

# STIMA tramite misure Ground Penetrating Radar e rilievi GNSS VOLUMETRICA DEL GHIACCIAIO DI ALPE SUD

**Matteo Rossi**  
Università degli Studi di Padova,  
Dipartimento di Geoscienze; NEOS srl

**Marco Belò**  
Trimble Navigation

**Matteo Fioletti,  
Luigi Bonetti**  
ARPA Lombardia,  
Centro Nivometeorologico Bormio

Il Ghiacciaio di Alpe Sud è un apparato glaciale Lombardo, situato nel comune di Valfurva in provincia di Sondrio, sul massiccio del Monte Sobretta (3296 m s.l.m.).

Su tale ghiacciaio vengono regolarmente svolte, dai tecnici del Centro Nivometeorologico di ARPA Lombardia, analisi sia nel periodo invernale che in quello estivo. Mediante le misure differenziali su paline ablatometriche, supportate da accurate misure GNSS (Global Navigation Satellite Systems) in superficie, è possibile ricostruire le variazioni di massa dell'apparato glaciale. Tuttavia questo tipo di misurazioni non tiene conto della superficie basale del ghiacciaio, non permettendo l'effettuazione di modelli previsionali volti a stimare la risorsa idrica immediatamente disponibile.

A tale scopo nel settembre 2011 è stata effettuata una campagna di misure Georadar in concomitanza con il rilievo GNSS della superficie glaciale e la lettura delle paline. La superficie del bedrock, che costituisce il substrato sedimentario-roccioso, è stata ricostruita grazie all'elaborazione di profili Georadar, acquisiti con antenne da 100 MHz e distribuiti uniformemente sull'intera superficie del ghiacciaio. La superficie basale, una volta ricostruita nella sua tridimensionalità, produce un modello digitale del terreno, che diviene un caposaldo di riferimento per l'analisi delle variazioni volumetriche nel tempo. La disponibilità di rilievi GNSS superficiali dal 1997 ad oggi permette inoltre di valutare le variazioni spaziali di spessore di ghiaccio attraverso gli anni. Questo consente di enfatizzare quali siano le dinamiche di ablazione e di localizzare eventuali processi di ablazione differenziale. La comprensione di tali fenomeni permette di incrementare la nostra conoscenza sulle dinamiche glaciologiche ed apporta essenziali informazioni per ottenere modelli accurati e previsioni attendibili sulla disponibilità della risorsa idrica di origine glaciale.



## INTRODUZIONE

Lo studio dei bilanci di massa dei ghiacciai è un argomento di grande interesse, balzato alla ribalta delle cronache soprattutto negli ultimi anni a fronte del cambiamento climatico in atto. I ghiacciai e i nevai alpini rappresentano la riserva idrica principale del bacino padano e il loro progressivo processo di ablazione è una delle principali cause delle ripetute crisi idriche, soprattutto estive, che hanno interessato la pianura padana e, di recente, anche alcune zone prealpine. Le informazioni sulle variazioni di massa sono usualmente ottenute con misure differenziali su paline talvolta supportate da rilievi GNSS (Global Navigation Satellite Systems) in superficie.

A partire dagli anni 50 la tecnologia di Radio Echo-Sounding seguita dopo qualche decennio da quella dei sistemi Ground Penetrating Radar (GPR) iniziano a portare un concreto contributo per le indagini glaciologiche. Le prime esperienze in assoluto di misure GPR per applicazioni glaciologiche risalgono al 1929, grazie al lavoro

condotto da Stern sul ghiacciaio di Hintereis (Stern, 1929) in Tirolo. Nella seconda metà dello scorso secolo i sistemi GPR vengono sempre più apprezzati per risultati, operatività e portabilità anche per impiego in ambiente glaciale, con la finalità di investigare principalmente gli spessori degli apparati raccogliendo dati sull'interfaccia ghiaccio-badrock (Gudmandsen P., 1975; Hodge et al., 1990). Investigazioni principalmente orientate allo studio delle grandi calotte polari artiche ed antartiche, e successivamente condotte sui ghiacciai alpini hanno permesso di individuare nella tecnologia radar un valido strumento per lo studio delle caratteristiche fisiche, meccaniche e idriche degli apparati glaciali. Alcuni paesi si sono recentemente dotati di significativi database contenenti dati radar relativamente ai principali apparati glaciali (Fischer et al., 2013).

Il dato di spessore ottenuto da GPR diviene fondamentale per la stima della risorsa idrica calcolabile a partire dalla volumetria del ghiacciaio. La ricostruzione della superficie del bedrock attraverso modelli digitali del terreno (DEM) diviene quindi uno strumento essenziale per ottenere un'accurata quantificazione degli spessori assoluti di ghiaccio (Villa et al., 2008; Rippin et al., 2003). Il presente lavoro illustra come questa metodologia sia stata applicata per un apparato glaciale del Gruppo Ortles-Cevedale, il Ghiacciaio dell'Alpe Sud.

## AREA DI STUDIO

Il Ghiacciaio di Alpe Sud è un apparato glaciale Lombardo, situato nel comune di Valfurva in provincia di Sondrio, sul massiccio del Monte Sobretta (3296 m s.l.m.). Esso occupa la porzione sommitale della Valle dell'Alpe, tributaria di sinistra della Valle del Gavia. È un ghiacciaio di tipo montano, ha un'esposizione rivolta a Sud-Est e riceve un'alimentazione diretta (legata prevalentemente alle nevicate sul ghiacciaio). È caratterizzato da un corpo principale di forma triangolare con il vertice rivolto verso valle e una debole inclinazione media. Nel settembre 2011 era compreso tra una quota massima

di 3233 m s.l.m. e una quota minima di 3118 m s.l.m.

Tra le caratteristiche che rendono tale apparato "ideale" per uno studio costante nel tempo vi sono:

- **la posizione:** è facilmente raggiungibile durante tutto l'anno dai tecnici del Centro Nivometeorologico (CNM) di ARPA Lombardia. Il sito di Alpe Sud viene monitorato sia nella stagione invernale di accumulo che in quella estiva di ablazione.
- **le caratteristiche morfologiche**
- **un apporto nivologico esclusivamente per accumulo diretto.**

Dall'ottobre 1997 è in atto una collaborazione tra il CNM di ARPA Lombardia e il Servizio Glaciologico Lombardo, la quale prevede l'esecuzione di campagne di misura di alta precisione.

L'attività di studio e monitoraggio è organizzata in questo modo:

**Rilievi invernali:** svolti a cadenza mensile, prevedono l'esecuzione di misure dell'altezza del manto nevoso, profili stratigrafici e monitoraggio fotografico.

**Rilievi estivi:** svolti a cadenza quindicinale, prevedono l'esecuzione di misure di ablazione, esecuzione di profili stratigrafici e monitoraggio fotografico.

A partire dall'anno 2006 una collaborazione con la società Trimble Navigation permette di affiancare ai rilievi glaciologici svolti nel periodo estivo accurate misure di dettaglio GNSS. I risultati di queste misure vengono in questo lavoro usati come riferimenti superficiali per la determinazione delle variazioni volumetriche.

L'insieme dei dati ottenuti forniscono informazioni di estrema importanza per valutare l'andamento dell'annata glaciologica.

## STRUMENTI E METODI

Dall'anno 2006 (Belò et al., 2006), con cadenza annuale, sul Ghiacciaio dell'Alpe Sud vengono condotti rilievi GNSS per la stima delle variazioni volumetriche del ghiacciaio. Inoltre un ricco database di osservazioni glaciologiche classiche (paline

Sotto, dall'alto verso il basso, Ghiacciaio di Alpe Sud nel 1989 (superficie: 44 ha); ghiacciaio di Alpe Sud nel 2011 (superficie: 6 ha).



ablatometriche), nivologiche e meteorologiche concorrono a fare del Ghiacciaio dell'Alpe Sud un candidato ideale per l'effettuazione di indagini glaciologiche. Nell'estate 2011 si è deciso di affiancare al rilievo GNSS RTK una campagna di misure di dettaglio GPR. La restituzione del DEM (Digital Elevation Model) dettagliato della superficie basale è stata quindi abbinata ai modelli DEM ottenuti dai rilievi GNSS, permettendo di ricostruire il ghiacciaio nella sua tridimensionalità nel corso degli ultimi otto anni. Il modello superficiale basale diviene un caposaldo di riferimento per l'analisi delle variazioni volumetriche del ghiaccio nel tempo.

Il rilievo GPR è stato effettuato con lo strumento Sensors and Software Pulse EKKO PE100, equipaggiato con antenne superficiali da 100 MHz. Si è proceduto con due modalità di acquisizione.

Il survey preliminare è avvenuto con configurazione WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*), dove l'antenna ricevente è stata progressivamente allontanata dalla trasmittente. Tale modalità di acquisizione permette di ottenere il "tempo zero" per la correzione dello *shift* temporale delle tracce. La configurazione WARR permette inoltre, attraverso l'individuazione dell'onda diretta nel ghiaccio, di ottenere una stima di velocità delle onde elettromagnetiche (EM) all'interno del mezzo attraversato. La velocità delle onde EM calcolata è di 0.179 m/ns.

La configurazione *zero-offset-profile* (ZOP), distanza fra le antenne di 1 m, è stata invece applicata a 13 profili eseguiti sulla superficie del ghiacciaio (Fig. 1a). Il rilievo è avvenuto in continuo con acquisizione della posizione della traccia tramite tecnologia GNSS.

I 13 radargrammi acquisiti sono stati processati al fine di migliorare il rapporto segnale/rumore, di individuare distintamente il contatto ghiaccio-substrato e di trasformare il dato dal dominio del tempo ad un profilo di profondità (esempio processing Linea 2 in Fig. 2). Le fasi del *processing* si sintetizzano in:

- Applicazione filtro Dewow (rimozione



Esecuzione di rilievi GNSS: Stazione fissa (Master).



Misure in Real Time.



Fasi di esecuzione del rilievo con Ground Penetrating Radar da superficie.

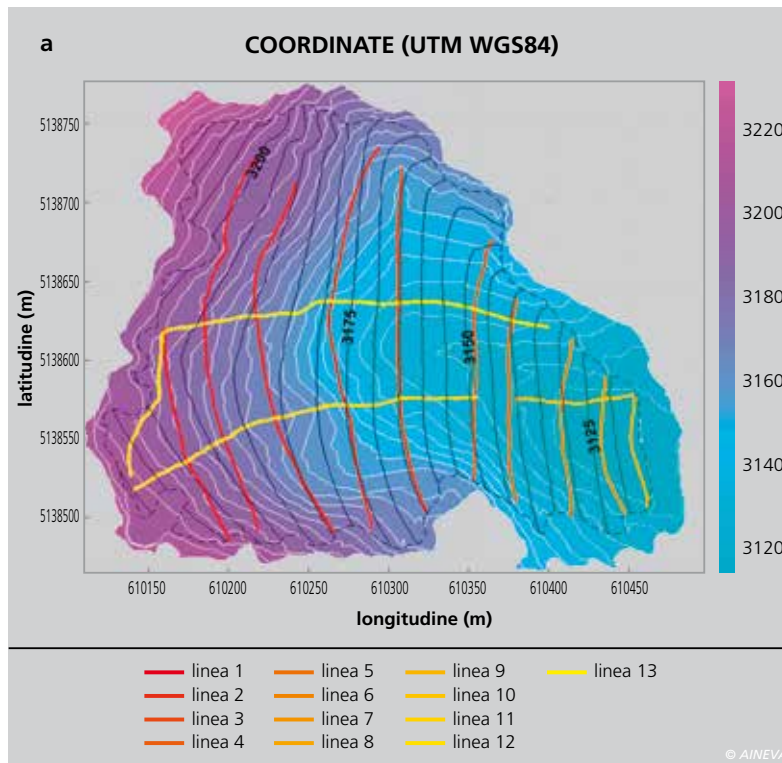


- rumore di fondo a bassa frequenza)
- Desaturazione delle tracce
- Filtro passabanda (per isolare lo spettro di frequenza contenente il segnale di interesse)
- Correzione tempo zero (rimozione dello *shift* temporale delle tracce)
- Gain (per uniformare l'ampiezza del segnale nel dominio del tempo)

- Correzione statiche (inserimento della topografia nel radargramma)
  - Trasformazione in profondità (ottenuta applicando la velocità delle onde EM stimata dal profilo WARR)
- La migrazione non è risultata necessaria al presente dataset, poiché le velocità in gioco sono molto elevate mentre le pendenze dei riflettori sono modeste: l'applicazione

della migrazione non modifica la posizione dei riflettori. La correzione di eventuali iperboli di diffrazione che si incontrano nel substrato esula dall'interesse del presente lavoro ed inoltre il materiale roccioso/deposizionale alla base del ghiacciaio si presenta molto caotico all'indagine GPR.

Fig. 1 - a) DEM della superficie basale del ghiacciaio (scala colori) con isolinee bianche ogni 5 m. Le isolinee nere rappresentano il rilievo GNSS superficiale effettuato nel 2011, anno in cui è stato effettuato il rilievo GPR lungo i profili marcati con linee da rosso a giallo. La linea nera tratteggiata individua l'estensione perimetrale del ghiacciaio. b) Rappresentazione 3D del substrato a letto del ghiacciaio, isolinee ogni 5 m.

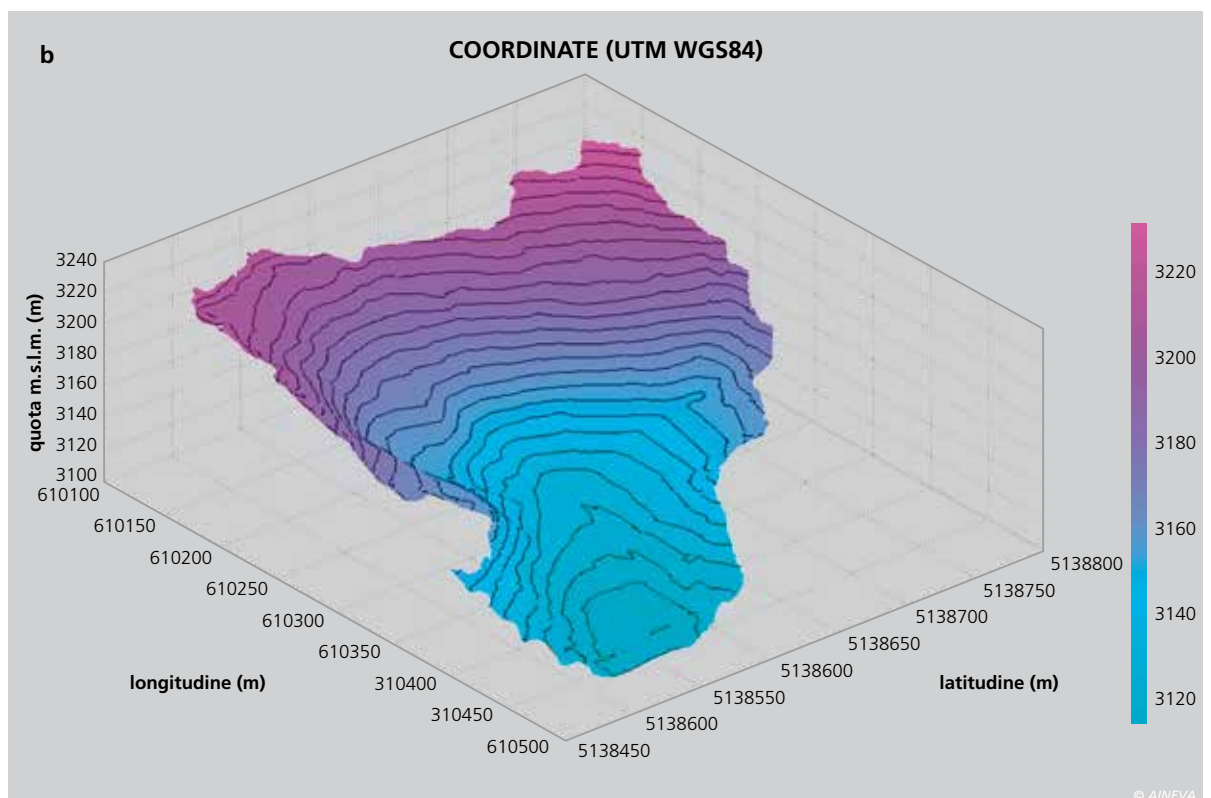


## MODELLO ALTIMETRICO DEL SUBSTRATO

L'individuazione delle evidenti riflessioni ghiaccio-substrato (opportunamente trasformate in profondità metriche, Fig. 2) ha permesso di ottenere, attraverso il rilievo GNSS delle tracce GPR, le quote altimetriche del substrato.

Data la buona copertura dei rilievi ZOP GPR, uniformemente distribuiti sulla superficie del ghiacciaio, ed i modesti cambi di pendenza, si è potuto procedere con una interpolazione lineare su griglia di 1x1 m per ottenere un accurato DEM del substrato glaciale (Fig. 1). Il perimetro del ghiacciaio è stato ottenuto dal rilievo GNSS superficiale del 2011.

Estrapolata la morfologia del substrato si è potuto procedere al calcolo degli spessori di ghiaccio avvalendosi del rilievo GNSS superficiale (2011), che presenta punti di



misura maggiormente distribuiti sulla superficie topografica rispetto ai profili GPR. La medesima operazione è stata poi estesa ai rilievi GNSS dal 2006 al 2012, ottenendo dei modelli di spessore che mostrano l'evoluzione volumetrica del ghiacciaio negli anni.

## RISULTATI E CONCLUSIONI

Il DEM del substrato glaciale e i DEMs superficiali, ottenuti dai rilievi GNSS, hanno permesso di valutare l'evoluzione degli spessori di ghiaccio nel tempo (Fig. 3). Si può notare come negli anni l'area e lo spessore di ghiacciaio si siano complessivamente ridotti. La morfologia del volume di ghiaccio ha subito delle variazioni mostrando una differente distribuzione degli spessori.

Nei boxplot di Fig.3 si può notare che media e varianza degli spessori diminuiscono progressivamente negli anni. La progressiva riduzione della varianza porta ad una maggiore uniformità dello spessore di ghiaccio anche se la forma dei plot, e quindi del profilo di spessore, rimane simile. Questo aspetto si può notare anche nei plot di Fig. 4 dove le statistiche riassumono le variazioni di spessore negli anni rispetto alla quota del substrato e permettono di comprendere come si stia distribuendo lo spessore residuo di ghiaccio. Le riduzioni di volume sono distribuite abbastanza uniformemente sulla base del substrato, anche se più marcate alle quote intermedie rispetto alle elevazioni marginali.

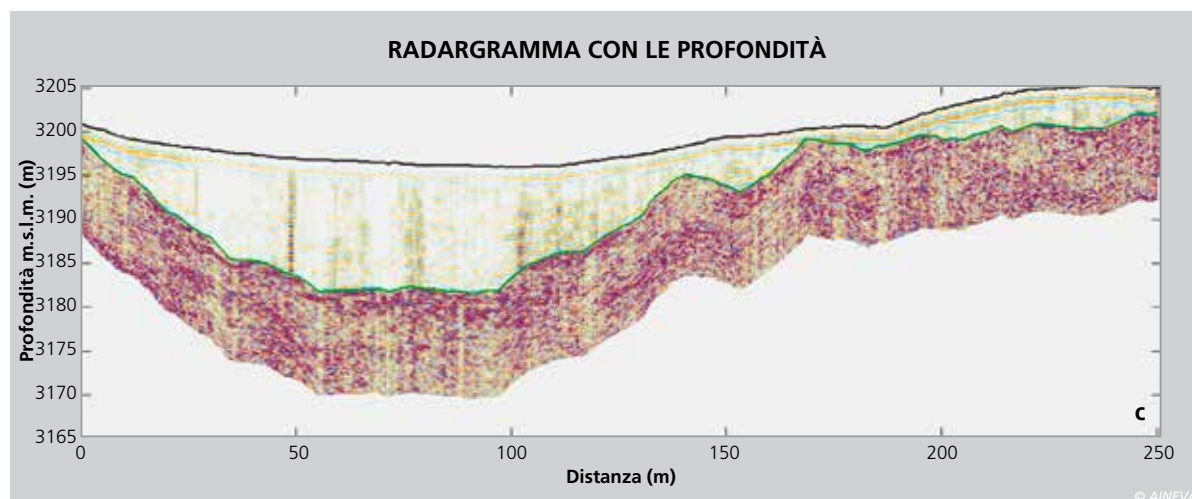
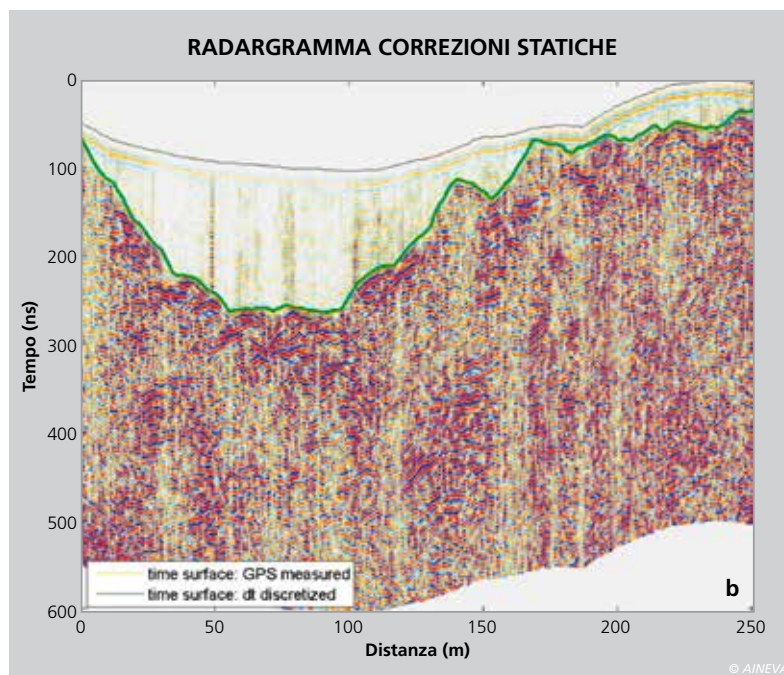
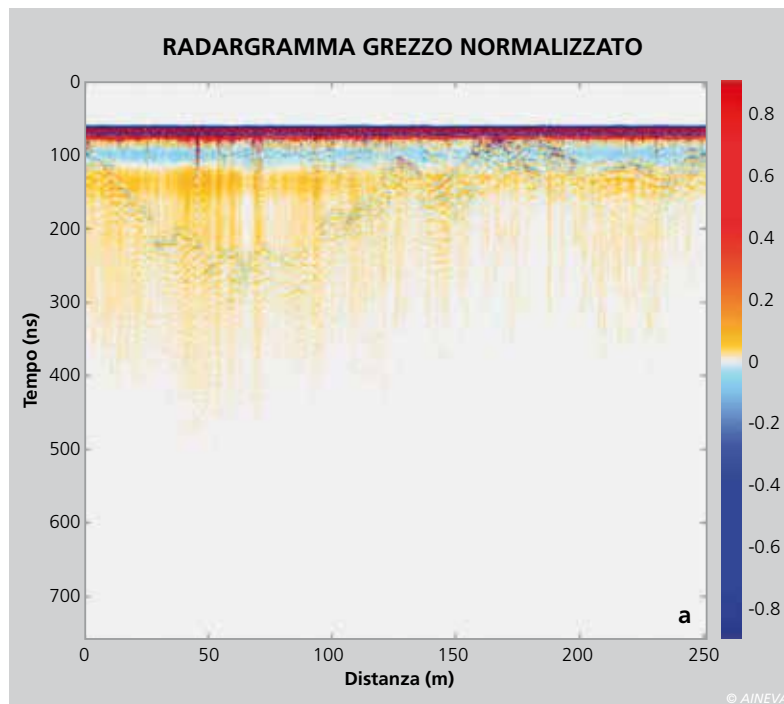
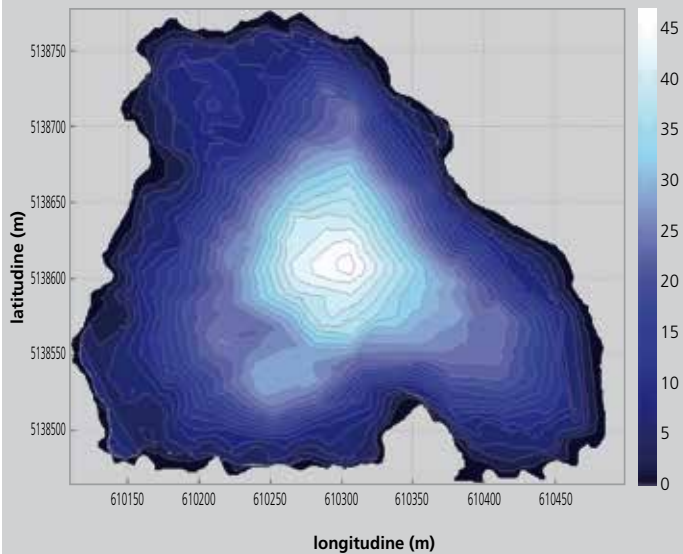


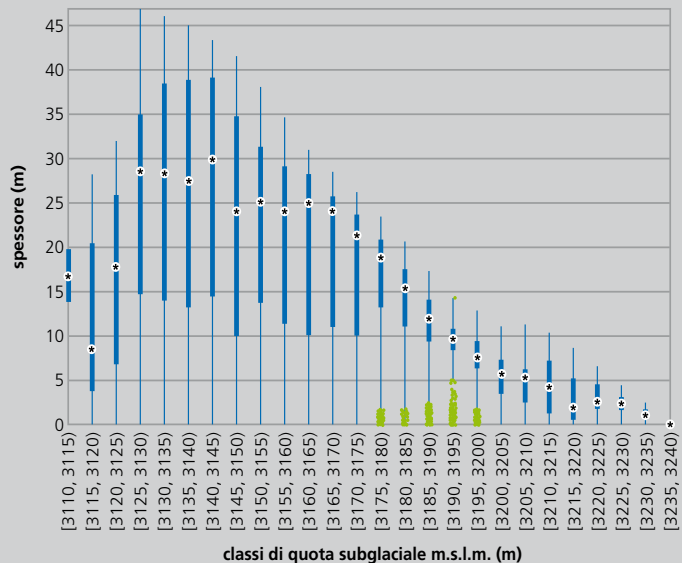
Fig. 2 - Esempio di elaborazione del dato GPR (linea 2 di Fig. 1a). a) Radargramma del profilo GPR normalizzato. b) Radargramma del dato processato. c) Profilo GPR trasformato in profondità. Le linee verdi indicano il picking della riflessione a contatto fra ghiaccio e substrato, mentre le linee nere indicano la superficie topografica.

2006 SPESSORE (UTM WGS84)



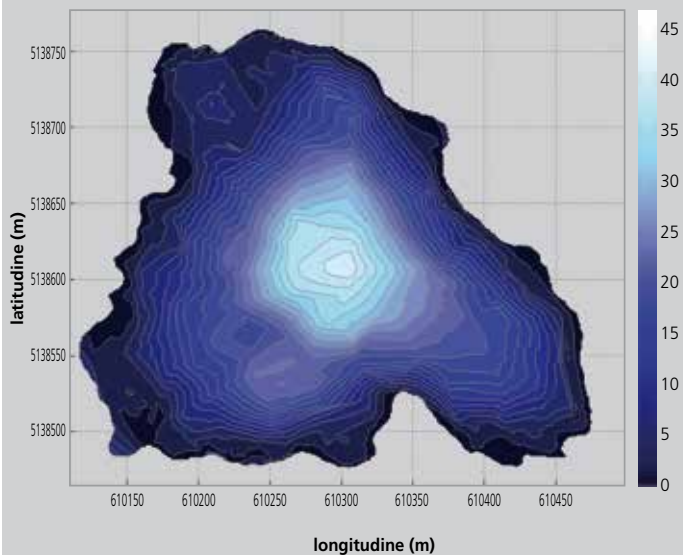
© AINEVA

BOX PLOT SPESSORE: 2006



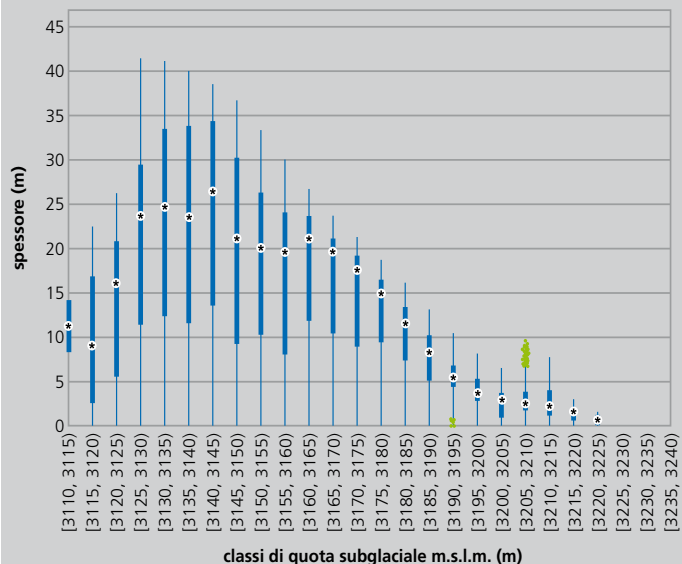
© AINEVA

2009 SPESSORE (UTM WGS84)



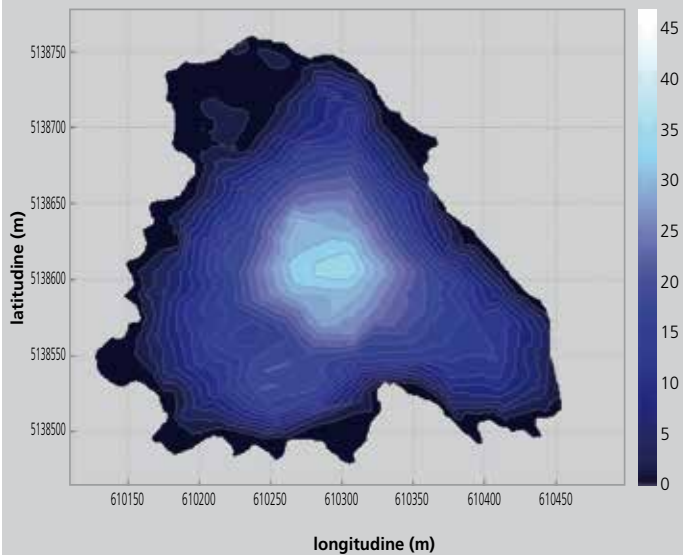
© AINEVA

BOX PLOT SPESSORE: 2009



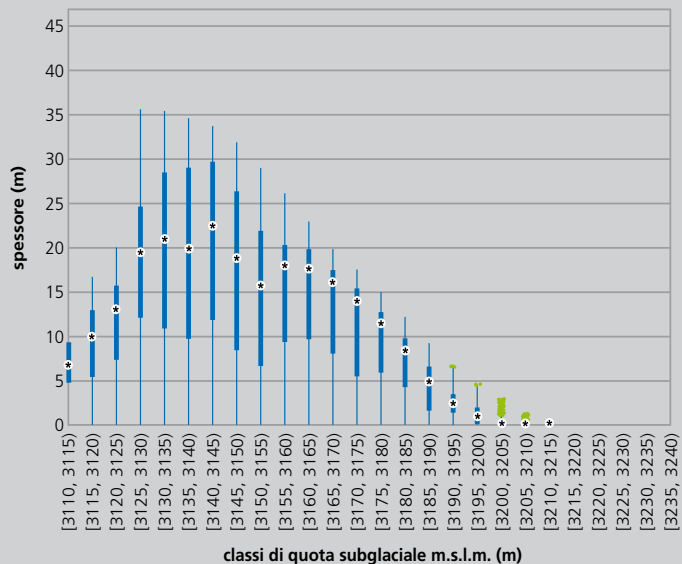
© AINEVA

2012 SPESSORE (UTM WGS84)



© AINEVA

BOX PLOT SPESSORE: 2012



© AINEVA

La conseguenza è che la concavità alla base del ghiacciaio (Fig. 1b), che ospita la maggior riserva idrica, si sta progressivamente svuotando, ma ad un tasso proporzionalmente inferiore rispetto alle porzioni più elevate. Un probabile scenario futuro, se continua il bilancio volumetrico negativo, mostrerà quindi la presenza di

ghiaccio residuo soltanto nella porzione di substrato compresa circa fra le quote 3130-3170 m s.l.m..

Tuttavia il dato di maggior interesse, ottenuto dalla sovrapposizione dei DEM basale e superficiali, è la stima volumetrica assoluta del ghiacciaio e l'evoluzione temporale della stessa. In Fig. 5 si può

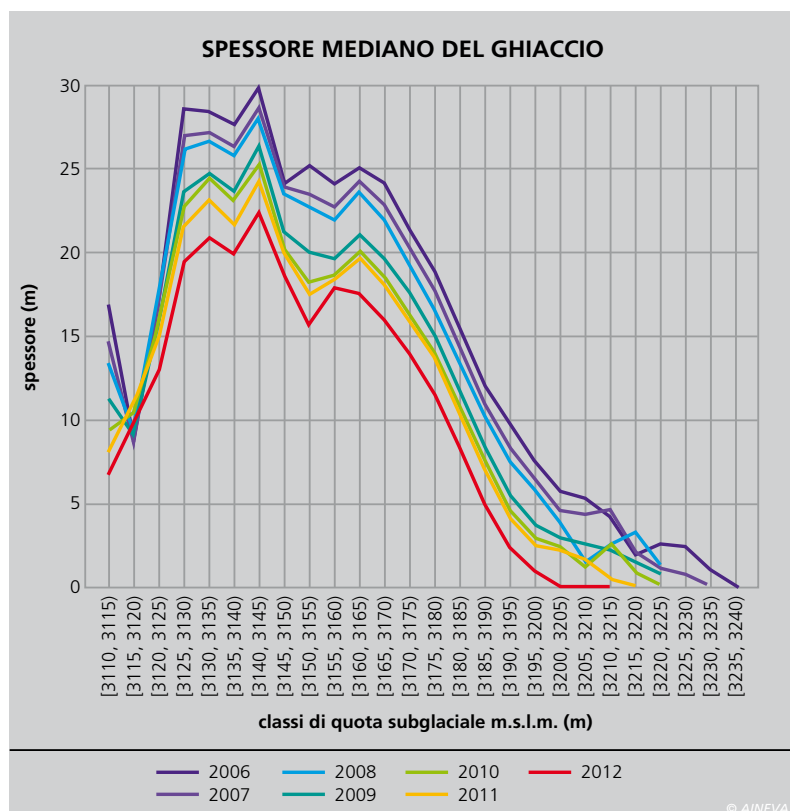
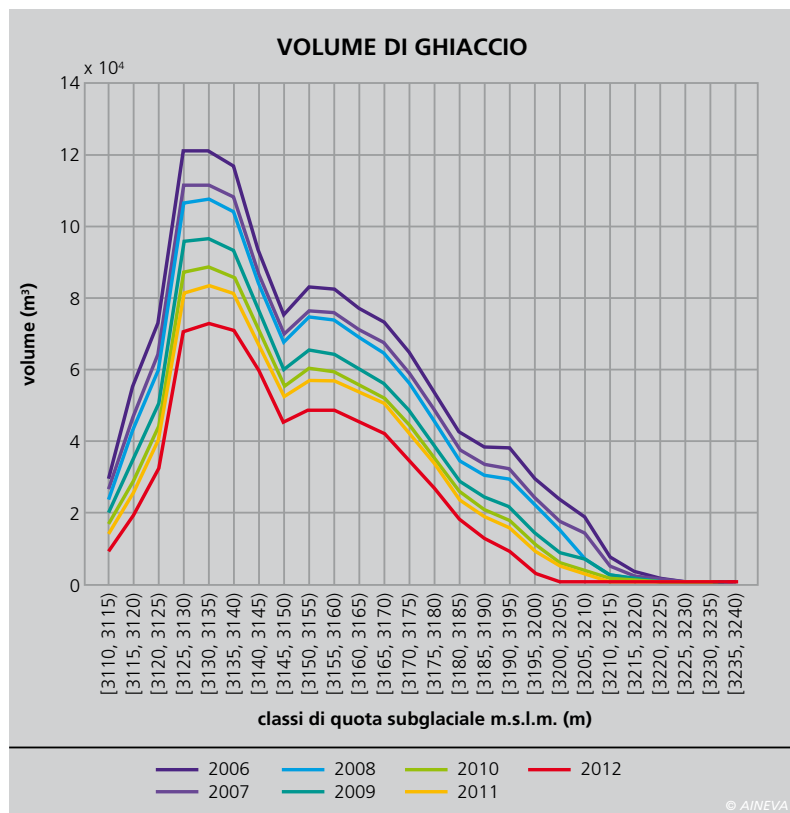
infatti notare come il volume di ghiaccio complessivo si sia dimezzato in soli 6 anni, con una perdita quasi lineare fino ad arrivare nel 2012 al 50.6% del volume stimato per l'anno 2006. Questo dato è di notevole importanza, poiché permette di avere una accurata stima del volume che si sta rapidamente perdendo per ablazione.

Il lavoro svolto sul ghiacciaio di Alpe Sud ha dimostrato come le tecniche GPR, conformemente a quanto disponibile in letteratura, siano uno strumento di indagine molto accurato ed estremamente valido, permettendo un calcolo molto preciso dei volumi di ghiaccio sciolti e delle riserve idriche ancora disponibili. La variazione della massa di ghiaccio, se opportunamente integrata in modelli di evoluzione glaciale, potrebbe inoltre portare a stime previsionali sulla persistenza del ghiacciaio nel futuro.

*Nella pagina a fianco, fig. 3 - Evoluzione dello spessore di ghiaccio per gli anni 2006, 2009 e 2012. Nella colonna di sinistra la visione in pianta degli spessori di ghiaccio con isolinee ogni 2 m. Nella colonna di destra i boxplot degli spessori di ghiaccio suddivisi per classi di quota del substrato (ogni 5 m).*

*A sinistra, dall'alto verso il basso, fig.4 - Riassunto delle statistiche dello spessore di ghiaccio suddivise in classi di quota superficiale (ogni 5 m): sopra il volume di ghiaccio che interessa la classe di quota, mentre sotto il valore di spessore mediano.*

*In basso, fig. 5 - Bilancio volumetrico del ghiacciaio Alpe Sud: il volume di ghiaccio in 6 anni si è ridotto al 50.6% del volume iniziale.*



## Bibliografia

- Belò M., Bonetti L., Urbani S., Peretti G., Panieri V., 2006: "Studi glaciologici ed innovazione. Le nuove frontiere offerte dal GPS." Neve e Valanghe.
- Fisher A., Kuhn M., 2013: "Ground-penetrating radar measurements of 64 Austrian glaciers between 1995 and 2010". Annals of Glaciology 54 (64), 179-188.
- Gudmandsen P., 1975: "Layer Echoes in polar ice sheets". Journal of Glaciology, 15 (73), 95-101.
- Hodge S.M., D.L. Wright, J.A. Bradley, R.W. Jacobel, N. Skou and B. Vaughn, 1990: "Determination of the surface and bed topography in central Greenland". Journal of Glaciology, 36 (122), 17-30.
- Rippin D., Willis I., Arnold N., Hodson A., Moore J., Kohler J., Björnsson H., 2003: "Changes in geometry and subglacial drainage of Midre Lovénbreen, Svalbard, determined from digital elevation models". Earth Surface Processes and Landforms 28(3):273 - 298.
- Stern W., 1930: "Überundlagen Methodik und bisherige Ergebnisse elektrodynamischer Dickenmessung von Gletschereis". Z. Gletscherkunde, vol.15, pp. 24-42.
- Villa F., Tamburini A., De Amicis M., Sironi S., Maggi V., Rossi G.C. (2008): "Volume decrease of Rutor Glacier (Western Italia Alps) since Little Ice Age: a quantitative approach combining GPR, GPS and cartography". Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 31 (1), 63-70.

