ghiaccio al suo interno a seconda della disponibilità di acqua circolante. Trattandosi di un fenomeno puramente termico, il permafrost è estremamente sensibile agli effetti del cambiamento climatico. Alle alte latitudini la sua degradazione provoca enormi problemi di stabilità dei terreni e libera tonnellate di metano in atmosfera. Nelle regioni montuose le problematiche principali sono associate al rischio idrogeologico e alla stabilità delle infrastrutture di alta quota. Per questi motivi lo studio e il monitoraggio del permafrost è progredito molto negli ultimi due decenni ed è stato inserito dal Gcos (*Global climate observing system*) tra le Ecv (*Essential*

climate variables) da monitorare sistematicamente a livello globale. Nelle aree montuose il permafrost ha caratteristiche del tutto particolari, sensibilmente diverse rispetto a quello delle alte latitudini. In montagna, la topografia e la distribuzione locale delle coperture quaternarie determinano la presenza o assenza del permafrost e le proprietà in termini di temperatura assoluta e inerzia termica generando una variabilità di condizioni estremamente complessa da monitorare (*figura 1*). A partire dalla metà degli anni 2000, l'Arpa Valle d'Aosta ha progressivamente attrezzato una serie di siti di misura per monitorare l'evoluzione a lungo termine del permafrost in diversi contesti: le pareti rocciose, i plateau di alta quota e i ghiacciai rocciosi. Nell'area di Cervinia (Valtournenche, AO) si concentrano attualmente le principali attività di monitoraggio. La particolarità dell'area è che permette di monitorare i tre diversi contesti sopracitati, in un'area di pochi chilometri quadrati, escludendo la distanza geografica dalla lista di forzanti che determinano le peculiari risposte termiche dei tre contesti. In particolare,

le condizioni di parete rocciosa sono monitorate sul Cervino nell'intorno della Capanna Carrel (3.800 m), le condizioni di plateau di alta quota presso il Colle superiore di Cime Bianche (3.100 m) e il *rock glacier* presso il sito Gran Sometta (2.700 m).

Monitoraggio del permafrost

Tra le varie tecniche di monitoraggio utilizzate per studiare il permafrost, il monitoraggio termico è certamente il più diffuso e consolidato nella comunità scientifica. Viene effettuato attraverso la realizzazione di un normale foro geognostico all'interno del quale viene alloggiata una catena di termometri che, collegata a un *datalogger*, registra a intervalli di tempo regolari la temperatura del sottosuolo alle diverse profondità (*figura 2*).

Il monitoraggio termico permette di ricavare i due parametri principali indicati da Gcos come Ecv: lo spessore dello strato attivo (*Alt, Active layer thickness*) e la temperatura del permafrost (*Tsp, Thermal state of permafrost*).



FOTO: PIER B. PANORAMIO - CC BY-SA

Nella *figura 2*, la linea nera (isoterma 0 °C) materializza lo spessore dello strato attivo, il quale varia di anno in anno a seconda delle condizioni climatiche e di innevamento. La profondità massima viene raggiunta normalmente nel tardo autunno, poiché l'onda di calore della stagione estiva impiega alcune settimane per propagarsi in profondità. Il grafico permette di constatare anche la tendenza all'approfondimento dello strato attivo, chiaro segnale dell'attuale stato di degradazione delle condizioni di permafrost.

La *figura 3* mostra invece l'andamento della temperatura del permafrost in profondità, dove l'influenza delle variazioni stagionali esterne è naturalmente filtrata dal substrato. Nella *figura 3a* è riportato l'andamento delle temperature medie mensili alla profondità di 40 m. Analizzando la serie temporale con opportune procedure è possibile quantificare l'entità e la significatività statistica dei trend di riscaldamento attualmente in atto. Applicando la medesima analisi sui sensori collocati alle varie profondità è possibile inoltre osservare come il trend di riscaldamento sia maggiore verso la superficie e diminuisca con la profondità (*figura 3b*); attualmente a Cime Bianche il trend di riscaldamento medio sotto i 10 m di profondità è di circa 0,02 °C/anno (Pogliotti et al., 2015).

Anche sulle pareti rocciose del Cervino, sebbene le temperature in profondità siano più basse rispetto a Cime Bianche per via della differenza di quota, si osserva chiaramente un trend di approfondimento dell'*active layer*. Nel contesto della parete rocciosa, l'assenza di terreni o coperture detritiche e lo scarso accumulo nevoso determinano un accoppiamento diretto tra condizioni climatiche e substrato. Il segnale di temperatura risulta meno "filtrato" e soggetto a una maggiore variabilità interannuale. Tuttavia l'osservazione dei segnali di temperatura sotto i 3-4 metri di propagazione dell'*active layer* consentirà, una volta che la serie temporale di osservazioni sarà abbastanza lunga, di quantificare anche in questo contesto il trend di riscaldamento e degradazione delle condizioni di permafrost.

Sui *rock glaciers* invece il monitoraggio termico ha il solo scopo di appurare la presenza delle condizioni di permafrost e determinare lo spessore dell'eventuale strato attivo. Infatti, l'ingente quantità

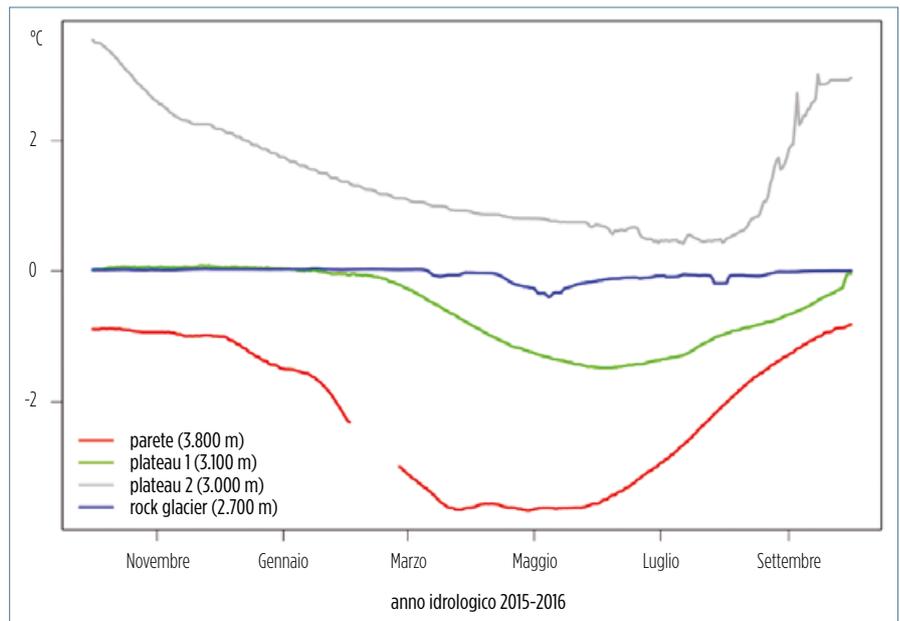


FIG. 1 TEMPERATURA A 4M DI PROFONDITÀ
Il grafico mostra la differente risposta termica del permafrost di montagna nei contesti morfologici della parete rocciosa, del plateau d'alta quota e dei ghiacciai rocciosi (*rock glacier*). Da notare l'ampiezza delle oscillazioni termiche, il tempo di propagazione dell'onda e le temperature assolute. Nel caso dei plateau, posti essenzialmente alla stessa quota, la differenza è data dalla presenza (verde) o assenza (grigio) di una copertura detritica sul *bedrock*. Da notare la pressoché totale assenza di oscillazioni termiche nel *rock glacier*, causata dall'abbondanza di ghiaccio che caratterizza queste forme.

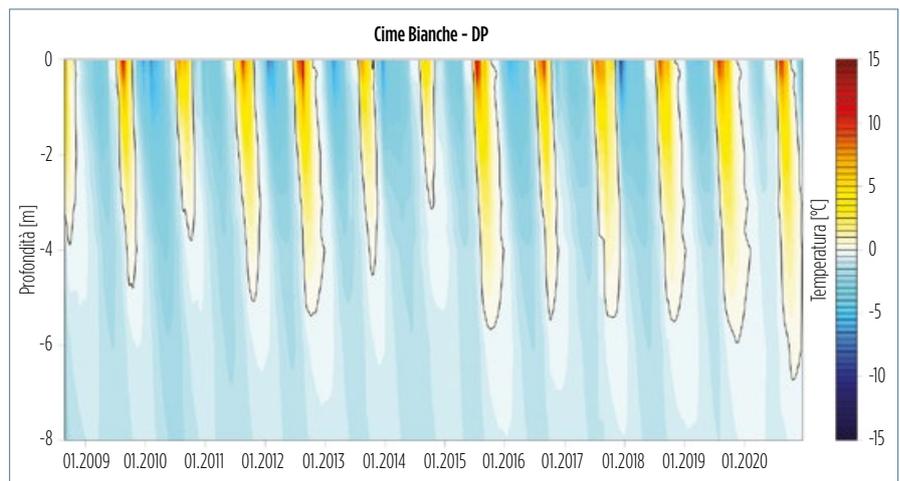


FIG. 2 SITO CIME BIANCHE
Andamento tempo/profondità delle temperature del substrato (scala di colore) presso il sito di Cime Bianche (Conca di Cervinia, 3.100m). La linea nera è l'isoterma 0 °C e materializza lo spessore dello strato attivo, ovvero la profondità che riesce a raggiungere il calore della stagione estiva.

di ghiaccio che si trova normalmente sepolta all'interno dei corpi detritici che costituiscono i *rock glaciers*, impedisce alle temperature di variare, poiché tutta l'energia termica che arriva dalla superficie è utilizzata per i cambiamenti di stato liquido/solido e non determina variazioni di temperatura (*figura 1*). In questi casi per studiare l'impatto dei cambiamenti climatici su questo tipo di permafrost, si ricorre all'utilizzo della geofisica, in particolare della tomografia elettrica, che con opportune configurazioni permette di identificare sulle sezioni di indagine le porzioni di substrato soggette a permafrost e valutarne la variazione di estensione nel tempo (*figura 4*).

I *rock glaciers* inoltre sono soggetti alla forza di gravità e per questo motivo fluiscono lentamente verso valle. Il monitoraggio nel tempo delle loro velocità superficiali, attraverso tecniche di *remote sensing* da drone o satellite, è anch'esso un indicatore indiretto dello stato di degradazione del permafrost sottostante. Alla scala alpina, infatti, si osserva nell'ultimo decennio una generale tendenza all'accelerazione della maggior parte dei *rock glaciers* monitorati. Le serie di osservazioni più lunghe permettono di affermare con ragionevole certezza che tale accelerazione sia una conseguenza diretta del riscaldamento climatico (Permos, 2021).

In alcune regioni delle Alpi così come in altre catene montuose, l'accelerazione di questi corpi detritici pone seri problemi di instabilità e rischio idrogeologico e obbliga le autorità locali a dotarsi di avanzati sistemi di allertamento e monitoraggio in continuo.

Con l'aggravarsi della crisi climatica c'è da aspettarsi che questi e gli altri problemi legati alla progressiva degradazione del permafrost aumentino di frequenza e intensità, costringendo la comunità

scientifica a una ulteriore accelerazione sulle attività di ricerca legate allo studio e monitoraggio di questo fenomeno. Il *remote sensing* da satellite è in questo senso tra gli strumenti più promettenti a disposizione degli addetti ai lavori.

**Umberto Morra di Cella¹,
Paolo Pogliotti²**

1. Arpa Valle d'Aosta
2. Libero professionista

PER APPROFONDIRE

Pogliotti P., Guglielmin M., Cremonese E., Morra di Cella U., Filippa G., Pellet C., Hauck C., 2015, "Warming permafrost and active layer variability at Cime Bianche, Western European Alps", *The Cryosphere*, 9(2), 647-661.

Permos 2021, *Swiss Permafrost Bulletin 2019/2020*, Noetzli, J. and Pellet, C. (eds.), 21 pp., DOI: 10.13093/permos-bull-2021.

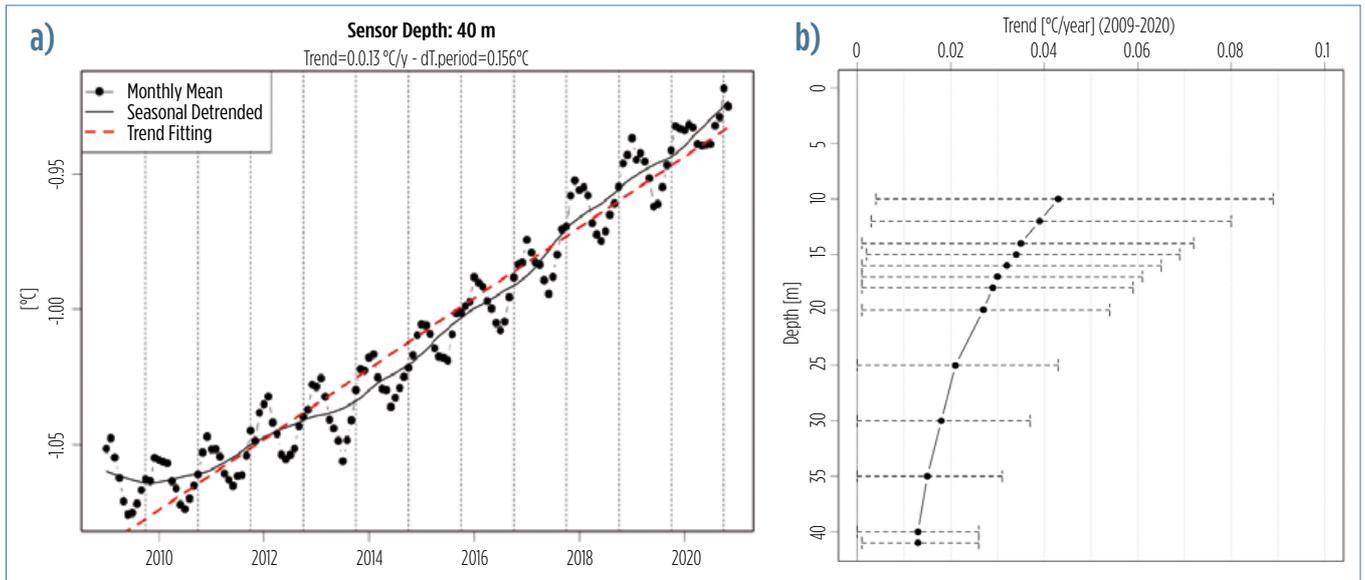


FIG. 3 SITO CIME BIANCHE

a) Temperatura media mensile a 40m di profondità presso il sito di Cime Bianche e analisi del trend di riscaldamento.
b) Valori del trend di riscaldamento calcolato alle varie profondità. Tra 0 e 10 m il trend di riscaldamento non è statisticamente significativo, pertanto non è riportato nel grafico.

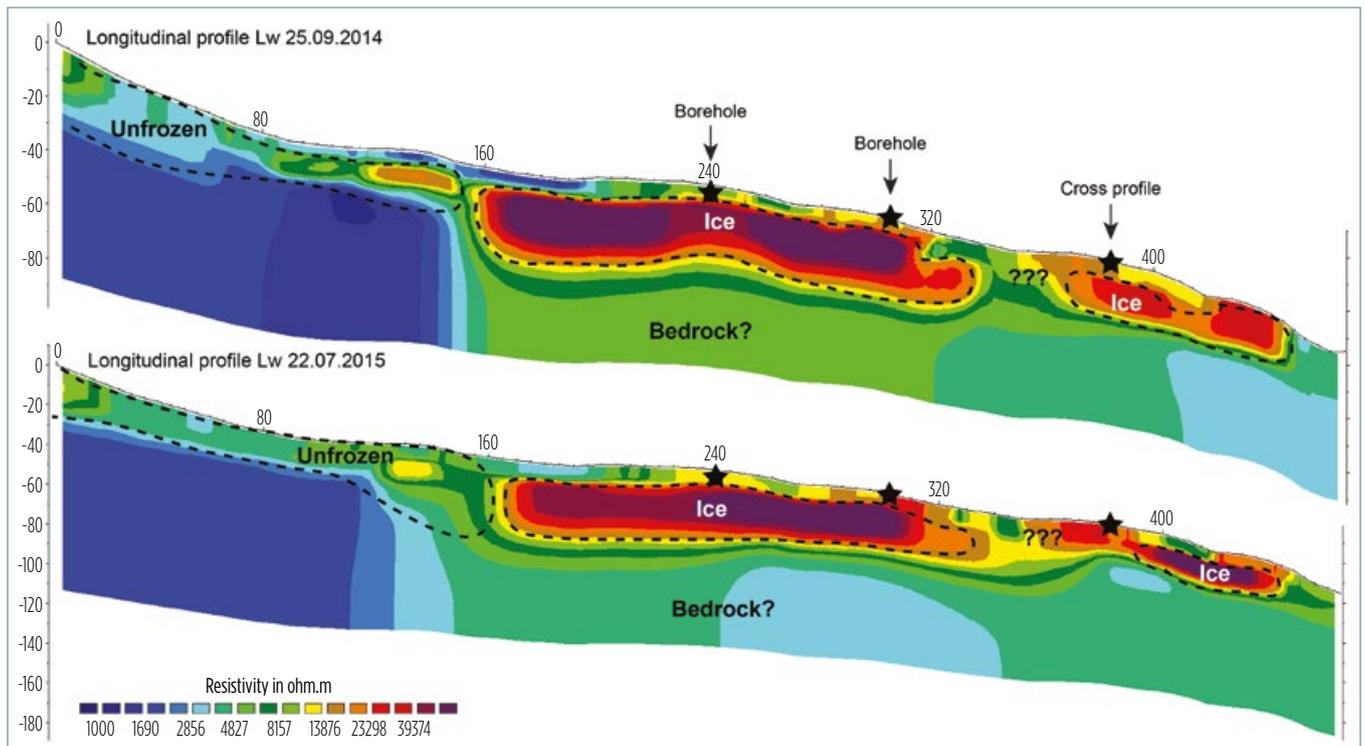


FIG. 4 TOMOGRAFIA ELETTRICA

Tomografia elettrica presso il *rock glacier* Gran Sometta (Conca di Cervinia, 2.700m) nel 2014 (sopra) e 2015 (sotto). Le linee tratteggiate indicano l'interpretazione dei valori di resistività elettrica rispetto alla presenza/assenza di permafrost. È apprezzabile la grande variabilità laterale delle condizioni in questi contesti (Pogliotti et al., 2015 modificato).