

Zeitschrift: Bollettino della Società ticinese di scienze naturali
Herausgeber: Società ticinese di scienze naturali
Band: 108 (2020)

Artikel: Il permafrost nelle Alpi ticinesi : ripartizione potenziale attuale e futura
Autor: Deluigi, Nicola / Scapozza, Cristian
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1002962>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 31.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

OSPITE

Il permafrost nelle Alpi Ticinesi: ripartizione potenziale attuale e futura

Nicola Deluigi^{1,2*} e Cristian Scapozza²

¹ Stream Biofilm and Ecosystem Research Laboratory, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL),
1015 Losanna, Svizzera (affiliazione attuale)

² Istituto scienze della Terra (IST), Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI),
6952 Canobbio, Svizzera

* *nicola.deluigi@epfl.ch*

Riassunto: Una conoscenza precisa della ripartizione del permafrost alpino è fondamentale nella valutazione dell'impatto della sua degradazione quale conseguenza dei cambiamenti climatici. La disponibilità crescente di dati spaziali e osservazioni dello stato termico del suolo nelle Alpi Ticinesi ha permesso l'applicazione dell'algoritmo delle foreste casuali a un set di dati composto da 15 variabili predittive e 134'500 osservazioni di terreno indicative della presenza o dell'assenza di permafrost. L'interrelazione statistica tra tali osservazioni e i relativi fattori di controllo è stata extrapolata automaticamente senza dover ricorrere ad alcun set di parametri empirici prestabiliti. La carta della ripartizione potenziale del permafrost delle Alpi Ticinesi si rivela conforme alle reali osservazioni di terreno e dimostra che l'impiego di variabili ambientali che ben rappresentano la microtopografia del terreno abbia favorito la previsione della sua estrema variabilità spaziale. Mediante un approccio lineare è inoltre stata ottenuta una carta dell'evoluzione delle probabilità di occorrenza che tiene conto dell'aumento medio della temperatura suggerito dagli scenari climatici CH2018 e che indica la quasi scomparsa del permafrost delle Alpi Ticinesi entro la fine del trentennio 2020-2049.

Parole chiave: Alpi Ticinesi, apprendimento automatico, cartografia, modellazione del permafrost, scenari climatici CH2018

Permafrost in the Ticino Alps: current and future potential distribution

Abstract: A precise knowledge of the Alpine permafrost distribution is crucial in assessing the impact of climate change on its degradation. The increasing availability of spatial data and observations of the thermal state of the ground in the Ticino Alps has allowed the application of the random forest algorithm to a dataset composed of 15 predictive variables and 134,500 field observations, indicative of the presence or absence of permafrost. The interrelation between these observations and the related control factors was automatically extrapolated without recurring to any set of predetermined empirical parameters. The map of the potential permafrost distribution of the Ticino Alps proved to be in line with real field observations and the use of environmental variables that well represent the microtopography favoured the prediction of the permafrost heterogeneous distribution at the micro geographical scale. By means of a deductive approach, an evolution map of the probability of occurrence was also obtained, considering the average temperature increase suggested by the CH2018 climate scenarios and showing that by the end of the 2020-2049 period almost all the permafrost in the Ticino Alps will be affected by climate change and will most likely be completely disappeared.

Keywords: CH2018 climatic scenarios, machine learning, mapping, permafrost modeling, Ticino Alps

INTRODUZIONE

Nel corso del 21° secolo la criosfera alpina subirà profonde modifiche in seguito all'aumento della temperatura dell'aria e alle modifiche dei regimi delle precipitazioni (CH2018 2018). Tra le componenti della criosfera, anche il permafrost di montagna, terreno con temperature uguali o inferiori a 0°C per due anni consecutivi (Washburn 1979), è soggetto a una degradazione termica quale conseguenza del cambiamento climatico (Etzelmüller & Frauenfelder 2009; Harris et al. 2009; Beniston et al. 2018). Un riscaldamento del

terreno nei settori dove il permafrost è potenzialmente presente può infatti avere vari effetti sulla stabilità dei versanti, quali ad esempio un aumento delle cadute di massi (Gruber & Haeberli 2007; Ravanel et al. 2010) o un'accelerazione della velocità di scorrimento dei ghiacciai rocciosi (Arenson and Springman 2005; Kääb et al. 2007; Roer et al. 2008; PERMOS 2016). Una rappresentazione spaziale dettagliata della ripartizione del fenomeno permafrost è dunque fondamentale per capire quali settori saranno destinati a subire un'evoluzione più repentina nei prossimi decenni. Come regola generale, a livello regionale, l'altitudine alla qua-

le è presente una temperatura media annua dell'aria (MAAT) di -3°C può essere considerata una soglia limite per confinare i terreni dove è attualmente presente un permafrost discontinuo (Gruber & Haeberli 2009). Molti studi e progetti di monitoraggio (per es. Harris et al. 2009; Staub et al. 2015) hanno tuttavia rivelato la complessità del permafrost alpino alla scala locale, sia in termini di ripartizione spaziale sia di sensibilità al riscaldamento attuale. Il permafrost risulta infatti essere distribuito in modo estremamente discontinuo all'interno della fascia periglaciale alpina. Ciò significa che ampie aree non sono gelate nonostante la presenza di condizioni topo-climatiche teoricamente favorevoli (vedi ad esempio Scapozza et al. 2011a; Staub et al. 2015). Una chiara rappresentazione di come il fenomeno si distribuisce spazialmente nei depositi sciolti è difficile da ottenere a causa dei molteplici fattori locali che ne controllano l'eterogenea occorrenza. Sebbene i modelli fisici siano in grado di simulare in modo efficiente lo stato termico del terreno alla scala puntuale (1D, ad esempio un pozzo di trivellazione; Marmy et al. 2016), essi non sono adattati alla cartografia della ripartizione del permafrost di montagna (2D e 3D) a causa dell'elevato numero e dell'elevata variabilità spaziale dei dati di input necessari. Nonostante una ripartizione potenziale del permafrost sia già stata ottenuta per mezzo di modelli empirico-statistici più o meno complessi (per es. Keller & Hoelzle 1996; BAFU 2005; Boeckli et al. 2012), tali modelli offrono generalmente una buona panoramica della distribuzione potenziale del fenomeno su scala locale e regionale, ma non sono tuttavia in grado di riprodurre l'elevata discontinuità spaziale del permafrost di montagna alla *micro scala geografica* (scala di una specifica forma del terreno, di risoluzione variabile da qualche decina fino a qualche centinaio di metri). Tale limite è imposto dal numero ristretto di parametri topografici e climatici considerati. L'emergere di modelli altimetrici digitali (DEM) con una risoluzione spaziale sub-decametrica e dei corrispondenti indicatori geomorfologici estrapolabili (come ad esempio l'esposizione del terreno, la pendenza, la radiazione solare, la curvatura del terreno, ecc.) ha aumentato sensibilmente la disponibilità e la risoluzione dei dati spaziali. Quale conseguenza di questo progresso, i metodi statistici tradizionali sono recentemente diventati meno accurati a causa dell'aumento del numero di osservazioni associate a ciascuna variabile ambientale. Per poter sfruttare al meglio una così grande quantità di dati (potenzialmente dei *big data*), gli algoritmi di apprendimento automatico (o *machine learning*) hanno dimostrato di essere in grado di prendere in considerazione un numero maggiore di parametri rispetto agli approcci classici (vedi Deluigi & Lambiel 2013; Sattler et al. 2016; Deluigi et al. 2017; Deluigi 2018). Per questo motivo, disponendo di una grande quantità di dati spaziali ad alta risoluzione, l'applicazione di algoritmi robusti e non lineari diventa un'efficiente alternativa sia ai tradizionali modelli fisici sia a quelli empirico-statistici volti a modellare la ripartizione spaziale del permafrost con una buona accuratezza alla scala regionale o locale, ma meno accurati alla *micro scala* (per es. Baroni et al. 2004; Seppi et al. 2005; Etzelmüller et

al. 2007; Allen et al. 2009; Boeckli et al. 2012). Grazie all'impiego dei numerosi dati estratti dalle misurazioni sul campo e dai catasti dei ghiacciai rocciosi è finalmente possibile modellare spazialmente l'interrelazione non lineare che esiste tra le componenti climatiche e le proprietà del suolo/sottosuolo che controllano la presenza o assenza del permafrost di montagna alla *micro scala*, senza dover ricorrere ad alcun modello fisico.

Questo studio si prefigge di applicare un algoritmo di apprendimento automatico ai numerosi dati spaziali raccolti nell'ultimo decennio nelle Alpi Ticinesi nel contesto di vari studi, quali ad esempio Scapozza & Mari (2010), Scapozza et al. (2011b), Scapozza et al. (2018), Scapozza et al. (2020a). L'obiettivo principale è una modellazione della distribuzione potenziale del permafrost di montagna coerente alla *micro scala geografica* e la produzione di una carta che riflette l'eterogeneità spaziale di questo fenomeno naturale nel rispetto delle osservazioni di terreno raccolte su territorio ticinese. Viene inoltre presentato un approccio lineare applicato alle probabilità di occorrenza di permafrost ottenuto grazie all'apprendimento automatico per estrapolare le probabilità di occorrenza future sulla base dell'aumento medio della temperatura annua proposto dagli scenari climatici CH2018, che prevedono un aumento di $1.1^{\circ}/1.3^{\circ}/1.4^{\circ}\text{C}$ entro la fine del periodo 2020-2049 (secondo lo scenario considerato; RCP2.6/4.5/8.5). La distribuzione potenziale attuale e futura del permafrost è dunque stata prodotta tramite due approcci diversi: con l'apprendimento automatico è stata ottenuta (1) una rappresentazione alla *micro scala geografica* dell'estensione dei suoli potenzialmente gelati in permanenza delle Alpi Ticinesi che indica quali aree di montagna possiedono un'alta probabilità di permafrost all'esterno del perimetro dei ghiacciai rocciosi attivi; con un approccio più deduttivo sono state generate (2) delle carte rappresentanti l'evoluzione delle probabilità di permafrost nel futuro, che forniscono una rappresentazione dei settori potenzialmente maggiormente soggetti a un incremento futuro delle temperature del suolo.

MATERIALI E METODI

Ripartizione attuale del permafrost delle Alpi Ticinesi mediante un approccio di apprendimento automatico

L'apprendimento automatico (o *machine learning*) è un campo dell'intelligenza artificiale che applica algoritmi e tecniche statistiche tali da consentire ai computer di estrapolare un modello matematico direttamente dai dati (per es. Vapnik 1998; Kohonen 2001; Cherkassky & Mulier 2007; Kanevski 2008; Hastie et al. 2009; Haykin 2009). La caratteristica di questi algoritmi è la loro capacità di estrapolare, dai dati ad essi forniti, la relazione matematica che esiste tra un fenomeno naturale e le rispettive variabili ambientali che ne controllano la presenza o l'assenza senza ricorrere ad alcun modello fisico prestabilito. Le reti neurali artificiali (*artificial neural network*), i vettori a margini di supporto (*support vector machine*), le reti di Kohonen (*self-organizing maps*) o le foreste casuali (*random forest*) sono solo alcune delle tecniche più utilizzate per la modellazione di

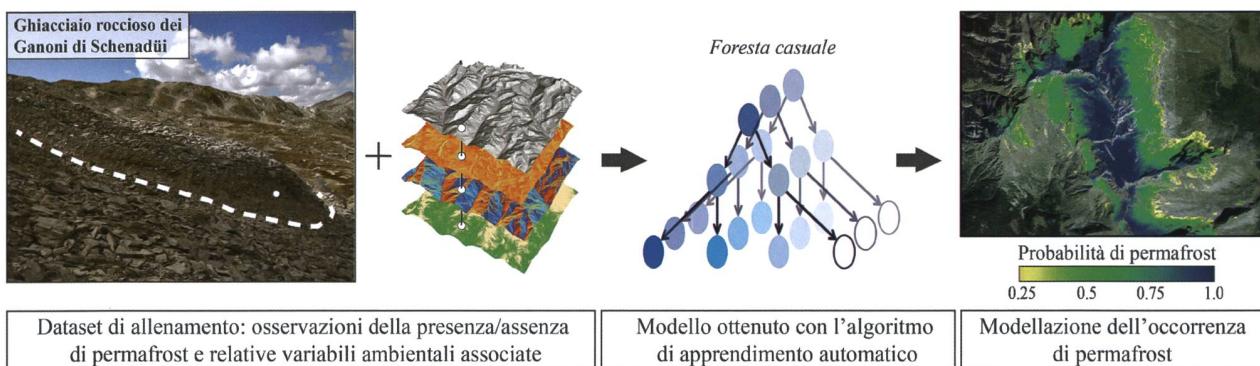


Figura 1: Differenti tappe della modellazione del permafrost con un approccio basato sui dati. In una prima fase ogni osservazione di terreno (pixel di presenza/assenza certa di permafrost) è associata alle relative informazioni spaziali (variabili ambientali quali pendenza, radiazione solare, curvatura del suolo, ecc.). I dati raccolti sono in seguito trattati dall'algoritmo di apprendimento automatico per l'estrapolazione di un modello matematico, che è poi applicato a tutta la zona di studio per la produzione della carta delle probabilità di occorrenza di permafrost (fotografia: N. Deluigi; ortoimmagine: swisstopo).

fenomeni naturali. Nel campo della modellazione della distribuzione spaziale del permafrost, la disponibilità di un numero importante di dati spaziali dal quale poter estrapolare un modello è il prerequisito principale per applicare algoritmi basati sull'apprendimento automatico. Il numero sempre più crescente di dati spaziali, ottenuti grazie ad esempio al monitoraggio sistematico dello stato termico del suolo o della cinematica dei ghiacciai rocciosi (per es. Scapozza et al. 2020a), così come la disponibilità di informazioni estrapolate dal telerilevamento (ortofoto, modelli digitali del terreno, ecc.), permettono oggi la creazione di modelli spaziali sempre più precisi. A differenza dei modelli topo-climatici più classici (per es. Keller & Hoelzle 1996; BAFU 2005), che si basano solamente su un numero ristretto di fattori di controllo, i modelli basati sull'apprendimento automatico possono tenere in considerazione decine di variabili ambientali e produrre così risultati che si avvicinano in maniera precisa alle reali osservazioni di terreno. Per cartografare in modo efficiente la ripartizione spaziale del permafrost di montagna utilizzando un approccio basato sui dati occorre dunque costruire un set di dati completo e rappresentativo della distribuzione conosciuta del permafrost, nel quale a ogni osservazione di terreno sono associate le sue caratteristiche spaziali. Nella pratica, tale set di dati si presenta sotto forma di una matrice contenente le informazioni spaziali associate ai pixel della griglia di predizione (che copre la regione nella quale si vuole ottenere il modello) e le osservazioni della presenza o assenza di permafrost, che sono successivamente impiegate durante il processo di modellazione dall'algoritmo di apprendimento automatico scelto (i cosiddetti *dati o esempi di allenamento*; Fig. 1).

Sulla base del modello matematico estratto direttamente dai dati (pixel corrispondenti alla presenza o assenza certa del fenomeno), una predizione della probabilità di occorrenza di permafrost è poi associata ai pixel della griglia per cui questa probabilità è sconosciuta. La carta finale della ripartizione potenziale del permafrost risulta dunque da una classificazione statistica effettuata dall'algoritmo di apprendimento automatico e basata sugli esempi di allenamento estratti dalle osservazioni di terreno (Fig. 2). La valutazione della qualità del

modello è in seguito calcolata applicando il medesimo modello su una porzione di dati indipendente dal set di dati di allenamento (mai fornita all'algoritmo), utilizzato unicamente per testare le capacità predittive del modello.

Dati ambientali di allenamento: ripartizione nota del permafrost

Per questo studio, i dati indicativi della presenza e assenza di permafrost sono stati raccolti da diverse fonti, quali in catasto dei ghiacciai rocciosi del Ticino (Scapozza & Mari 2010) e i dati estrapolati da specifiche campagne di terreno (vedi Scapozza et al. 2011b; 2018; 2020a; 2020b). Informazioni riguardanti la presenza o l'assenza di permafrost sono state derivate in base all'attività dei ghiacciai rocciosi presenti nel catasto. I ghiacciai rocciosi attivi o inattivi (detti anche ghiacciai rocciosi intatti) attestano generalmente una potenziale esistenza di condizioni favorevoli a un suolo gelato in permanenza, mentre quelli relitti ne indicano l'assenza (Haeberli 1985; Barsch 1996; Humlum 1996). L'attività è stata verificata con l'analisi delle caratteristiche geomorfologiche attraverso l'interpretazione di ortoimmagini e segnali interferometrici radar ad apertura sintetica (InSAR) (Scapozza & Mari 2010). I limiti complessivi dei ghiacciai rocciosi sono quindi stati corretti tramite il confronto con le ortofoto più recenti a disposizione (2013-2016 swisstopo SWISSIMAGE, risoluzione al suolo: 25 cm). L'estensione massima della superficie dei ghiacciai rocciosi è stata inoltre delimitata disegnando il confine esterno dei loro corpi principali. Mediante tale scelta, l'algoritmo di modellazione può infatti sfruttare la curvatura della morfologia dei ghiacciai rocciosi, tipicamente convessa, per apprendere con precisione le caratteristiche spaziali di queste forme geomorfologiche. Un totale di 281 poligoni è stato estrapolato dall'aggiornamento del catasto proposto in Scapozza & Mari (2010), permettendo di rappresentare i settori delle Alpi Ticinesi per i quali la presenza e l'assenza di permafrost sono state accertate (maggioritariamente in presenza di ghiacciai rocciosi intatti e relitti, con l'aggiunta di alcune falde di detrito; Fig. 2). Un totale di 15 predittori ambientali (variabili) in grado di spiegare la presenza di permafrost sono state se-

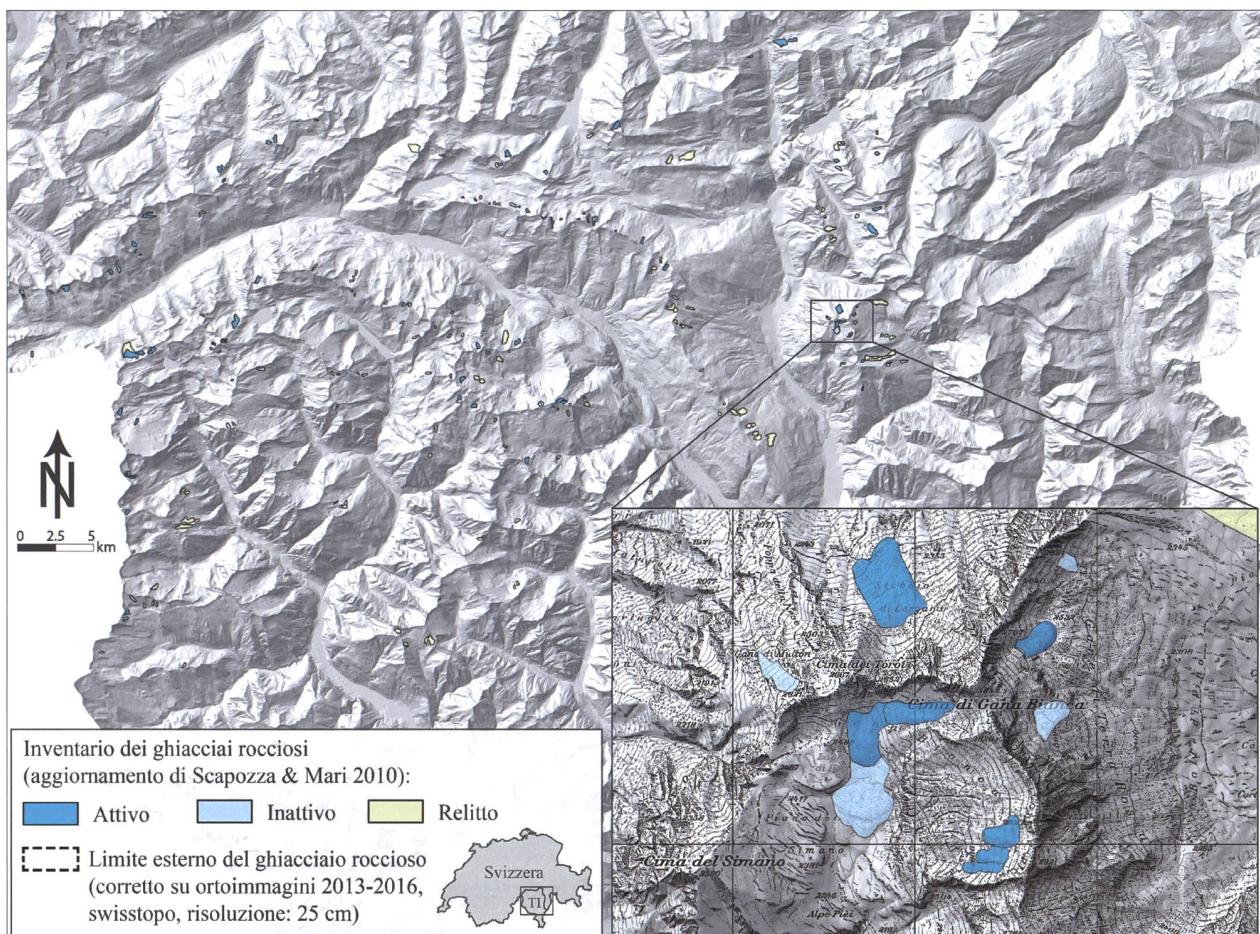


Figura 2: Distribuzione dei 281 poligoni rappresentanti la presenza e assenza accertata di permafrost che fungono da dati di allenamento per l'estrapolazione del modello matematico basato sull'apprendimento automatico (hillshade e carta topografica: swisstopo).

lezionate per questo studio (Tab. 1) sulla base dei risultati ottenuti selezionando lo stesso tipo di predittori in Deluigi & Lambiel (2013), Deluigi et al. (2017) e Deluigi (2018). Oltre ai fattori di controllo del permafrost generalmente impiegati nella modellazione della sua ripartizione (come l'altitudine, MAAT, l'esposizione del terreno e la radiazione solare diretta; per es. BAFU 2005; Boeckli et al. 2012), alcuni predittori morfologici come ad esempio gli indici di curvatura sono stati selezionati quale rappresentazione della microtopografia delle forme periglaciali. La curvatura può infatti aiutare a riconoscere la presenza di forme lobate potenzialmente occupate da permafrost quali i ghiacciai rocciosi o altre forme di flusso periglaciale. Per rappresentare al meglio tutte le scale spaziali di tali forme, la curvatura del terreno è stata calcolata sulla base di modelli altitudinali a diverse risoluzioni (10/30/50/100/500/1000 m): le curvature a risoluzione più alta rappresentano le forme di terreno di dimensioni più ridotte quali lobi, piccoli cordoni o depressioni, mentre le curvature a risoluzione più bassa hanno lo scopo di aiutare l'algoritmo di modellazione a rilevare la presenza di grandi creste o grandi depressioni (a indicare per esempio un fondovalle). Nel set di dati impiegato sono inoltre stati considerati predittori ambientali che descrivono le caratteristiche del terreno studiato: la copertura del suolo, come ad esempio la presenza di ghiacciai, laghi o fiumi (indicativi dell'assenza di permafrost), l'indice di vegetazione a differenza normalizzata (NDVI; con

duplice utilizzo di indicatore di aree vegetate o texture spaziale), e la granulometria. Quest'ultima variabile è indicativa della presenza o assenza di terreni a blocchi di grosse dimensioni, nei quali la presenza di permafrost nelle aree montane può essere più favorevole (per es. Sawada et al. 2003; Gruber & Hoelzle 2008). Un terreno coperto da grossi blocchi può infatti essere caratterizzato da meccanismi convettivi dell'aria nel sottosuolo che possono provocare forti variazioni spaziali delle temperature del suolo (per es. Morard et al. 2010; Rödder & Kneisel 2012). L'integrazione della granulometria tra le variabili ambientali utilizzate è dunque estremamente importante per rappresentare la ripartizione potenziale del permafrost di montagna alla micro scala geografica.

Delimitazione della griglia di predizione

La cosiddetta griglia di predizione è la porzione di territorio a cui è applicata la funzione matematica estratta dai dati. La delimitazione di questa griglia si basa sulle variabili di copertura del suolo e sul NDVI. La predizione dell'occorrenza del permafrost è stata calcolata solo per i settori in cui quest'ultima era sconosciuta, ossia nelle superfici a copertura minerale quali falde di detrito, depositi morenici e altre superfici coperte di detriti e affioramenti di roccia. Le aree in cui il permafrost è generalmente assente (come ghiacciai, margini proglaciali, fiumi, laghi o settori vegetati) sono state invece escluse dalla griglia dato che posseggono condizioni ter-

Tabella 1: Descrizione e relativo utilizzo delle variabili ambientali (o predittori) utilizzate nel set di dati di allenamento.

Variabile	Tipo	Utilizzo	Descrizione
Altitudine	Continuo	Classificazione	Altitudine dell'area di studio estratta dal modello digitale di terreno (swissALTI3D di swisstopo, risoluzione 2 m riconvertito a 10 m), dalla quale dipende la temperatura dell'aria.
Componente nord	Continuo	Classificazione	Componente nord dell'orientazione del terreno, espresso come il coseno dell'angolo di orientazione (dalla quale dipendono la quantità di radiazione solare diretta che raggiunge il suolo).
Componente est	Continuo	Classificazione	Componente est dell'orientazione del terreno, espresso come il seno dell'angolo di orientazione (dalla quale dipendono la quantità di radiazione solare diretta che raggiunge il suolo).
Pendenza	Continuo	Classificazione	Pendenza del terreno, dalla quale dipendono la quantità di radiazione solare diretta che raggiunge il suolo e la quantità di neve depositabile.
PSIR	Continuo	Classificazione	Quantità di radiazione solare diretta per il periodo compreso tra il 1° luglio e il 31 ottobre (periodo di assenza del manto nevoso). Tiene conto dell'effetto di ombreggiatura provocato dal profilo topografico.
NDVI	Continuo	Classificazione e delimitazione della griglia di predizione	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i> calcolato da immagini (swisstopo). Permette la distinzione di superfici vegetate rispetto ad altre superfici o la variabilità locale della tessitura delle zone a copertura minerale.
Granulometria	Continuo	Classificazione	Deviazione standard locale calcolata con un filtro a 21 pixel e applicata alle ortoimmagini in scala di grigi (SWISSIMAGE di swisstopo, risoluzione 25 cm).
Curvatura planimetrica	Continuo	Classificazione	Curvatura planimetrica, perpendicolare alla direzione di massima pendenza (utile all'identificazione indicare lobi o depressioni).
Curvatura di profilo	Continuo	Classificazione	Curvatura di profilo, parallela alla direzione di massima pendenza (utile all'identificazione di lobi o depressioni).
Curvatura combinata	Continuo	Classificazione	Combinazione delle curvature planimetriche e di profilo (utile all'identificazione di lobi o depressioni).
Margine proglaciale	Categorico	Delimitazione della griglia di predizione	Terreni recentemente liberati dalla presenza di ghiacciai, dove le condizioni termiche del suolo sono generalmente sfavorevoli alla presenza di permafrost.
Ghiacciaio	Categorico	Delimitazione della griglia di predizione	Terreni coperti da ghiacciai, principalmente a base temperata o politermici, dove le condizioni termiche del suolo sono generalmente sfavorevoli alla presenza di permafrost.
Lago	Categorico	Delimitazione della griglia di predizione	Terreni dove le condizioni termiche del suolo sono generalmente sfavorevoli alla presenza di permafrost.
Parete rocciosa	Categorico	Delimitazione della griglia di predizione	Permafrost potenzialmente presente ad altitudini sufficientemente elevate.
Fiume	Categorico	Delimitazione della griglia di predizione	Terreni dove le condizioni termiche del suolo sono generalmente sfavorevoli alla presenza di permafrost.

miche generalmente troppo calde per garantire la presenza di permafrost. Per ridurre il numero di computazioni e il tempo di calcolo, tutti i settori inferiori a 2000 m slm sono stati anch'essi esclusi. Tale scelta è giustificata dall'assenza nelle Alpi Ticinesi di sufficienti dati di allenamento indicativi di terreni gelati sotto a 2000 m slm. Benché alcuni studi abbiano rivelato che nelle Alpi è possibile osservare del permafrost sporadico a tali altitudini (per es. Delaloye et al. 2003), la loro estensione è troppo ridotta per giustificare una modellazione dell'estensione del permafrost sull'intero territorio ticinese. Sopra i 2000 m slm invece, le evidenze di permafrost raccolte derivano principalmente da indagini effettuate su superfici a copertura detritica mentre sono scarsi i dati disponibili nelle pareti rocciose. Quest'ultime non sono sufficienti a produrre un modello di ripartizione affidabile in questo tipo di terreno e, di conseguenza, anche le pareti rocciose sono state escluse dalla griglia

di predizione, delimitandole selezionando tutti i settori con copertura minerale e una pendenza superiore a 40°, soglia corrispondente al limite superiore dell'angolo di inclinazione del pendio a partire dal quale la neve o i detriti si depositano con difficoltà (Pogliotti 2011). Se si considera poi che la presenza di permafrost nelle pareti rocciose è sempre stata accertata ad altitudini più elevate (diverse centinaia di metri) rispetto al permafrost nei detriti rocciosi (Boeckli et al. 2012), la sua occorrenza in buona parte delle Alpi Ticinesi è da escludere o da considerare esclusivamente sporadica.

Alberi di classificazione e foreste casuali

L'algoritmo di apprendimento automatico selezionato per questo studio si basa sulla tecnica degli alberi di classificazione (Hunt et al. 1966) che appartengono a una famiglia di classificatori supervisionati che segmentano i dati in gruppi omogenei secondo la classe della varia-

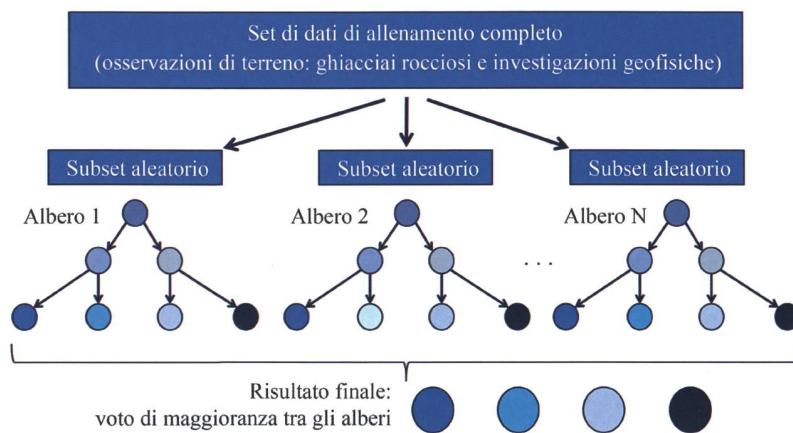


Figura 3: Rappresentazione schematica del funzionamento di una foresta casuale, con la creazione di N alberi di decisione basati sul partizionamento del set di dati di allenamento e la produzione del risultato finale per voto di maggioranza tra le differenti classificazioni ottenute.

bile da classificare (presenza o assenza di permafrost nel presente caso di studio). Questi alberi sono dei grafi aciclici e sono rappresentati sotto forma di diagrammi ad albero, i quali si diramano a mano a mano che la classificazione è compiuta (Fig. 3). Sviluppate sfruttando questo classificatore, le *foreste casuali* (o *random forest*) sono un modello multi-albero costituito da una collezione o *ensemble* di alberi di classificazione (Breiman 2001). In una foresta casuale i singoli alberi sono costruiti selezionando in maniera randomizzata porzioni delle osservazioni di terreno e delle rispettive variabili ambientali predittive. Ogni albero è infatti sviluppato utilizzando dei set di dati replicati (con la tecnica del *bootstrap*) e dei sottogruppi di variabili campionate in maniera aleatoria. Le differenti classificazioni suggerite dai diversi alberi costruiti sono in seguito combinate per ottenere la predizione finale (Fig. 3). Tale predizione è espressa in probabilità di appartenere a una determinata classe e, nel caso di studio specifico, essa esprime la probabilità di appartenere alla classe "presenza di permafrost". La validazione del modello si basa su due misure di valutazione: l'errore *out-of-bag* e le curve ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Il primo deriva dall'utilizzo del *bootstrap* quale metodo di campionamento del set di dati. Dato che solo 2/3 delle osservazioni del sottoinsieme *bootstrap* sono adottate per far crescere l'albero, il restante 1/3 può essere utilizzato per valutare la capacità di generalizzazione dell'algoritmo e può essere espresso sotto forma di errore (il cosiddetto *out-of-bag error* o *OOB*). La seconda misura della qualità del modello si basa sull'analisi della curva ROC, effettuata tramite lo studio della funzione che lega la probabilità di ottenere un risultato vero positivo nella classe della presenza di permafrost, alla probabilità di ottenere un risultato falso positivo nella classe dell'assenza di permafrost. Dal grafico ROC è possibile calcolare l'area sotto la curva ROC (o AUC), la quale fornisce un'indicazione della performance del modello. Valori che variano tra 0.5 e 0.7 indicano generalmente un modello con scarse capacità predittive, tra 0.7 e 0.8 capacità predittive moderate, tra 0.8 e 0.9 buone capacità predittive e superiori a 0.9 un modello eccellente (Sweets 1988).

Le foreste casuali sono già state precedentemente utilizzate da Deluigi et al. (2017) e Deluigi (2018) per la modellizzazione del permafrost; si rimanda dunque a tali pubblicazioni per ulteriori approfondimenti metodologici.

Ripartizione potenziale futura del permafrost delle Alpi Ticinesi mediante un approccio lineare

Non avendo a disposizione dati di allenamento che riflettano l'evoluzione spaziale di alcuni parametri ambientali o l'estensione dei ghiacciai rocciosi attivi utilizzati nella produzione della carta di ripartizione attuale del permafrost per mezzo delle foreste casuali, un approccio lineare è stato sviluppato per ottenere una rappresentazione dell'estensione potenziale futura del permafrost delle Alpi Ticinesi. Utilizzando il gradiente di temperatura di $-0.59^{\circ}\text{C}/100$ m proposto da Bouët (1985) e già utilizzato in Scapozza & Fontana (2009) nel contesto delle Alpi Ticinesi, per ogni esposizione (N, NO, O, SO, S, SE, E, NE), sono state estrapolate le altitudini alle quali si è registrata una MAAT di 0°C . Tenendo conto poi dei valori teorici di aumento della temperatura proposti negli scenari CH2018 (2018) per il sud delle Alpi svizzere (scenari regionali *CHS*), sono state calcolate le altitudini alle quali è prevista una MAAT di 0°C in un futuro prossimo (2035 secondo gli scenari CH2018, a riferimento del periodo 2020-2049), attorno alla metà del secolo (2060 secondo gli scenari CH2018, a riferimento del periodo 2045-2074) e verso la fine del secolo (2085 secondo gli scenari CH2018, a riferimento del periodo 2070-2099). Queste proiezioni del cambiamento climatico propongono una simulazione regionale della variazione del clima rispetto agli scenari climatici RCP2.6 (ossia forte mitigazione che mantiene il riscaldamento globale sotto i 2°C rispetto alla temperatura preindustriale), RCP4.5 (che propone una moderata mitigazione) e RCP8.5 (nessun tipo di mitigazione) (CH2018, 2018). Per ogni esposizione, le probabilità medie di permafrost alle altitudini calcolate sono state in seguito estratte dalla carta di ripartizione potenziale del permafrost ottenuta con le foreste causali, sia per le isoterme di 0°C medie attuali sia per quelle future. Una carta teorica dell'evoluzione del permafrost per ogni scenario è stata infine ottenuta sottraendo la differenza di probabilità all'intera carta.

RISULTATI

L'inventario dei ghiacciai rocciosi e i siti oggetto di investigazioni di terreno sono stati riassunti in un dataset contenente un totale di 281 poligoni, 124 dei quali a rappresentare la presenza di permafrost (principalmen-

te ghiacciai rocciosi intatti) e i restanti 157 la sua assenza (ghiacciai rocciosi relitti). Grazie alla creazione di una griglia di predizione di 10 m di risoluzione, questi poligoni hanno fornito alle foreste casuali circa 50'000 esempi di presenza e 84'500 esempi di assenza. La superficie coperta da tali poligoni copre 13.45 km² della griglia di predizione, corrispondente a circa il 5.3% della porzione di territorio alla quale è stata applicata la funzione matematica estrapolata direttamente dai dati di allenamento. La qualità del modello, calcolata sul dataset di test ed espressa tramite l'errore OOB e l'area sotto la curva ROC, si attesta rispettivamente a 7.48% e 0.84. Secondo Sweets (1988), la classificazione prodotta ha dunque delle buone capacità predittive quando il modello è riapplicato ai pixel per i quali la probabilità di occorrenza di permafrost è sconosciuta. La funzione matematica finale è stata ottenuta facendo crescere un totale di 1000 alberi e calcolando la media dei singoli risultati da essi ottenuti. La carta della ripartizione potenziale del permafrost nelle Alpi Ticinesi è stata in seguito ottenuta applicando tale funzione alla totalità dei pixel della griglia di predizione ed esprimendo il risultato binario (presenza/assenza) in probabilità

di appartenenza a una delle due classi (Fig. 4; la carta nella sua interezza è visualizzabile su: <http://repository.supsi.ch/11589/>). Una rappresentazione dell'incertezza del modello è anch'essa visualizzabile nella versione digitale della carta ed è stata ottenuta calcolando lo scarto quadratico medio di tutti i risultati ottenuti dalle foreste casuali per ogni pixel della griglia di predizione. A livello regionale, la carta della ripartizione del permafrost nelle Alpi Ticinesi indica che il fenomeno è potenzialmente presente nei settori che si situano a un'altitudine superiore a 2500 m slm. Questo limite varia leggermente secondo le caratteristiche spaziali specifiche dell'area di studio (orientazione, presenza di copertura detritica a granulometria grossolana, ecc.) ed è stato estrapolato direttamente dai dati, senza che alcun limite altitudinale empirico sia stato fornito al modello. L'occorrenza di permafrost aumenta sensibilmente con l'aumentare dell'altitudine (Fig. 5, sopra). Tra 2250 e 2499 m slm infatti la carta indica delle probabilità di circa il 50% di permafrost nei terreni a copertura detritica, mentre a partire da tale soglia le probabilità aumentano fino a raggiungere il 95% per l'intervallo compreso fra 3250 e 3499 m slm. Le pro-

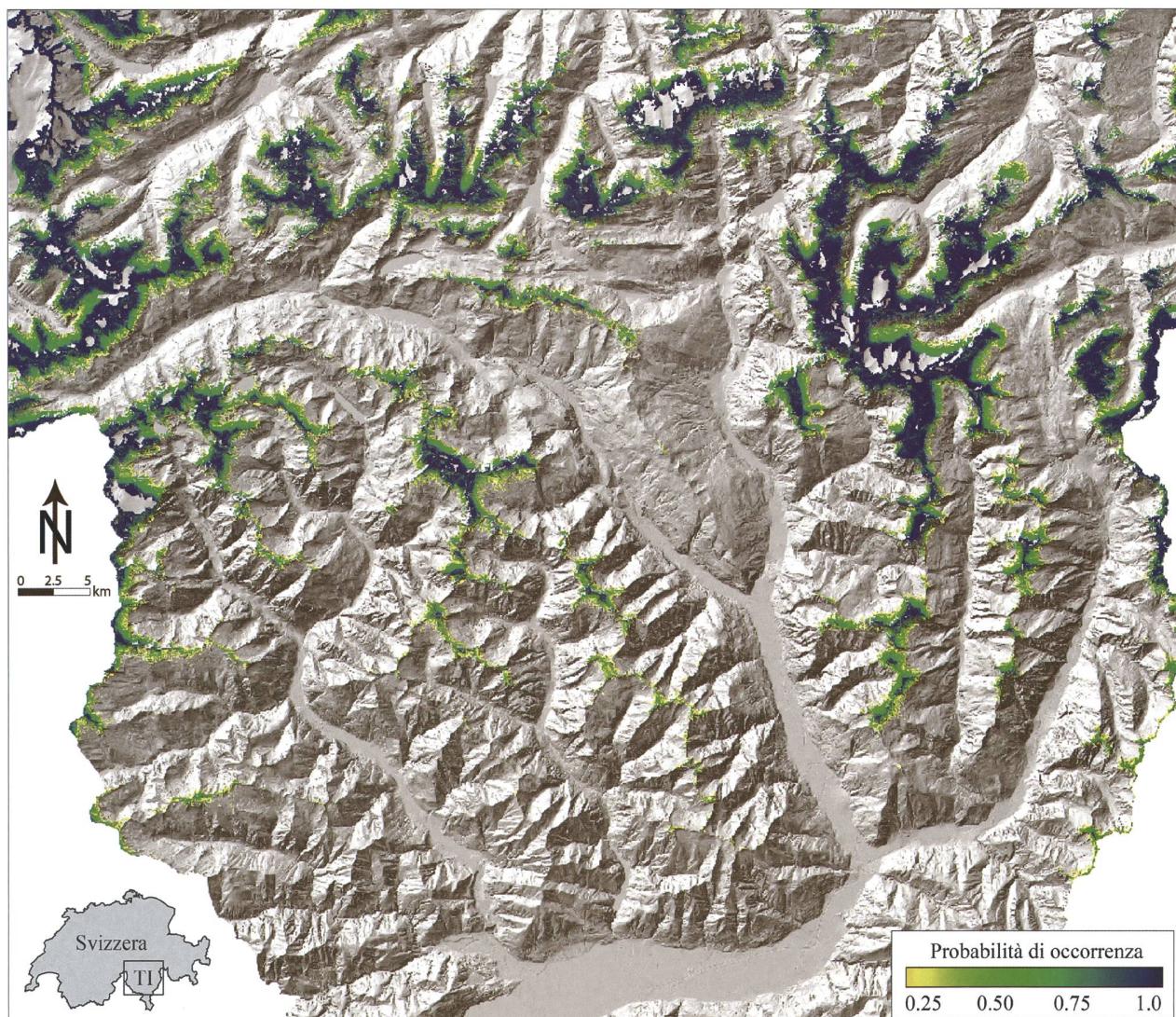


Figura 4: Carta della ripartizione potenziale del permafrost nelle Alpi Ticinesi ottenuta dalla classificazione di dati spaziali di terreno per mezzo delle foreste casuali (hillshade: swisstopo). La carta interattiva è visualizzabile nella sua interezza su: <http://repository.supsi.ch/11589/>

babilità di occorrenza sono invece equamente ripartite tra le otto esposizioni del terreno (Fig. 5, sotto). Infine, la porzione di territorio alla quale è stata attribuita una probabilità di occorrenza superiore al 50% copre circa 265 km², corrispondente al 9.4% della superficie totale del Cantone Ticino (2812.46 km²).

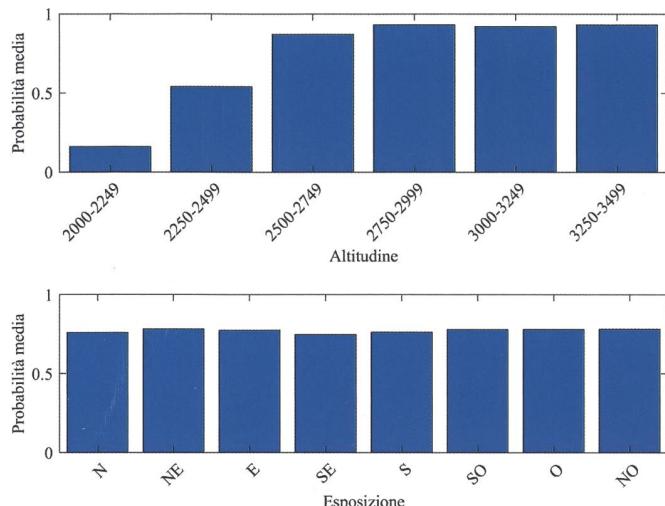


Figura 5: Distribuzione delle probabilità di occorrenza di permafrost per intervallo di altitudine (sopra) e per esposizione del versante (sotto).

DISCUSSIONE

Ripartizione del permafrost nelle Alpi Ticinesi

Un'analisi approfondita della carta indica che, a livello della *micro scala geografica*, il modello simula una ripartizione potenziale del permafrost estremamente eterogenea, risultato che rispetta in maniera accurata la realtà di terreno e che si distingue dai modelli classici che utilizzano approcci empirici o empirico-statistici (come quelli proposti ad esempio nei modelli PERMAKART di Keller 1992; PERMAMAP di Hoelzle & Haeberli 1996; o del BAFU 2005). L'esempio di analisi settoriale nel massiccio della Cima di Gana Bianca (Fig. 6), tra la Valle di Blenio e la Val Malvaglia, mostra la buona corrispondenza tra le probabilità prodotte dalle foreste casuali e la presenza di permafrost attestata dai ghiacciai rocciosi attivi di Gana Bianca II, III e IV (Fig. 6A, lett. a). I settori a copertura detritica localizzati a quote superiori a 2550-2600 m slm sono infatti caratterizzati da probabilità di trovare permafrost che superano il 70%. Alle quote del ghiacciaio roccioso inattivo dell'Alpe Pièi, invece, le probabilità di occorrenza sono sensibilmente inferiori, ad indicare che la presenza di permafrost è più incerta (simulata tra il 35 e il 50%; Fig. 6A, lett. b). A quote ancora più basse, il modello simula in maniera corretta l'assenza di permafrost, come lo testimoniano le deboli probabilità prodotte per la Valle di Sceru, dove le condizioni climatiche non sono sufficienti al mantenimento di permafrost come confermato dallo stato termico dei ghiacciai rocciosi cartografati come relitti in Scapozza et al. (2011b) (Fig. 6C, lett. c). L'importante eterogeneità della ripartizione del per-

mafrost è stata ottenuta estrapolando l'interrelazione statistica che esiste tra le osservazioni di terreno fornite all'algoritmo e le caratteristiche spaziali ad esse associate. Ciò significa che la carta di distribuzione potenziale del permafrost non è stata ottenuta ricorrendo a un set fisso di parametri, come ad esempio alcune soglie di altitudine predeterminate sulla quota dei fronti dei ghiacciai rocciosi classicamente impiegate per rappresentare diverse categorie di occorrenza del permafrost (per es. BAFU 2005). Questa differenza è ben osservabile confrontando la ripartizione del permafrost nel massiccio della Cima di Gana Bianca ottenuta in questo studio (Fig. 6A) con quella proposta nella Carta ufficiale del BAFU (2005) (Fig. 6B). Quest'ultima è infatti caratterizzata da un'occorrenza di permafrost che aumenta con la quota e che si traduce in una rappresentazione a bande altitudinali poco coerente con la realtà di terreno e con la forte eterogeneità spaziale tipica della ripartizione del fenomeno alla micro scala geografica. A differenza dei modelli tradizionali, le foreste casuali sono state in grado di apprendere automaticamente il limite inferiore del permafrost e la sua ripartizione all'interno della zona periglaciale senza alcuna necessità di predefinire una serie di regole che permettano di discriminare la presenza di permafrost dalla sua assenza. Sono stati infatti i dati stessi a fornire tali informazioni all'algoritmo di classificazione. È importante però notare che i parametri ambientali utilizzati in questo studio sono una rappresentazione delle condizioni climatiche della fine del secolo scorso e che quindi la carta della ripartizione attuale del permafrost rappresenta una distribuzione che non è in equilibrio con le condizioni climatiche attuali.

Nonostante l'approccio di modellazione preveda l'esclusione di un set di validazione dedicato che non è mai fornito all'algoritmo nel processo di classificazione, un'ulteriore verifica della carta è presentata in Figura 7, dove le temperature dell'acqua di alcune sorgenti presenti nell'area del Lago di Leìt (regione del Passo Campolungo, Valle Leventina) sono state confrontate con le probabilità di occorrenza per i medesimi settori (Tab. 2). Sulla base della classificazione proposta da Haeberli (1975), Scapozza et al. (2011b) e Carturan et al. (2016), temperature dell'acqua comprese tra 0°C e 1°C corrispondono a una presenza probabile di permafrost, temperature comprese tra 1°C e 2°C sono attribuibili a una sua presenza possibile, mentre valori superiori a 2°C si traducono in assenza di suoli gelati in permanenza. Le temperature delle sorgenti localizzate a valle del ghiacciaio roccioso attivo di Pizzo Campolungo attestano una presenza probabile di permafrost (Fig. 7), mentre le altre sorgenti studiate si trovano in settori dove le probabilità di occorrenza sono basse (tra il 25% e il 40%). Questo esempio mostra, da un lato, la corretta modellazione del limite inferiore del permafrost, dall'altro, l'eterogenea ripartizione del fenomeno, la cui probabilità di occorrenza non è direttamente proporzionale all'aumento di altitudine, ma riflette piuttosto specifiche caratteristiche spaziali estrapolate direttamente dai dati.

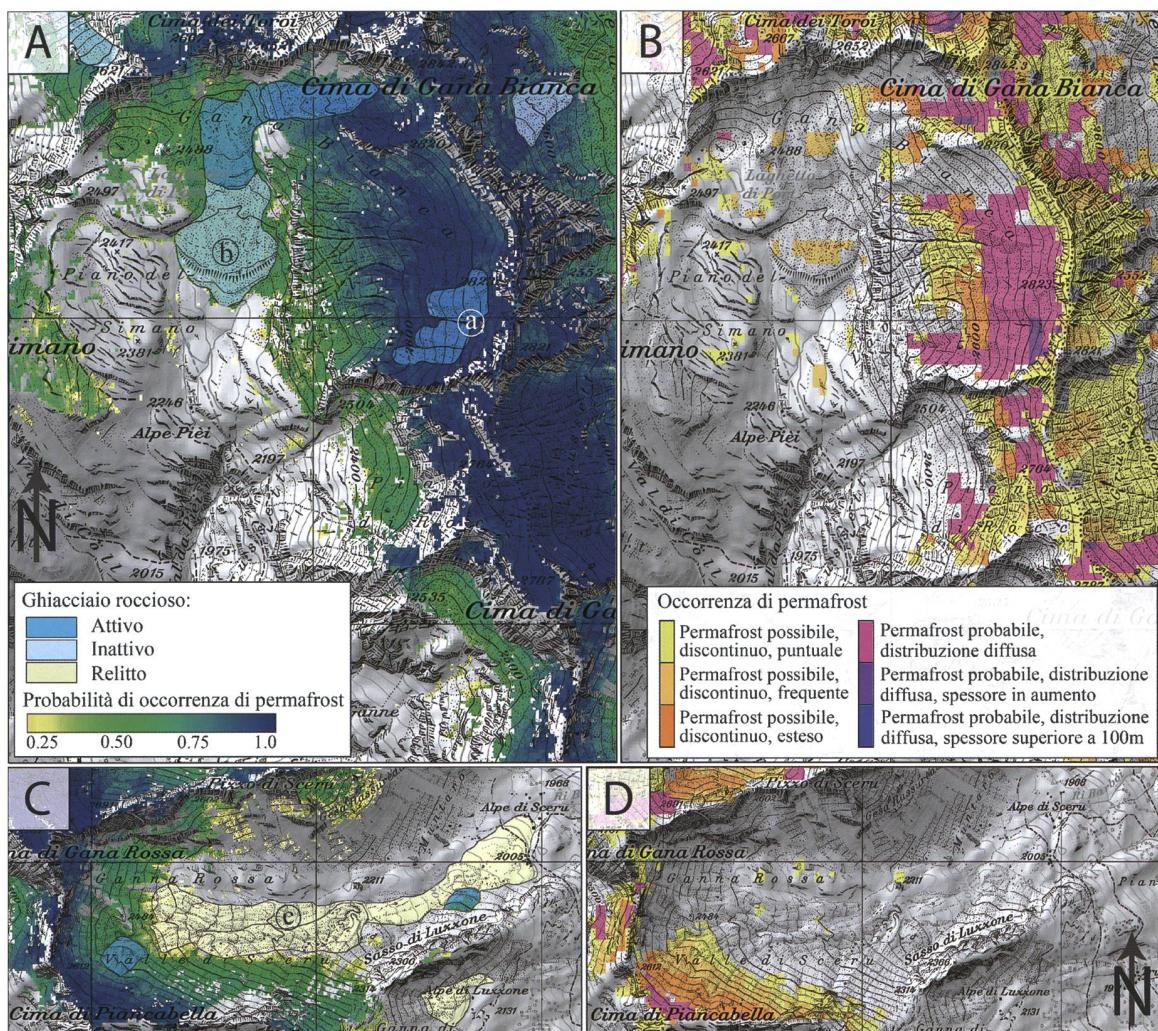


Figura 6: Ripartizione potenziale del permafrost per il settore fra Cima di Gana Bianca e Cima di Gana Rossa (A) e per il settore della Valle di Sceru (C); (a) ghiacciai rocciosi attivi di Gana Bianca II, III e IV; (b) ghiacciaio roccioso inattivo dell'Alpe Pièi; (c) complesso di ghiacciai rocciosi relitti della Valle di Sceru. (B e D) Carta ufficiale della ripartizione del permafrost, modificata da BAFU (2005) (hillshade e carta topografica: swisstopo).

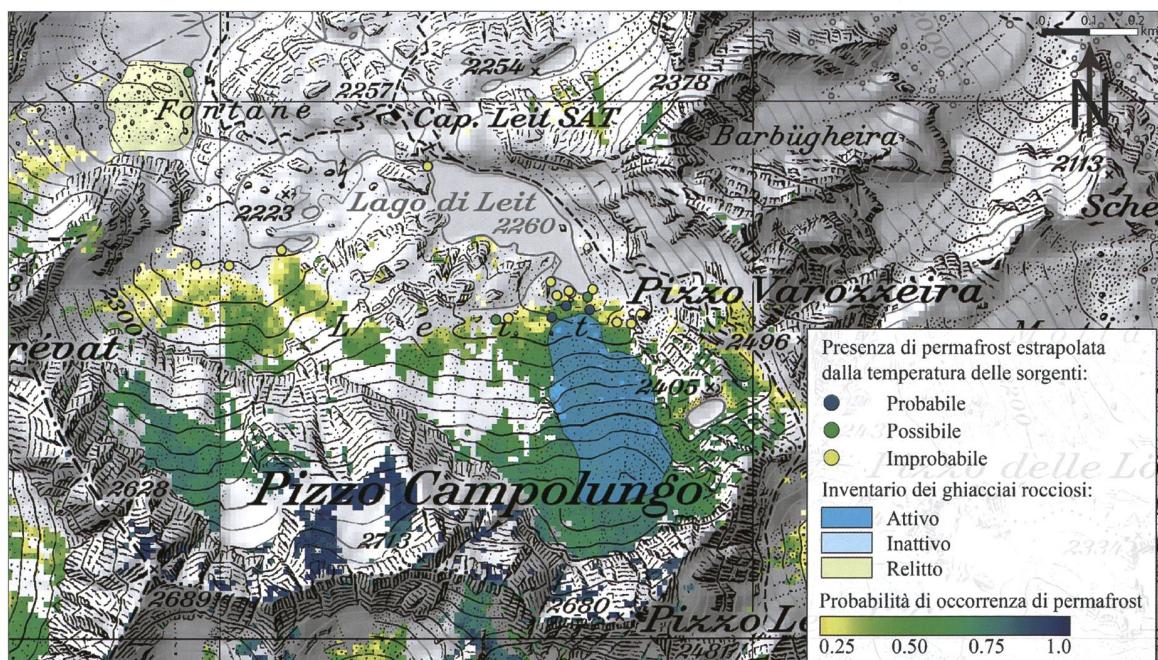


Figura 7: Confronto tra la ripartizione potenziale del permafrost nel settore del Lago di Leit-Pizzo Campolungo e la presenza di permafrost dedotta dalla temperatura delle acque di sorgente misurata il 12.9.2019 (hillshade e carta topografica: swisstopo).

Tabella 2: Localizzazione e temperatura delle sorgenti misurate nella regione del Lago di Leit-Pizzo Campolungo il 12.9.2019 e confronto con la probabilità di occorrenza simulata per il relativo pixel della carta della ripartizione potenziale del permafrost. Forma: AR = affioramento roccioso; FD = falda di detrito GR = ghiacciaio roccioso. Coord.: coordinate secondo il sistema CH1903+ / LV95.

Sito	Forma	T. (°C)	Coord. X	Coord. Y	Alt. (m slm)	Permafrost (da sorgenti)	Probabilità di permafrost (%)
LEI_S01	GR intatto	0.9	2'698'694	1'146'612	2266	Probabile	58
LEI_S05	GR intatto	1.0	2'698'623	1'146'598	2292	Probabile	58
LEI_S03	GR intatto	0.8	2'698'650	1'146'619	2287	Probabile	51
LEI_S13	FD	1.9	2'698'518	1'146'594	2292	Possibile	44
LEI_S12	FD	2.1	2'698'541	1'146'597	2287	Improbabile	36
LEI_S09	FD	3.5	2'698'745	1'146'589	2286	Improbabile	29
LEI_S17	FD	2.7	2'697'956	1'146'698	2187	Improbabile	29
LEI_S07	AR	3.2	2'698'632	1'146'639	2294	Improbabile	28
LEI_S15	FD	2.4	2'698'116	1'146'724	2223	Improbabile	28
LEI_S16	FD	2.3	2'698'018	1'146'695	2233	Improbabile	27
LEI_S02	GR intatto	1.1	2'698'690	1'146'636	2260	Possibile	25
LEI_S04	GR intatto	2.1	2'698'659	1'146'644	2265	Improbabile	0
LEI_S06	GR intatto	2.4	2'698'655	1'146'647	2260	Improbabile	0
LEI_S08	FD	4.4	2'698'772	1'146'586	2294	Improbabile	0
LEI_S10	Lago di Leit	4.3	2'698'700	1'146'650	2260	Improbabile	0
LEI_S11	FD	2.4	2'698'621	1'146'664	2285	Improbabile	0
LEI_S14	Lago di Leit	10.0	2'698'390	1'146'880	2262	Improbabile	0
FON_S01	GR relitto	1.6	2'697'942	1'147'056	2136	Possibile	0

Evoluzione futura del permafrost nelle Alpi Ticinesi

Il modello di ripartizione potenziale attuale del permafrost presentato in questo studio si basa su esempi di allenamento che riflettono l'estensione spaziale conosciuta del permafrost e la sua interrelazione con i parametri ambientali di controllo attuali (o comunque rappresentativi delle condizioni climatiche della fine del secolo scorso). Non è purtroppo possibile applicare il medesimo approccio per modellare l'evoluzione della distribuzione spaziale del permafrost nei prossimi decenni non avendo a disposizione dati di allenamento che riflettano l'evoluzione spaziale di alcuni parametri utilizzati nel processo di apprendimento automatico. Nonostante l'evoluzione di alcuni predittori ambientali quali MAAT o PSIR sia facilmente modellabile, simulare ad esempio l'estensione futura dei ghiacciai rocciosi, dei terreni a copertura minerale o della vegetazione è più complesso e genererebbe troppe incertezze per la corretta modellazione della ripartizione del permafrost alla micro scala. Con un approccio lineare alternativo, basato sull'incremento della temperatura dell'aria come proposto dagli scenari climatici svizzeri CH2018, è stata ottenuta una carta dell'estensione futura del permafrost nelle Alpi Ticinesi che è però da ritenersi valida unicamente per una valutazione dell'evoluzione del permafrost alla scala regionale. Tramite tale metodologia si presuppone infatti che la degradazione termica del suolo sia linearmente correlata all'aumento della temperatura dell'aria e non si tiene conto che le caratteristiche specifiche di un determinato sito, come ad esempio il raffreddamento in terreni a grossi

blocchi, possano ritardare il riscaldamento della temperatura del suolo.

La simulazione dell'evoluzione delle probabilità d'occorrenza del permafrost considerando l'aumento medio della temperatura suggerito dallo scenario RCP2.6, il più conservativo e che prevede l'aumento minimo (+1.1°C entro la fine del periodo 2020-2049), mostra come i settori con forte probabilità di presenza di permafrost saranno soggetti nel prossimo futuro a una riduzione significativa della probabilità di occorrenza sotto al 35% per tutte le quote e tutte le orientazioni (Fig. 8). Essendo gli incrementi simulati di temperatura per il periodo 2045-2074 e il periodo 2070-2099 molto simili a quanto predetto per il periodo 2020-2049 (+1.2° per entrambi i periodi), tra il 2020-2049 e la fine del secolo la presenza di permafrost diminuirà solo leggermente a livello locale se le azioni proposte dallo scenario RCP2.6 saranno rispettate. Sebbene l'evoluzione delle probabilità proposta mostri chiaramente come entro il 2020-2049 le condizioni topo-climatiche saranno troppo elevate per mantenere il permafrost ad altitudini di 2500-3000 m slm, è possibile che particolari caratteristiche del terreno possano comunque preservare temperature fredde del suolo e dunque il mantenimento sporadico del permafrost. Qualora invece l'aumento delle temperature dell'aria seguirà quanto previsto dagli scenari RCP4.5 e RCP8.5, meno conservativi rispetto allo scenario RCP2.6, alla fine del 21° secolo nelle Alpi Ticinesi sarà molto improbabile osservare delle temperature del suolo tali da permettere il mantenimento di suoli gelati in permanenza, poiché il limite altitudinale di 0° si troverà ben al di sopra delle quote

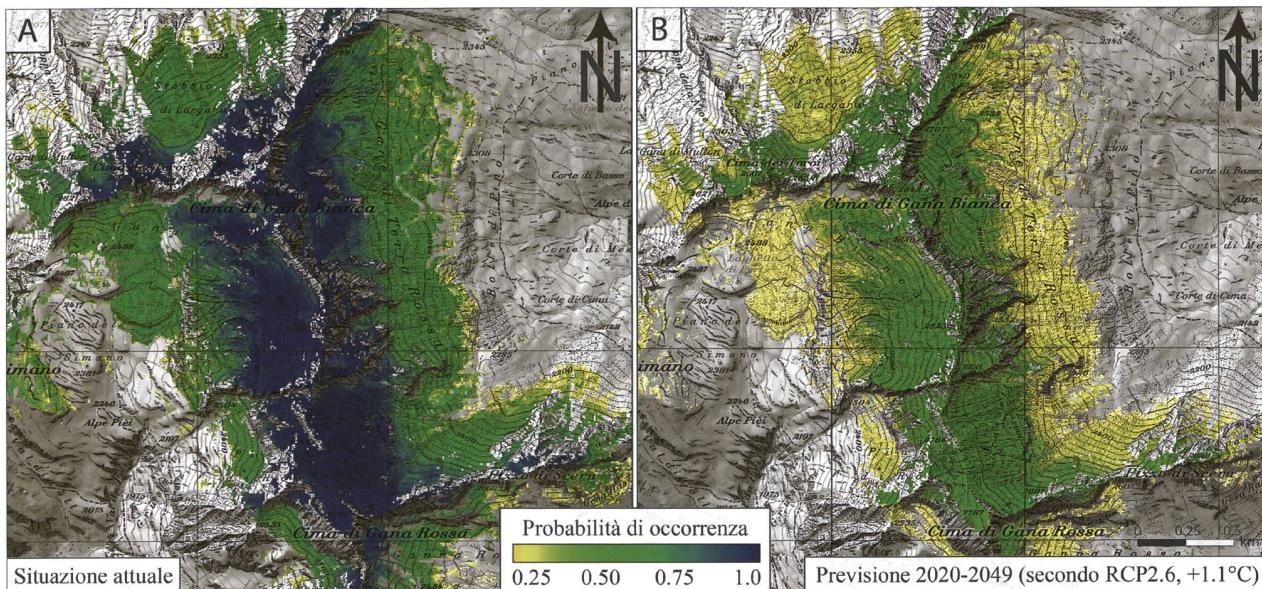


Figura 8: (A) Ripartizione potenziale del permafrost basata su dati che riflettono le condizioni climatiche attuali (o della fine del secolo scorso) e (B) evoluzione futura simulata sulla base dell'aumento delle temperature dell'aria proposto dallo scenario climatico CH2018, secondo il piano di mitigazione RCP2.6 (+1.1°C per il periodo 2020-2049) (hillshade e carta topografica: swisstopo).

massime delle montagne ticinesi. Sarà di conseguenza probabile che un'importante degradazione termica dei suoli delle zone periglaciali ticinesi avverrà al massimo entro la fine dei prossimi tre decenni.

CONCLUSIONE

La carta della ripartizione potenziale del permafrost delle Alpi Ticinesi è stata ottenuta estraendo una funzione di classificazione matematica direttamente da dati raccolti sul campo. L'algoritmo delle foreste casuali si è dimostrato efficiente grazie a risultati coerenti e comparabili alle osservazioni di terreno. L'impiego di variabili ambientali che ben rappresentano la microtopografia e le sue caratteristiche spaziali, quali ad esempio gli indici di granulometria o di curvatura, hanno favorito la previsione dell'eterogenea ripartizione del permafrost alla micro scala geografica. Il modello ottenuto presenta variazioni della probabilità di occorrenza entro distanze di poche decine di metri, con i limiti inferiori del permafrost che sono stati estratti automaticamente dalle osservazioni di terreno. Come mostrano i dati di temperatura raccolti per le sorgenti nel settore del Lago di Leit, i limiti indicati dalla carta ben corrispondono alla realtà di terreno. La previsione del permafrost è stata calcolata senza ricorrere a soglie di altitudine all'interno della cintura del permafrost discontinuo, sopra alle quali il permafrost può essere trovato, e la rappresentazione della forte discontinuità del permafrost di montagna alla micro scala è stata meglio predetta rispetto ai modelli tradizionali quali ad esempio quello del BAFU (2005).

La previsione dell'estensione futura del permafrost nelle Alpi Ticinesi è stata ottenuta mediante un approccio che presuppone un riscaldamento del suolo linearmente correlato agli aumenti altitudinali ai quali è prevista una MAAT di 0°C entro la fine del secolo. La carta mostra che, secondo gli scenari climatici

svizzeri CH2018, la maggiore diminuzione spaziale del permafrost si verificherà entro i prossimi tre decenni, con probabilità di occorrenza che attualmente rappresentano un permafrost probabile (superiori al 75%) che si ridurranno sensibilmente (inferiori al 45-50%). Qua-
loro specifiche caratteristiche del sottosuolo non agevolino un ritardo al riscaldamento del terreno, gli attuali settori gelati in permanenza subiranno l'influenza del cambiamento climatico con conseguente riduzione della superficie occupata dal permafrost.

RINGRAZIAMENTI

Per la revisione e l'aggiornamento dei dati contenuti nel catasto dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi si ringraziano Alessandra Pollo e Chantal Del Siro, che ha anche partecipato alla misurazione delle temperature delle sorgenti nel settore del Lago di Leit. Si ringraziano inoltre per i commenti e i contributi alla revisione Alessandro Cicoira (revisore) e Filippo Schenker (editore).

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- Allen S.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(4): 345-356.
- Arenson L.U., & Springman S.M. 2005. Mathematical descriptions for the behaviour of ice-rich frozen soils at temperatures close to 0 C. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 431-442.
- BAFU 2005. Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung der Schweiz. Bern, Bundesamt für Umwelt (BAFU).
- 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(3): 243-259.

- Barsch D. 1996. Rockglaciers: indicators for the present and former geoecology in high mountain environments. Berlin/Heidelberg, Springer, 331 pp.
- Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L.M., Copola E., Eckert N., Fantini A., Giacoma F., Hauck C., Huss M., Huwald H., Lehning M., López-Moreno J.-I., Magnusson J., Marty C., Moran-Tejeda E., Morin S., Naaim M., Provenzale A., Rabatel A., Six D., Stötter J., Strasser U., Terzaghi S. & Vincent C. 2018. The European mountain cryosphere: A review of past, current and future issues. *The Cryosphere*, 12: 759-794.
- Boeckli L., Brenning A., Gruber S. & Noetzli J. 2012. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere*, 6: 125-140.
- Bouët M. 1985. Climat et météorologie de la Suisse romande. Lausanne, Payot, 170 pp.
- Breiman L. 2001. Random forests. *Machine learning*, 45: 5-32.
- CH2018 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. Zurich, National Centre for Climate Services, Technical Report, 271 pp.
- Carturan L., Zucco G., Seppi R., Zanoner T., Borga M., Carton A. & Dalla Fontana G. 2016. Catchment Scale Permafrost Mapping using Spring Water Characteristics. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(3): 253-270.
- Cherkassky V. & Mulier F.M. 2007. Learning from data: concepts, theory, and methods. Chichester, John Wiley & Sons, 624 pp.
- Delaloye R., Reynard E., Lambiel C., Marescot L., & Monnet R. 2003. Thermal anomaly in a cold scree slope (Creux du Van, Switzerland). In *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost*, Vol. 2125, pp. 175-180.
- Deluigi N. 2018. Data-driven Analysis and Mapping of the Potential Distribution of Mountain Permafrost. PhD Thesis, University of Lausanne, 284 pp.
- Deluigi N. & Lambiel C. 2013. PERMAL: a machine learning approach for alpine permafrost distribution modeling. In: Graf C. (ed), Matteringtal – ein Tal in Bewegung. Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 29. Juni-1. Juli 2011. St. Niklaus, Schweiz, pp. 47-62.
- Deluigi N., Lambiel C. & Kanevski M. 2017. Data-driven mapping of the potential mountain permafrost distribution. *Science of The Total Environment*, 590: 370-380.
- Etzelmüller B. & Frauenfelder R. 2009. Factors controlling the distribution of mountain permafrost in the Northern Hemisphere and their influence on sediment transfer. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41: 48-58.
- Etzelmüller B., Farbrot H., Gudmundsson A., Humlum O., Tveito O.E. & Björnsson H. 2007. The regional distribution of mountain permafrost in Iceland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(2): 185-199.
- Gruber S. & Haeberli W. 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112: F02S18.
- Gruber S. & Haeberli W. 2009. Mountain permafrost. In: Margesin R. (ed), Permafrost soils. Berlin/Heidelberg, Springer, pp. 33-44.
- Gruber S. & Hoelzle M. 2008. The cooling effect of coarse blocks revisited: a modelling study of a purely conductive mechanism. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, 29: 557-561.
- Haeberli W. 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich*, 17: 1-221.
- Haeberli W. 1985. Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich*, 77: 5-142.
- Harris C., Arenson L., Christiansen H.H., Etzelmüller B., Frauenfelder R., Gruber S., Haeberli W., Hauck C., Hoelzle M., Humlum O., Isaksen K., Kääb A., Kern-Luetsch M.A., Lehning M., Matsuoka N., Murton J. B., Noetzli J., Phillips M., Ross N., Seppala M., Springman S.M. & Vonder Muehl D. 2009. Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92(3): 117-171.
- Hastie T., Tibshirani R. & Friedman J. 2009. The elements of statistical learning. Data mining, Inference, and Prediction. Berlin/Heidelberg, Springer, 745 pp.
- Haykin S. 2009. Neural networks and learning machines (Third edition). New York, Pearson, 906 pp.
- Humlum O. 1996. Origin of rock glaciers: observations from Mellemfjord, Disko Island, central West Greenland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 7(4): 361-380.
- Hunt E.B., Marin J. & Stone P.J. 1966. Experiments in induction. New York and London, Academic Press, 76 pp.
- Kääb A., Frauenfelder R. & Roer I. 2007. On the response of rockglacier creep to surface temperature increase. *Global and Planetary Change*, 56: 172-187.
- Kanevski M. 2008. Advanced Mapping of Environmental Data: Geostatistics. Machine Learning and Bayesian Maximum Entropy. London, ISTE Ltd., 352 pp.
- Keller F. 1992. Automated mapping of mountain permafrost using the program PERMAKART within the geographical information system ARC/INFO. *Permafrost and Periglacial Processes*, 3(2): 133-138.
- Keller F. & Hoelzle M. 1996. PERMAKART und PERMAP. In: Haeberli W., Hölzle M., Dousse J.-P., Gardaz J.-M., Imhof M., Keller F., Kunz P. Lugon. R. & Reynard, E. (eds), *Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit geographischen Informationssystemen*. Zürich, vdf Hochschulverlag, pp. 35-46.
- Kohonen T. 2001. Self-Organizing Maps. Berlin/Heidelberg, Springer, 502 pp.
- Marmy A., Rajczak J., Delaloye R., Hilbich C., Hoelzle M., Kotlarski S., Lambiel C., Noetzli J., Phillips M., Salzmann N., Staub B. & Hauck C. 2016. Semi-automated calibration method for modelling of mountain permafrost evolution in Switzerland. *The Cryosphere*, 10: 2693-2719.
- Morard S., Delaloye R. & Lambiel C. 2010. Pluriannual thermal behaviour of low elevation cold talus slopes in western Switzerland. *Geographica Helvetica*, 65(2): 124-134.
- PERMOS 2016. Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014. Noetzli J., Luethi R. & Staub B. (eds), *Glaciological Report (Permafrost)* No. 12-15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Pogliotti P. 2011. Influence of snow cover on MAGST over complex morphologies in mountain permafrost regions. PhD thesis, University of Torino, 79 pp.
- Ravanel L., Allignol F., Deline P., Gruber S. & Ravello M. 2010. Rock falls in the Mont Blanc Massif in 2007 and 2008. *Landslides*, 7(4): 493-501.

- Rödder T. & Kneisel C. 2012. Influence of snow cover and grain size on the ground thermal regime in the discontinuous permafrost zone, Swiss Alps. *Geomorphology*, 175: 176-189.
- Roer I., Haeberli W., Avian M., Kaufmann V., Delaloye R., Lambiel C. & Kääb A. 2008. Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, 29: 1505-1510.
- Sattler K., Anderson B., Mackintosh A., Norton K. & de Róiste, M. 2016. Estimating Permafrost Distribution in the Maritime Southern Alps, New Zealand, Based on Climatic Conditions at Rock Glacier Sites. *Frontiers in Earth Science*, 4: 4.
- Sawada Y., Ishikawa M. & Ono Y. 2003. Thermal regime of sporadic permafrost in a block slope on Mt. Nishi-Nupukauushinupuri, Hokkaido Island, Northern Japan. *Geomorphology*, 52: 121-130.
- Scapozza C & Fontana G. 2009. Le Alpi Bleniesi. Storia glaciale e periglaciale e patrimonio geomorfologico. *Memorie della Società ticinese di scienze naturali e del Museo cantonale di storia naturale*, Lugano, 10: 1-111.
- Scapozza C. & Mari S. 2010. Catasto, caratteristiche e dinamica dei rock glaciers delle Alpi Ticinesi. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 98: 15-29.
- Scapozza C., Lambiel C., Baron L., Marescot L. & Reynard E. 2011a. Internal structure and permafrost distribution in two alpine periglacial talus slopes, Valais, Swiss Alps. *Geomorphology*, 132(3): 208-221.
- Scapozza C., Lambiel C., Gex P. & Reynard E. 2011b. Prospection géophysique multi-méthodes du pergélisol alpin dans le sud des Alpes suisses. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 17: 15-32.
- Scapozza C., Antognini M. & Ambrosi C. 2018. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2015/2016 e 2016/2017). Rapporto No. 4 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 106: 13-22.
- Scapozza C., Deluigi N., Del Siro C., Pollo A. & Antognini M. 2020a. Il permafrost nelle Alpi ticinesi (2017/2018 e 2018/2019). Rapporto No. 5 del Gruppo Permafrost Ticino. *Bollettino della Società ticinese di scienze naturali*, 108: questo volume.
- Scapozza C., Deluigi N., Bulgheroni M., Pera S., Pozzoni M., Colombo L. & Lepori F. 2020b. Assessing the impact of ground ice degradation on high mountain lake environments (Lago Nero catchment, Swiss Alps). *Aquatic Sciences*, 82: 5.
- Seppi R., Carton A. & Baroni C. 2005. Proposta di una nuova scheda per il censimento dei rock glaciers da fotografie aeree: applicazione sull'Alta Val Ultimo (Gruppo Ortles-Cevedale). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 7: 329-338.
- Staub B., Marmy A., Hauck C., Hilbich C. & Delaloye R. 2015. Ground temperature variations in a talus slope influenced by permafrost: a comparison of field observations and model simulations. *Geographica Helvetica*, 70: 45-62.
- Swets J.A. 1988. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 240(4857): 1285-1293.
- Vapnik V. 1998. Statistical learning theory. New York, Wiley, 736 pp.
- Washburn A.L. 1979. Geocryology: a survey of periglacial processes and environments. London, Arnold.

APPENDICE

PERMAL-TI: Carta della ripartizione potenziale del permafrost nelle Alpi Ticinesi. Disponibile su: <http://repository.supsi.ch/11589> (ultima consultazione: 4.6.2020).

