

PERMAFROST

nelle ALPI PIEMONTESI

Luca Paro,
Christian Ronchi
Dipartimento Rischi Naturali
e Ambientali - Arpa Piemonte, Torino
Federico Cavallo
Dipartimento di Ingegneria
dell'Ambiente, del Territorio e delle
Infrastrutture - Politecnico di Torino

MODELING THE PERMAFROST IN THE NORTHWESTERN ALPS: an assesment and a projection for years 2030 and 2050

Permafrost, the layer of ground that remains below 0 °C for at least two consecutive years, is an essential element of the cryosphere and an important indicator for assessing the intensity and effects of global warming. The extension and thickness of the permafrost are directly influenced by the climatic conditions and the change taking place causes important consequences on the stability of the slopes and infrastructures and on the equilibrium of the ecosystems. The permafrost monitoring started in the Piedmont Alps since 2009 by Arpa Piemonte allows to observe the occurrence of these changes and to estimate the velocity which these are occurring. The effects of climate change on permafrost can be assessed by using numerical simulation models. The choice of the model is important, since it must correctly represent the current situation and allow to quantitatively estimate the condition of the permafrost between ten, twenty or thirty years, in order to be able to draw significant information on the most likely situation expected in the future. On a regional scale this type of study allows to identify in which areas the most significant consequences are foreseen and, therefore, to prevent with appropriate adaptation and mitigation measures such as, for example, the reinforcement of existing structures and the preparation of territorial plans in order to the rational risk management. In the present work, the GEOtop distributed hydrological model was tested through the application in two high altitude alpine sites where Arpa Piemonte's weather and permafrost stations are present: the Passo del Monte Moro (VB) and Colle Sommeiller (TO). The main goal is to evaluate the efficiency of the numerical model in performing one-dimensional simulations in these areas, to test its sensitivity, to obtain a qualitative estimate of the height of the snowpack and the ground surface temperature for the years 2030 and 2050, highlighting the strengths and limitations of this approach. In order to simulate the future climatic conditions, the outputs of the regional climate model COSMO-CLM were used. The initial and boundary conditions were provided by the General Circulation Model (GCM) EC-EARTH under the radiative scenario IPCC – RCP 4.5. Climate data was provided by the CMCC.

APPLICAZIONE MODELLISTICA E STIME PER IL 2030 E 2050

Il permafrost, ovvero lo strato di terreno che rimane al di sotto di 0°C per almeno due anni consecutivi, è un elemento essenziale della criosfera ed un importante indicatore per valutare l'intensità e gli effetti del riscaldamento globale. L'estensione e lo spessore del permafrost sono direttamente influenzati dalle condizioni climatiche e i cambiamenti in atto causano, in ambito alpino, importanti conseguenze sulla stabilità dei versanti e delle infrastrutture e sull'equilibrio degli ecosistemi.

Il monitoraggio del permafrost in atto nelle Alpi piemontesi a partire dal 2009 a cura di Arpa Piemonte permette di osservare queste modificazioni e di stimare la velocità con la quale si stanno verificando. Gli effetti del Cambiamento Climatico sul permafrost possono essere valutati mediante l'utilizzo di modelli di simulazione numerica. La scelta del modello è importante, poiché deve rappresentare correttamente la situazione attuale e permettere di stimare quantitativamente la condizione del permafrost tra dieci, venti o trent'anni, in modo da poter trarre informazioni significative sulla situazione più probabile attesa nel futuro. A scala regionale questo genere di studi consente di individuare in quali zone sono previste conseguenze più significative e, quindi, intervenire preventivamente con opportune misure di adattamento e mitigazione come, ad esempio, il rinforzo di strutture esistenti e la predisposizione di piani di programmazione territoriale finalizzati ad una gestione razionale del rischio.

Nel presente lavoro è stato testato il modello idrologico distribuito GEOtop attraverso l'applicazione in due siti alpini posti ad alta quota in cui sono presenti stazioni meteorologiche e del permafrost di Arpa Piemonte: il Passo del Monte Moro (VB) e il Colle Sommeiller (TO). L'obiettivo è di valutare l'efficienza del modello numerico scelto nell'eseguire simulazioni monodimensionali in queste aree, saggiarne la sua sensibilità, ottenere una stima qualitativa dell'altezza del manto nevoso e della temperatura superficiale del terreno per gli anni 2030 e 2050, mettendo in evidenza i punti di forza e i limiti di tale approccio. Per la simulazione delle condizioni climatiche future a livello puntuale, si sono utilizzati gli output del modello climatico regionale COSMO-CLM con condizioni iniziali ed al bordo derivanti dal modello GCM EC-EARTH, il tutto nello scenario radiativo IPCC - RCP 4.5. I dati climatici sono stati forniti dal CMCC.



INTRODUZIONE

Il permafrost è lo strato di terreno con temperature $\leq 0^\circ\text{C}$ per almeno due anni consecutivi ed è presente prevalentemente nelle regioni artiche e nelle zone di alta montagna. La sua esistenza dipende direttamente dalle condizioni climatiche e per questo è un importante indicatore del cambiamento climatico. In particolare, nel contesto del riscaldamento globale in atto, lo spessore dello strato attivo (lo strato superficiale che subisce i cicli di gelo e disgelo stagionale) sta aumentando, provocando una conseguente riduzione dello spessore del permafrost. Questa riduzione ha significative ripercussioni negative, in particolare sul ciclo idrologico, sull'equilibrio degli ecosistemi, sul rilascio di gas clima-alteranti in atmosfera e sulla stabilità dei versanti.

Quest'ultimo aspetto è di particolare importanza in aree montane come le Alpi, densamente abitate ed estesamente urbanizzate fino ad alte quote. La frequen-

za dei fenomeni di instabilità innescatisi in alta quota (interessando porzioni di versante di medie e grandi dimensioni) è in aumento negli ultimi anni. Questi fenomeni in molti casi hanno provocato ingenti danni, arrivando a colpire anche le aree antropizzate di fondovalle. La presenza dell'uomo e delle sue opere in questi contesti aumenta notevolmente il livello di rischio, già aggravato dagli effetti del riscaldamento globale che sulle Alpi presenta una tendenza positiva più marcata rispetto ad altre aree del pianeta.

Al fine di valutare gli effetti del riscaldamento atmosferico nelle aree di alta montagna, in particolare sulla criosfera, negli ultimi decenni sono aumentate le attività di monitoraggio inerenti al permafrost. Arpa Piemonte ha avviato tale attività nel 2009, nell'ambito del progetto europeo Alpine Space "Permanet - Permafrost long-term monitoring network" (<http://www.permanet-alpinespace.eu/home.html>), stabilendo nelle Alpi piemontesi 5 siti di monitoraggio. Come noto, il monitoraggio strumentale sul campo comporta una serie di limiti e problematiche metrologiche, topologiche e gestionali che devono essere superate per acquisire conoscenze a livello areale ampio. Ai fini di una corretta gestione del rischio e, quindi, di una minimizzazione dei danni attesi in queste aree, questi limiti possono essere superati attraverso l'utilizzo di modelli di simulazione numerica. Infatti, gli effetti dei cambiamenti climatici sul permafrost possono essere simulati mediante l'implementazione di modelli fisico-basati, in grado di correlare i dati del sistema atmosfera-criosfera-litosfera e di rappresentarne i vari feedback nel modo più aderente possibile alla realtà. Tali modelli, combinati con l'output dei modelli climatici regionali, possono fornire importanti informazioni sullo stato locale del permafrost in determinate finestre temporali future.

L'obiettivo principale del presente lavoro è la valutazione dell'efficienza del modello numerico scelto per analizzare l'an-

damento del permafrost, utilizzando il modello idrologico distribuito "GEOtop", progettato dal gruppo di ricerca dell'Università di Trento (Rigon et al., 2006). Trattandosi di un approccio preliminare applicato per la prima volta in Piemonte, il lavoro è stato principalmente finalizzato ad esplorare il funzionamento del modello a scala locale in due siti (Passo del Monte Moro, VB, e Colle Sommeiller, TO) con diverse simulazioni monodimensionali, verificando i parametri di input, pesandone l'importanza in funzione del ruolo che hanno nel condizionare la temperatura del suolo, e analizzando le basi dati disponibili nei vari contesti geografici, derivanti sia dal monitoraggio sia da modelli climatici per l'applicazione su scenari futuri.

IL MODELLO GEOtop

I modelli che analizzano il permafrost sono un sottoinsieme di una classe più generale di modelli geotermici che valutano principalmente lo stato termico del terreno. Nei modelli di permafrost, infatti, sono due le componenti fondamentali: la prima è il processo annuale di congelamento e scongelamento dello strato attivo, mentre la seconda è lo scambio energetico superficiale.

Gli approcci attualmente adottati hanno consentito di implementare due tipologie principali di modelli: i modelli analitici approssimativi, sviluppati facendo ipotesi di semplificazione, e le tecniche numeriche, impiegate per risolvere problemi complessi accettando errori limitati. Le problematiche legate ai modelli analitici approssimativi, sono:

- i) la scarsa disponibilità delle informazioni di base sul permafrost,
- ii) la forte variabilità interannuale dei valori di temperatura alla base del manto nevoso, e
- iii) la necessità di ricalibrare il modello per ambienti diversi.

Tali limitazioni hanno stimolato il recente sviluppo di modelli numerici transitori, la maggior parte dei quali sono monodimensionali e simulano il profilo verticale di temperatura del suolo. Tra questi



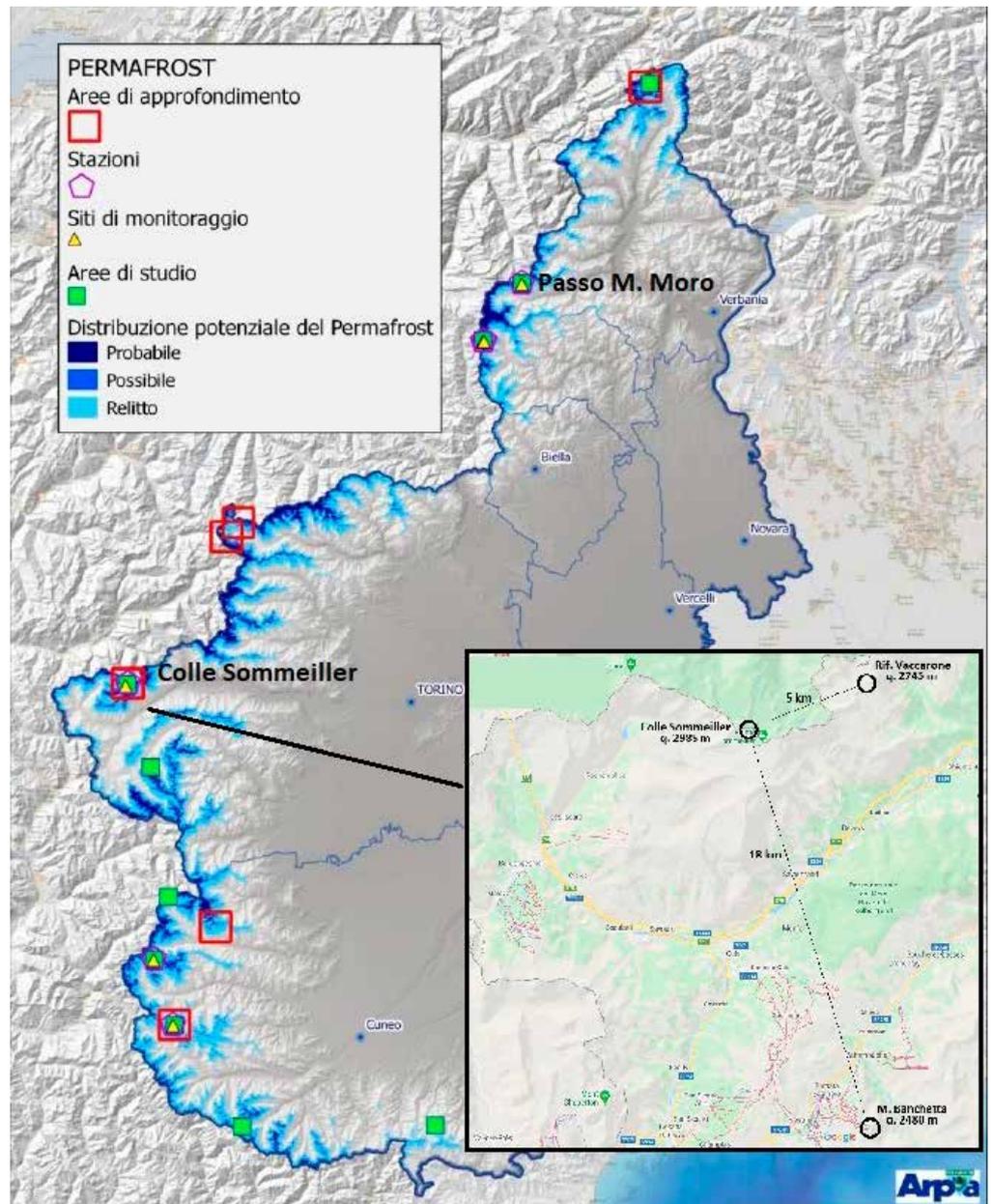
assume particolare significato il modello **GEOtop**, che è un modello idrologico distribuito che analizza l'intero ciclo dell'acqua in un bacino idrografico, progettato specificamente per l'uso nelle aree montane e attualmente adattato anche alla ricerca sul permafrost.

Tale approccio modellistico necessita di una considerevole quantità di dati per il calcolo delle condizioni iniziali e al contorno; tuttavia, l'inserimento dei dati è molto semplice, in quanto segue una procedura standard in cui è richiesto di:

- 1) definire lo spazio modellato impostando un punto iniziale nel tempo e i limiti superiore e inferiore,
- 2) dividere lo spazio continuo in elementi finiti (es. una griglia di nodi) e il tempo continuo in fasi temporali finite,
- 3) specificare le proprietà termiche dei materiali del suolo,
- 4) specificare le condizioni di temperatura, o del flusso di calore, in funzione del tempo (ovvero per ogni fase temporale) per i limiti superiore e inferiore,
- 5) specificare una temperatura iniziale per ogni punto nel profilo.

Il modello GEOtop è concepito per gestire topografie complesse, in quanto fornisce ad ogni punto della griglia di dominio le caratteristiche topografiche del bacino (come quota, pendenza ed esposizione). Le caratteristiche termiche e idrauliche del suolo/roccia, così come la vegetazione, sono fornite in input sotto forma di mappe o di tabelle, insieme a una descrizione verticale degli strati per tenere conto delle stratigrafie eterogenee.

Per ogni fase successiva all'ora di inizio, il modello calcola il nuovo profilo di temperatura in base alla combinazione di proprietà termiche, condizioni antecedenti e al contorno. Grande importanza assume la criosfera, mediante la presenza di neve o ghiaccio, che ha un impatto rilevante sul bilancio energetico della superficie del suolo e sui flussi che lo attraversano, soprattutto in alta quota. Trattandosi di una prima applicazione in via sperimentale sul territorio piemontese, il presente lavoro è stato finalizzato



ad una *SWAT analysis* del modello (nei limiti dell'accessibilità al codice), acquisendo in modo specifico sensibilità nella calibrazione dei parametri di input e verificandone l'efficienza nel simulare due elementi imprescindibili per lo studio del permafrost: l'evoluzione del profilo d'altezza del manto nevoso e la temperatura superficiale del suolo a 2 cm di profondità (*GST, Ground Surface Temperature*).

Sono state svolte inizialmente simulazioni utilizzando i dati meteorologici degli anni passati al fine di valutare se i risultati fossero coerenti con i dati registrati dalle stazioni di monitoraggio del permafrost. La fase di calibrazione è stata effettuata testando i parametri

richiesti dal modello, utilizzando i dati del monitoraggio sia come input per la catena modellistica, sia per il confronto dei risultati ottenuti dalle simulazioni.

Come ulteriore approfondimento per valutare le capacità e potenzialità del modello GEOtop nel simulare una condizione futura, sono stati stimati il manto nevoso e la temperatura superficiale nello scenario climatico RCP 4.5 per gli anni 2030 e 2050, utilizzando i dati meteo-climatici forniti dal modello regionale COSMO-CLM.

CASI STUDIO

Per l'applicazione del modello sono state prese in esame due aree campione in cui sono presenti stazioni di monitoraggio

Fig. 1 - Mappa riassuntiva per lo studio del permafrost sul territorio Piemontese con indicati i due siti presi in esame in questo lavoro.

meteorologico e del permafrost della rete di Arpa Piemonte. I siti (Fig.1) sono stati opportunamente scelti in funzione delle diverse caratteristiche strumentali e di dataset in modo da valutare l'efficienza del modello con differenti qualità e quantità di dati misurati in campo. I siti indagati sono:

il **Passo del M. Moro (PMM)**, situato al confine tra Piemonte e Svizzera nell'alta Valle Anzasca (quota 2870 m slm, Comune di Macugnaga, VB);

il **Colle Sommeiller (CS)**, situato al confine tra Piemonte e Francia nell'alta Val di Susa (quota 2985 m slm, Comune di Bardonecchia, TO).

Nel sito PMM è stato effettuato lo studio di sensitività sul modello, in quanto la stazione meteorologica dispone di tutti i parametri meteo ad alta frequenza richiesti dal modello a partire dal 1988: temperatura dell'aria, precipitazione nevosa e liquida, umidità relativa, radiazione solare globale, intensità e direzione del vento. La stazione di monitoraggio del permafrost dispone di dati temperatura del substrato validi dal 2011 al 2014 fino a 30 m di profondità. La stazione CS, invece, rappresenta bene le condizioni più comuni di monitoraggio nelle aree montane, in quanto la stazione meteorologica è strumentata con sensori presenti in molte stazioni di alta quota (nivometro e termo-igrometro aria).

I parametri mancanti sono stati integrati ricorrendo ad altre due stazioni meteorologiche di Arpa Piemonte ubicate in siti confrontabili dal punto di vista microclimatico col sito CS: la stazione del Rifugio Vaccarone (per i dati anemometrici) e di Sestriere Banchetta (per i dati di radiazione solare). La stazione di

monitoraggio del permafrost dispone di dati validi di temperatura del sottosuolo dal 2012 fino a 100 m di profondità, consentendo un adeguato riscontro tra i dati misurati in situ e i valori simulati.

APPLICAZIONE DEL MODELLO ED ANALISI DEI RISULTATI

Per gli scopi inerenti questo lavoro si sono costruiti i dataset meteorologici necessari utilizzando i dati a partire dal 2009, assemblati in serie a cadenza oraria. Le prime simulazioni evidenziavano una sovrastima dell'altezza del manto nevoso ed una conseguente sovrastima delle temperature GST.

È stato quindi necessario calibrare alcuni parametri (in particolare la radiazione solare, la precipitazione liquida e i valori di conduttività e capacità termica degli strati di suolo) al fine di raggiungere un risultato soddisfacente. La procedura di calibrazione è stata strutturata in un ciclo iterativo in cui venivano analizzate tutte le possibili configurazioni dei parametri di input. Al termine del processo, venivano definiti i parametri del dataset di input del modello quando il profilo simulato e quello misurato mostravano la maggiore correlazione, la minore differenza media e la minore deviazione standard.

Modellazione del manto nevoso

In considerazione della sua importanza nel definire il bilancio energetico della superficie del terreno, particolare attenzione è stata posta alla corretta modellizzazione del profilo del manto nevoso. Il modello GEOtop non prevede come dato di input la misura nivometrica strumentale (qualora esistente, come

nei casi qui considerati) ma ripartisce la precipitazione fornitagli in ingresso tra precipitazione liquida e precipitazione nevosa usando la regola dell'U.S. Army Corps of Engineers (1956):

se

$$T_a > T_1 \quad P_p = P \quad P_n = P - P_p$$

se

$$T_2 < T_a < T_1 \quad P_p = \frac{T_a - T_2}{T_1 - T_2} \quad P_n = P - P_p$$

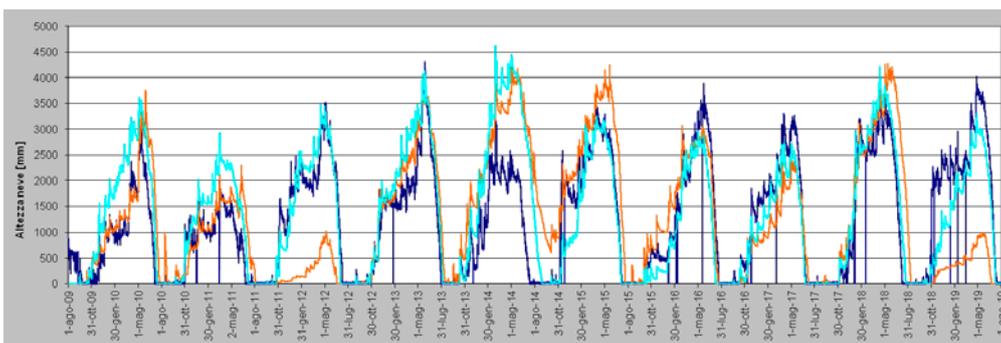
se

$$T_a < T_1 \quad P_p = 0 \quad P_n = P - P_p$$

dove P è la precipitazione fornita in input, P_p è la precipitazione liquida, P_n è la precipitazione nevosa, T_a è la temperatura dell'aria fornita in input, T_1 è la temperatura soglia dell'aria al di sopra della quale tutta la precipitazione è piovosa (di default è uguale a 3 °C), T_2 è la temperatura soglia dell'aria al di sotto della quale tutta la precipitazione è nevosa (di default è uguale a -1 °C).

Oltre al dato di precipitazione derivante dal pluviometro riscaldato (peraltro assente nel sito CS) sono state effettuate simulazioni utilizzando come dato di input la trasformazione sintetica della neve fresca in acqua equivalente (SWE). Si sono quindi eseguite diverse stime di densità media della neve fresca e, al termine delle simulazioni, si è osservata la maggiore correlazione per valori di densità compresi tra 50 e 80 kg/m³. Come si può osservare in Fig. 2, seppur con alcune imprecisioni il profilo del manto nevoso simulato è risultato rappresentativo del profilo misurato, soprattutto utilizzando come input la SWE. Anche nell'inverno 2013-2014 in cui entrambe le simulazioni risultano particolarmente sovrastimate, la SWE consente almeno di valutare un periodo di assenza di neve al suolo che il dato di precipitazione non riesce a simulare. Infatti, oltre all'altezza del manto nevoso, è stata prestata particolare attenzione anche alla permanenza della neve al suolo. Come noto, l'andamento termico del suolo e del sottosuolo risente in modo significativo non solo dell'effetto isolante esercitato da uno spessore consistente di neve (indicativamente \geq

Fig. 2 - Confronto tra le diverse altezze del manto nevoso da agosto 2009 a luglio 2019 al Passo del M. Moro. In blu la neve misurata dal nivometro ultrasonico della stazione meteorologica, in arancione l'altezza simulata partendo dai dati di precipitazione liquida forniti dal pluviometro riscaldato, in azzurro l'altezza simulata partendo dalla trasformazione in SWE della neve fresca. Tab.1: Parametri intrinseci del materiale costituente il terreno utilizzati nella simulazione.



Sito/roccia	Permeabilità [mm/s]	Conducibilità term. [W/mK]	Capacità term. [MJ/m ³ K]
PMM - gneiss	1*10 ⁻⁶	2,1+3,4	1,6+2,7
CS - detrito	10	0,4+2,5	1,3+2,6
CS – carniola alterata	10	1,8	2,3
CS – carniola compatta	1*10 ⁻²	2,1+2,9	2,1+2,4
CS - quarziti	1*10 ⁻³	5+6	2,1

Tab. 1 - Parametri intrinseci del materiale costituente il terreno utilizzati nella simulazione.



Fig. 3 - Confronto tra i dati misurati e simulati dell'altezza del manto nevoso e della temperatura GST da agosto 2012 a settembre 2013 al Passo del M. Moro.

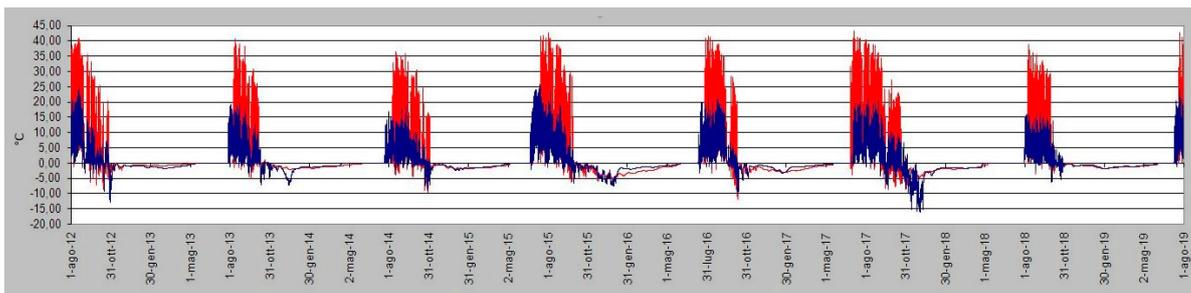


Fig. 4 - Confronto tra i dati misurati (in blu) e simulati (in rosso) della temperatura GST da agosto 2012 a luglio 2019 al Colle Sommeiller.

80-100 cm) nei confronti delle forzanti atmosferiche, ma anche della presenza della neve soprattutto durante la fase di fusione primaverile-estiva. Durante questo periodo, l'acqua di infiltrazione che umidifica la neve, raggiunge la superficie del suolo, portando la sua temperatura prossima a 0 °C per tutto il periodo di fusione (mediamente da maggio a luglio).

Modellazione della temperatura nel suolo (GST)

Per la modellazione della temperatura del suolo/sottosuolo, il modello GEOTop considera alcuni parametri intrinseci del materiale costituente il terreno (conducibilità e capacità termica, permeabilità) ed alcuni parametri di contorno che definiscono le condizioni iniziali (quali la suddivisione del sottosuolo in livelli di spessore definito, la temperatura iniziale

di ciascun livello, il flusso geotermico). Grazie ai dati del monitoraggio del permafrost ed ai dati geologico-tecnici ottenuti durante la perforazione dei pozzi in cui sono inserite le catene termometriche, gran parte di queste informazioni erano note o stimabili per le due stazioni considerate nel presente lavoro. La stratigrafia del pozzo del sito PMM è costituita prevalentemente da gneiss compatto mentre nel sito CS la stratigrafia è leggermente più complessa, con i primi decimetri costituiti da una coltre sabbioso-ghiaiosa, i successivi 50 m costituiti da una breccia tettonica con prevalente cemento carbonatico ("carniola" s.l.), e gli ultimi 50 m costituiti da quarziti compatte più o meno fratturate. I parametri utilizzati per le simulazioni sono desunti da letteratura e sono riportati in tab. 1.

Le simulazioni modellistiche condotte nel sito PMM hanno dato buoni risultati, talora con ottime correlazioni sia per l'altezza di manto nevoso, sia per la temperatura GST (come nell'anno 2012-'13 riportato in Fig. 3). Nel sito CS, invece, le medesime applicazioni nei periodi caratterizzati da assenza di neve restituiscono risultati con significative sovrastime (anche di oltre 15 °C) rispetto ai dati di temperatura GST misurati (Fig. 4).

Al fine di comprendere i motivi della generazione di tali scostamenti, sono state effettuate numerose calibrazioni, dettagliando ulteriormente la stratigrafia del substrato e analizzando con maggiore attenzione i parametri di input, tenuto conto che i dati anemometrici e di radiazione solare non sono riferiti al sito specifico preso in considerazione. Dai risultati di tali applicazioni è emerso

GLACIOLOGIA

che il modello sovrastima i dati misurati proporzionalmente alla intensità di irraggiamento. In particolare, dall'analisi oraria della distribuzione della radiazione solare, risulta che gli scostamenti maggiori (compresi tra 5,7 e 17,5°C) tra le temperature GST misurata/simulata si verificano tra le 8:00 e le 17:00 nei periodi senza neve al suolo (agosto-novembre), per valori di radiazione superiori a 100 W/m².

SCENARI CLIMATICI PER IL 2030 ED IL 2050

Utilizzando un modello climatico regionale è stata eseguita una simulazione meteo-climatica al fine di ottenere i dati meteorologici necessari per le due località in esame da utilizzare come dato di input per le applicazioni del modello GEOTop ai fini predittivi per gli anni 2030 e 2050, intesi come "anno medio nel quinquennio centrato rispettivamente nel 2030 e 2050".

Il Modello Climatico Regionale scelto è COSMO CLM, un modello climatico non idrostatico di predizione del sistema atmosferico, sviluppato dal CMCC nell'ambito del Consorzio CLM-Community, utilizzato per il *downscaling* dinamico del Modello Climatico Globale EC-EARTH che fornisce condizioni iniziali e al bordo del dominio regionale. Il dominio spaziale utilizzato è quello del progetto di cooperazione

transfrontaliera tra Francia e Italia Interreg ALCOTRA-CLIMAERA ed avente una risoluzione spaziale di 8 km. I dati meteorologici ottenuti dalla simulazione climatica sono stati modellati all'interno di uno specifico scenario climatico, ovvero l'RCP 4.5. Gli scenari RCP (*Representative Concentration Pathways*), a differenza dei SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*), sono denominati come percorsi (*pathway*) per sottolineare che sono delle proiezioni future nelle quali viene "forzato" l'obiettivo di stabilizzare la concentrazione di gas serra, in particolare la CO₂, a un livello specifico entro il 2100 (IPCC, 2013). In particolare, lo scenario scelto per questo lavoro ovvero l'RCP 4.5, prevede un futuro nel quale, a livello globale, la forzante radiativa conseguente alle concentrazioni di gas climalteranti emesse in atmosfera raggiungerà il suo picco attorno al 2040 per poi stabilizzarsi. In tale scenario, nel 2100 la forzante radiativa ammonterà a +4,5 W/m², rispetto ai valori dell'anno base 1850.

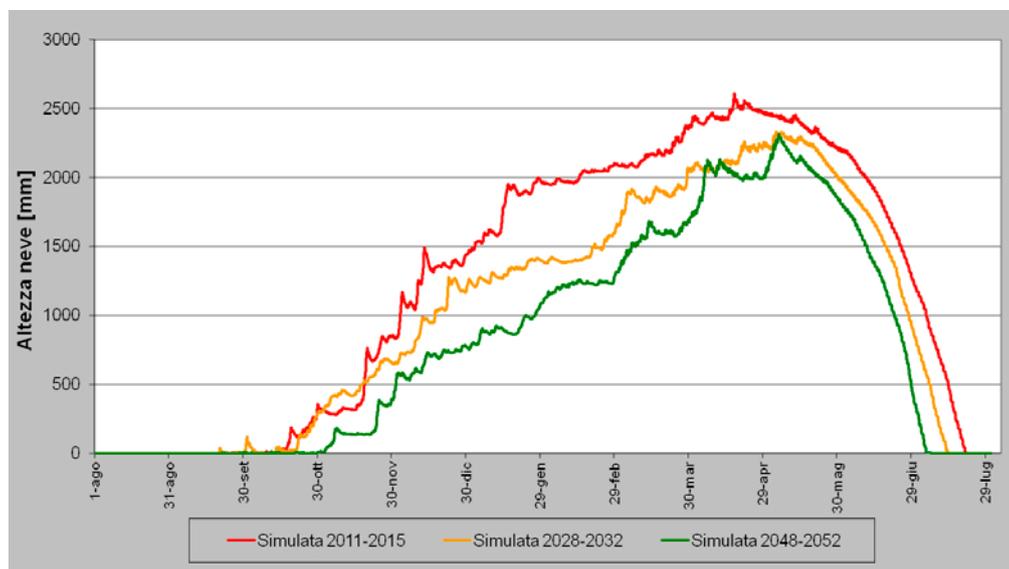
La simulazione climatica nel presente lavoro è stata eseguita per i quinquenni 2011÷2015 (*run* di controllo), 2028÷2032 e 2048÷2052. I dati ottenuti sono quindi stati mediati in modo da ottenere un anno rappresentativo dell'intero quinquennio (2013, 2030 e 2050). Considerata la non linearità connessa ai fenomeni climatici, si è valutata preliminarmente la validità nell'utilizzare

un anno medio come rappresentativo di un periodo di 5 anni. Si è quindi eseguita una verifica nel periodo di controllo (2013) sulla coerenza tra le simulazioni dal modello climatico ed i dati misurati dalle stazioni meteorologiche nei siti PMM e CS. Tale verifica ha individuato una sovrastima nei dati di precipitazione liquida che è stata corretta, mediante *bias correction*, anche nei periodi 2030 e 2050.

I dati meteorologici così ottenuti sono stati quindi forniti come input al modello GEOTop, che ha eseguito la simulazione del profilo di temperatura a 2 cm di profondità (GST) e del manto nevoso. Si sottolinea che, mentre può avere senso valutare quantitativamente l'altezza del manto nevoso prevista dal momento che i dati a disposizione per effettuare la previsione sono esclusivamente meteorologici, questo non vale per la stima della temperatura GST poiché non si dispone al momento di dati riguardanti la temperatura iniziale del suolo nel periodo di inizio della simulazione. Per questo motivo i risultati sono stati analizzati esclusivamente in maniera qualitativa. Le simulazioni indicano una diminuzione progressiva dell'altezza del manto nevoso (circa -11% nel sito PMM e -4,6% nel sito CS) e del periodo di permanenza di neve al suolo nei prossimi decenni (Fig. 5). Infatti, nel 2050 l'isolamento termico del suolo (con spessori di almeno 80-100 cm) si raggiungerà circa 30-40 giorni più tardi rispetto ai periodi precedenti, mentre la completa fusione estiva terminerà con circa 20 giorni di anticipo.

Questa evoluzione del manto nevoso si ripercuoterà sulle temperature del suolo con una tendenza alla diminuzione della temperatura negli strati superficiali nel periodo invernale, stimata nell'ordine di circa -2 °C per il 2050 (Fig. 6). Ovviamente, tali considerazioni non indicano che il permafrost potrà aggradersi in quanto le temperature estive saranno più elevate dei periodi precedenti ed il bilancio energetico annuale del terreno sarà positivo.

Fig. 5 - Altezza media del manto nevoso simulata utilizzando i dati meteorologici mediati del quinquennio 2011/2015 (linea rossa), 2028/2032 (linea arancione) e 2048/2052 (linea verde) al Passo del M. Moro.



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E PROSPETTIVE FUTURE

L'applicazione del modello numerico GEOtop in due siti delle Alpi piemontesi ha dimostrato la sua generale validità, in grado di fornire utili indicazioni sia per la valutazione idrologica del bacino ma anche per le considerazioni di carattere energetico del suolo e sottosuolo. Tuttavia, a valle della sperimentazione effettuata, restano alcuni nodi importanti da sciogliere prima di poter procedere in modo sistematico ad una applicazione del modello su territori estesi.

Una prima difficoltà riscontrata è insita nel codice del modello, non del tutto esplicitato, per cui alcuni parametri di input devono essere calibrati in modo empirico, attraverso numerosi passaggi iterativi. Un altro importante ostacolo è rappresentato dal modello di simulazione del manto nevoso che non accetta come dato di input le misure nivometriche, costringendo l'operatore a forzare i dataset disponibili aumentando il grado di incertezza anche in fase di verifica del modello stesso. Infine, uno degli aspetti principali che restano irrisolti nel presente lavoro, nonostante i numerosi sforzi effettuati per raggiungere l'obiettivo, riguarda la corretta trattazione sia della radiazione solare sia della parametrizzazione del sottosuolo.

Va sottolineato, comunque, che la modellizzazione degli scambi energetici tra litosfera e atmosfera non è un obiettivo semplice da raggiungere. Dunque, quanto sopra riportato non è una critica nei confronti di coloro che hanno fatto un grande lavoro nel realizzare e implementare questo modello ma è un suggerimento a tenere in considerazione questi aspetti che sono emersi nel corso del presente lavoro per le future implementazioni di GEOtop.

In considerazione dei risultati positivi emersi da questa prima applicazione, Arpa Piemonte estenderà le analisi modellistiche a zone più ampie del territorio

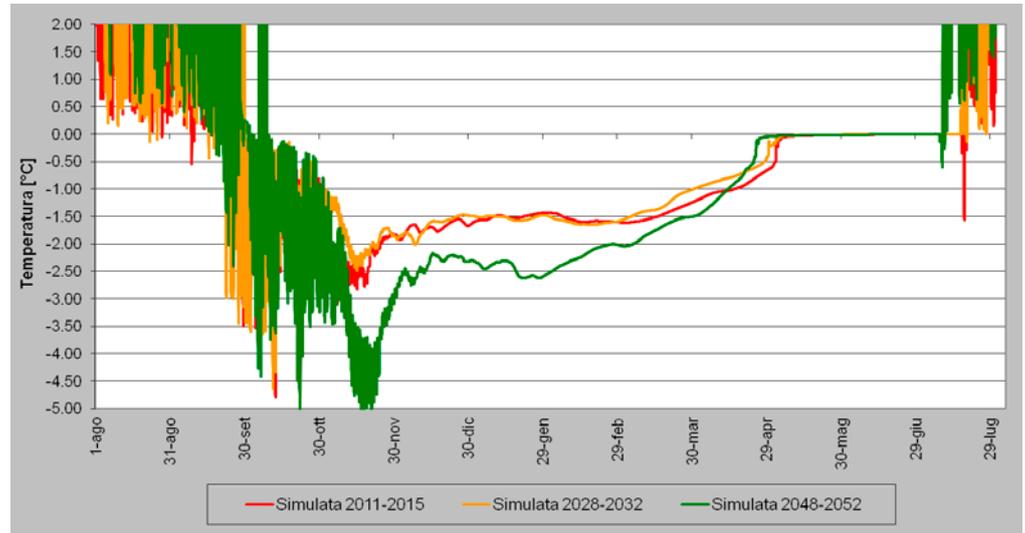


Fig. 6 - Dettaglio per il periodo con neve al suolo della temperatura GST simulata utilizzando i dati meteo-climatici mediati del quinquennio 2011/2015 (linea rossa), 2028/2032 (linea arancione) e 2048/2052 (linea verde) al Colle Sommeiller.

alpino piemontese, con l'obiettivo di:

- 1) ridurre le incertezze sui parametri riscontrate finora,
- 2) applicare il modello sia su ampi areali sia sui volumi dei ammassi rocciosi,
- 3) ottenere stime sul bilancio energetico del sottosuolo ai fini predittivi applicando scenari climatici validi per la nostra regione. Dal punto di vista della simulazione climatica inoltre potrebbe essere maggiormente indicativo l'utilizzo di un ensemble di modelli climatici su differenti scenari (progetto EURO-CORDEX),

piuttosto che affidarsi ad un unico modello su un singolo scenario, a patto ovviamente di poter disporre di dati climatici ad alta risoluzione spaziale e con cadenza temporale inferiore al giorno. L'obiettivo a lungo termine, infatti, è di individuare le aree in cui la degradazione del permafrost nel prossimo futuro causato del cambiamento climatico potrà essere fonte di importanti conseguenze per il territorio antropizzato, al fine di intervenire preventivamente con misure di adattamento e mitigazione del rischio.

Bibliografia

- Biskaborn K.b., Smith S.I., Noetzi J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.a., Schoeneich P., Romanovsky V.e., Lewkowicz A.g., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.I., Christiansen H.h, Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmuller B., Grosse G., Gugliemin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johansson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kroger T., Lambiel C., Lanckman J, Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.b.k., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Alexander V., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H., 2019, Permafrost is warming at a global scale, Nature Communications, Vol. 10, Issue 1.
- Brodzik M. J., 2004, The relationship of snow water equivalent to snow depth and density, www.webarchiv.ethz.ch, pp. 1-2.
- Cugerone K., Allamano P., Salandin A., Barbero S., 2012, Stima della Precipitazione in Siti di Alta Quota, Neve e Valanghe, n°77, pp. 36-43.
- Hoelzle M., Mittaz C., Etzelmuller B., Haeberli W., 2001, Surface energy fluxes and distribution models relating to permafrost in European Mountain areas: an overview of current developments, Permafrost and Periglacial Processes, Vol 12, pp. 53-68.
- IPCC, 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M.], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Paro L., Gugliemin M., 2013, Sintesi e primi risultati delle attività di Arpa Piemonte su ambiente periglaciale e permafrost nelle Alpi piemontesi, Neve e Valanghe n. 80, AINEVA, pp. 50-59
- Rigon R., Bertoldi G., Over T.m., 2006, GEOtop: A distributed hydrological model with coupled water and energy budgets, Journal of Hydrometeorology 7(3), pp. 371-388.
- Schoeneich P., 2011, Guide lines for monitoring GST: Ground Surface Temperature, PermaNET, Version 2.