



Doctoral Thesis

Simple methods for inferring glacier ice-thickness and snow-accumulation distribution

Author(s):

Farinotti, Daniel

Publication Date:

2010

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006194634> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 19268

**Simple methods for inferring glacier ice-thickness
and snow-accumulation distribution**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

DANIEL FARINOTTI

Umwelting. ETH

born 9 January, 1982

citizen of Gordola TI, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. M. Funk, examiner

Prof. Dr. P. Burlando, co-examiner

Dr. A. Bauder, co-examiner

Dr. A. Vieli, co-examiner

Dr. M. Huss, co-examiner

2010

Abstract

Glaciers are prominent features in mountainous environments and with the ongoing climate change their importance has become aware to the wide public: Glaciers epitomize a healthy, untouched environment, are a key element of the water cycle, contribute largely to the current rate of sea-level rise and are amongst the most reliable climate indicators. Knowledge of recent behavior and future changes of glaciers is, thus, of great interest.

From the beginning of the last century, large efforts have been performed in order to build up and maintain networks for glacier monitoring. In this respect, the advent of remote-sensing techniques has contributed to fast progress. However, some fundamental quantities for the characterization of a glacier, such as the total ice volume, the distribution of the ice-thickness, the accumulation and the ablation, are difficult to determine from remotely-sensed data.

In this thesis, two new approaches are proposed for the inference of two distributed glacier variables which are generally difficult to estimate: ice-thickness and accumulation distribution. Both variables are of fundamental importance for many applications including ice-flow modeling, hydrological analysis or runoff forecasting.

A first method is proposed for inferring the ice-thickness distribution based on the principle of mass conservation and considerations on the ice-flow mechanics. Given a few parameters controlling the surface mass balance and the dynamics of the ice-flow, the ice-thickness distribution is derived from the characteristics of the surface topography. The result is thus, not only the total volume of a glacier, but also its spatial distribution. The method is able to integrate a-priori information about the ice thickness possibly available from radio-echo soundings or borehole measurements and is shown to perform with satisfactory accuracy.

The method is applied to a set of glaciers in the Swiss Alps and the results are used to calibrate a volume-area scaling relation. With the combination of the two approaches the total glacier ice volume present in the Swiss Alps in 1999 is estimated. The importance of large glaciers as contributors to the total volume is shown and an average mass-balance time-series is used to quantify the relative volume loss in the last decade. It is estimated that 12% of the $74 \pm 9 \text{ km}^3$ of glacier ice present in the Swiss Alps in 1999, have melted until 2008. Out of this volume change, almost 30% was lost during the extraordinary warm summer 2003.

A second approach is proposed for inferring the distribution of snow accumulation by combining time-lapse photography and simple modeling. The parameters of a simple accumulation model, coupled to a distributed temperature-index melt model, are adjusted in an iterative procedure in order to reproduce the temporal evolution of the meltout-pattern observed during the ablation season. The small-scale variability is accounted for in a diagnostic way and lumped in a spatially distributed variable which summarizes all non-modeled snow redistribution processes. The comparison with in-situ snow-depth measurements shows that the achieved accuracy is in the same order as the results yielded by an inverse-distance interpolation scheme of the direct measurements. The influence of topographical variables is explored and local slope and curvature are shown to have a significant effect on the detected accumulation pattern.

Riassunto

I ghiacciai sono un elemento caratteristico degli ambienti alpini. Con il cambiamento climatico in corso e le preoccupazioni per la loro scomparsa, la loro importanza è ormai nota anche al vasto pubblico: i ghiacciai sono il simbolo di un ambiente sano e incontaminato, sono elementi chiave nel ciclo idrologico, contribuiscono in maniera significativa al corrente tasso d'innalzamento del livello del mare e sono tra i più affidabili indicatori climatici. L'evoluzione passata e futura dei ghiacciai è perciò di grande interesse.

A partire dall'inizio del secolo scorso, notevoli sforzi sono stati profusi per instaurare e mantenere dei programmi di monitoraggio al cui recente rapido sviluppo ha contribuito in modo sostanziale l'avvento di moderne tecniche di telerilevamento. Alcune grandezze fondamentali, come per esempio il volume totale di un ghiacciaio, la distribuzione spaziale dello spessore del ghiaccio, dell'accumulo o dell'ablazione, non sono però rilevabili facilmente.

In questa tesi vengono proposti due nuovi metodi con i quali stimare la distribuzione spaziale di due variabili generalmente di difficile valutazione: la distribuzione dello spessore del ghiaccio e quella dell'accumulo nevoso. Entrambe le variabili sono di fondamentale importanza per diverse applicazioni come, ad esempio, la modellizzazione della dinamica di un ghiacciaio, del suo bilancio di massa o dei deflussi di scioglimento.

Il metodo presentato per la stima della distribuzione dello spessore del ghiaccio è basato sulla legge della conservazione della massa e alcune considerazioni sulla sua meccanica di deformazione. Noti alcuni parametri governanti la distribuzione del bilancio di massa in superficie e la dinamica del flusso di massa, la distribuzione spaziale dello spessore è ricavata da caratteristiche topografiche della superficie. Il risultato non è solo una stima del volume totale, bensì anche della sua distribuzione spaziale. Il metodo è implementato in maniera da poter integrare informazioni ottenibili da misure dirette dello spessore e fornisce risultati la cui accuratezza è soddisfacente.

Il metodo è applicato ad un campione di ghiacciai delle Alpi Svizzere e i risultati utilizzati per calibrare una relazione empirica tra area e volume. La combinazione dei due approcci è in seguito adoperata per stimare il volume di ghiaccio presente complessivamente nelle Alpi Svizzere nell'anno 1999. I risultati dimostrano che il volume totale è determinato in maniera sostanziale dai pochi, grandi ghiacciai. Una serie temporale media del bilancio di massa è infine utilizzata per quantificare il volume di ghiaccio sciolto nella scorsa decade. Si stima che dei $74 \pm 9 \text{ km}^3$ di ghiaccio presenti in Svizzera nel 1999, 12% siano andati persi nei 10 anni successivi. Di questo scioglimento, approssimativamente 30% sono da attribuire alla straordinariamente calda estate del 2003.

Il secondo approccio presentato consente di dedurre la distribuzione spaziale dell'accumulo nevoso mediante l'uso combinato di rilievi fotografici ripetuti ad intervalli regolari e di due semplici modelli per l'accumulo e la fusione della neve. I parametri del modello d'accumulo sono stimati attraverso una procedura iterativa di calibrazione basata sulla concordanza dello scioglimento del manto nevoso con le osservazioni dei rilievi fotografici. La variazione spaziale dell'accumulo è parametrizzata attraverso una variabile distribuita integrante una serie di pro-

cessi di redistribuzione non considerati in maniera esplicita. Il confronto con misurazioni dirette dello spessore del manto nevoso dimostra che la procedura proposta è in grado di competere, per quanto riguarda l'accuratezza, con uno schema d'interpolazione delle misure dirette basato sul metodo dell'inverso della distanza. Un'analisi della relazione tra la distribuzione spaziale dell'accumulo e diversi parametri topografici rivela come le variabili 'pendenza' e 'curvatura' siano quelle di maggior influsso.