

LUCA MONDARDINI <sup>1\*</sup>, PAOLO PERRET <sup>1</sup>, MARCO FRASCA <sup>1</sup>,  
SIMONE GOTTARDELLI <sup>1</sup> & FABRIZIO TROILO <sup>1</sup>

## LOCAL VARIABILITY OF SMALL ALPINE GLACIERS: THOULA GLACIER GEODETIC MASS BALANCE RECONSTRUCTION (1991-2020) AND ANALYSIS OF VOLUMETRIC VARIATIONS

**ABSTRACT:** MONDARDINI L., PERRET P., FRASCA M., GOTTARDELLI S. & TROILO F., *Local variability of small Alpine glaciers: Thoula Glacier geodetic mass balance reconstruction (1991-2020) and analysis of volumetric variations*. (IT ISSN 0391-9838, 2021).

High Alpine environments are rapidly changing in response to climate change, and understanding the evolution of small glaciers is a crucial step in the investigation of future water availability for populations that inhabit these areas. With this study, we present a comprehensive analysis of a small glacier's recent mass balance evolution (1991-2020), located on the Italian side of the Mont-Blanc Massif, where very little previous data were available. To do so, we combined historical data (topographic surveys and LiDAR DEMs of the area) with newly acquired satellite stereo imagery and aerophotogrammetric surveys to obtain multi-temporal digital elevation models (DEMs) of the Thoula Glacier (0.52 km<sup>2</sup>). The total ice volume estimation was assessed by accomplishing a GPR survey to investigate the ice thickness and the underlying bedrock. The Thoula Glacier shows a significantly lower loss of volume in comparison to other glaciers located in the Aosta Valley region as well as most of the reference glaciers of the World Glacier Monitoring Service (WGMS) for Central Europe. Particular weather-climatic conditions of the Mont Blanc Massif area, generally characterized by a greater amount of precipitation, could explain the observed differences; however, the present study shows that understanding spatio-temporal local variability of small glaciers can significantly contribute to recognizing different regional and intra-regional patterns of response to climate change.

**KEY WORDS:** Helicopter-borne GPR, Volume variations, Ice thickness, Mass balance, UAV photogrammetry, Digital elevation models (DEMs), Remote sensing.

**RIASSUNTO:** MONDARDINI L., PERRET P., FRASCA M., GOTTARDELLI S. & TROILO F., *Variabilità locale dei piccoli ghiacciai alpini: ricostruzione del bilancio di massa geodetico del ghiacciaio del Thoula (1991-2020) e analisi delle variazioni volumetriche*. (IT ISSN 0391-9838, 2021).

<sup>1</sup> Area Ghiacciai e Alta Montagna, Fondazione Montagna sicura - Courmayeur - Italy.

\* Corresponding author: L. Mondardini (lmondardini@fondms.org)

This paper has been selected for publication among those presented at the 24<sup>th</sup> Alpine Glaciological Meeting held in Milano (Italy) from 25<sup>th</sup> to 26<sup>th</sup> March 2021 and organized by the University of Milano, the University of Milano-Bicocca, the Italian Glaciological Committee and the Bavarian Academy of Science and Humanities. This study has been conducted and financed in the framework of the project Interreg Alcotra 2014-2020 (IT-FR) RISK-ACT-PITEM RISK.

Gli ambienti di alta montagna stanno rapidamente cambiando in risposta ai cambiamenti climatici e comprendere l'evoluzione dei piccoli ghiacciai è un passo cruciale nell'indagine sulla futura disponibilità di acqua, per le popolazioni che abitano in questi luoghi. Con questo studio, presentiamo un'analisi completa della recente evoluzione del bilancio di massa di un piccolo ghiacciaio (1991-2020), situato sul versante italiano del Massiccio del Monte Bianco, di cui si possedeva un numero limitatissimo di dati pregressi. A tale scopo, abbiamo abbinato dati storici (rilievi topografici e dati LiDAR dell'area) ad immagini stereo satellitari di nuova acquisizione e rilievi aerofotogrammetrici per ottenere modelli altimetrici digitali (DEMs) multi-temporali del ghiacciaio del Thoula (0,52 km<sup>2</sup>). La stima del volume totale di ghiaccio è stata determinata effettuando un'indagine GPR, che ha permesso di analizzare lo spessore del ghiaccio ed il substrato roccioso sottostante. Il ghiacciaio del Thoula mostra una perdita di volume significativamente inferiore rispetto ad altri ghiacciai situati in Valle d'Aosta, così come rispetto alla maggior parte dei *reference glaciers* del *World Glacier Monitoring Service* (WGMS) relativi all'Europa centrale. Particolari condizioni meteo-climatiche dell'area del Massiccio del Monte Bianco, generalmente caratterizzata da una maggiore quantità di precipitazioni, potrebbero spiegare le differenze osservate; tuttavia, il presente studio mostra come la comprensione spatio-temporale della variabilità locale dei piccoli ghiacciai possa contribuire in modo significativo a riconoscere diversi modelli regionali e intra-regionali di risposta ai cambiamenti climatici.

**TERMINI CHIAVE:** GPR elicotristratato, Variazioni volumetriche, Spessore del ghiaccio, Bilancio di massa, Fotogrammetria UAV, Modelli altimetrici digitali (DEMs), Telerilevamento.

## INTRODUCTION

Worldwide glacier mass loss caused by a warming climate is well known and studied (Sayli Atul Tawde & alii, 2019; Huss, 2012; IPCC, 2019). The extensive retreat recorded in the last couple of decades is exceeding, in rapidity and volume, previous mass balance loss predictions (Hugonnet & alii, 2021). The effects of this rapid retreat have already been observed at both a global and regional scale, with mountain glacier ice loss already contributing to sea level rise (Jacobs & alii, 2012; Radić & alii, 2011), accounting for an increase in natural hazards (Fischer & alii, 2006) and affecting wa-