



Doctoral Thesis

**Modeling the response of high-elevation, glacierized watersheds to climate change  
A new methodological framework applied to the Andes and the Himalaya**

**Author(s):**

Ragetti, Silvan G.

**Publication Date:**

2014

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010394813> →

**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. 22333

Modeling the response of high-elevation,  
glacierized watersheds to climate change:  
a new methodological framework applied to  
the Andes and the Himalaya

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH Zurich  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

SILVAN GABRIEL RAGETTLI

MSc in Environmental Sciences and Engineering,  
École Polytechnique Fédérale de Lausanne

born on 22 October 1984  
citizen of Flims, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paolo Burlando, examiner  
Prof. Dr. Koji Fujita, co-examiner  
Dr. Walter W. Immerzeel, co-examiner  
Dr. Francesca Pellicciotti, co-examiner

2014

# Abstract

Changes in snow cover and glacier area can modify the hydrological cycle of high-elevation catchments. Meltwater is an important contributor and modulator of river flow. Climate warming may lead to a shifting from a glacier dominated hydrological regime to snowfed streamflow timing, or from a snowfed to a rainfall dominated hydrological regime. In the long run, glacier recession therefore generates concerns about the sustainability of summer runoff. Over shorter time scales, however, negative mass balances of glaciers resulting from decreasing precipitation and/or increasing summer temperatures can also lead to an increase of glacier runoff. The Andes of South America and the Himalaya in high-mountain Asia are two regions where prognostic tools are of vital importance to anticipate the impacts of climate change. The two mountain systems hold the largest ice masses outside the polar regions. Major rivers originate here and downstream regions are densely populated. However, the remote high-elevation watersheds of the Andes and the Himalaya are characterized by data-scarcity. In an environment with changing boundary conditions, such as induced by climate change, the modeling of the hydrological response requires appropriate models that can represent the key controlling processes. The lack of glaciological, hydrological and meteorological data, however, is a major restriction for the development and validation of such models. Up to present, most studies in the region therefore base their projections about future streamflow response on conceptual models, adopting strongly simplified representations of the hydrological systems and neglecting some of the physical processes. Further research efforts are needed to inform and validate glacio-hydrological models with specific data on physical processes.

In this thesis, a systematic approach is developed to reduce the predictive uncertainty of models used for the projection of future runoff from high-elevation, glacierized watersheds. The approach is based on an iterative process consisting of several steps including i) data collection, ii) process understanding and model construction, iii) model calibration, iv) model validation and iv) model evaluation and v) uncertainty and sensitivity analysis. Theoretical and practical advances in all these steps provide an improved focus on monitoring techniques in remote high-elevation regions and the exploitation of information for improving skills of glacio-hydrological models. The new methodological framework is finally applied to two high-elevation watersheds in the Central Andes and in the Central Himalaya for projections about future glacier retreat, snow cover dynamics and twenty-first century runoff changes.

The glacio-hydrological model application to the two watersheds shows that both study catchments will experience significant glacier mass loss throughout the twenty-first century. However, the trajectories of simulated future runoff or total melt from glaciers differ fundamentally. For the Langtang region in the Central Himalaya, the model results indicate increasing catchment runoff until mid-century and then either slowly declining or constant runoff, depending on the climate scenario. For the Juncal region in the Central Andes a majority of model realizations indicate sharply declining catchment runoff after 2031-2040, so that annual river runoff may decrease by up to 60% until the end of the century. Differences in catchment response can be explained by differences in climate change projections about future precipitation, but also by the differences in elevation distribution and debris cover of glaciers. In the Juncal region, climate warming furthermore leads to a continuous alignment of seasonal flows and a pronounced reduction and shift of peak summer runoff.

The optimal parameters derived from local data differ substantially between the two sites, and can be directly related to the local climate characteristics of the study catchments. A comparison with previous modeling studies suggests that the differences in model parameters has significant effects on future projections. Given the strong climatic variability over the Andes or the Himalaya, it is therefore concluded that in the future, also large-scale modeling studies should focus on employing more local data to estimate spatially variable optimal parameters. The systematic approach proposed by this thesis can be regarded as a benchmark for modelers in data-scarce, high-elevation regions seeking to evaluate their calibration approach, their experimental setup and thus to reduce the predictive model uncertainty.

# Zusammenfassung

Langfristige Veränderungen von Schnee- und Gletscherflächen können den hydrologischen Kreislauf von Hochgebirgsregionen entscheidend beeinflussen. Schmelzwasser stellt hier oft eine wichtige Abflusskomponente dar. Eine Klimaerwärmung kann eine Verschiebung von einem glaziären zu einem nivalen Abflussregime oder von einem nivalen Regime zu einem Regenregime zur Folge haben. Langfristig beunruhigt daher der gegenwärtig in vielen Gebieten der Erde zu beobachtende Gletscherschwund wegen seines möglichen Einflusses auf den Sommerabfluss. Auf einer kurzfristigen Zeitskala hingegen können negative Gletschermassenbilanzen auch zu einem signifikant ansteigenden Gletscherabfluss führen. Die Anden in Südamerika und der Himalaya in Asien sind zwei Hochgebirgsregionen wo Prognoseinstrumente von grosser Wichtigkeit für die Abschätzung der hydrologischen Auswirkungen von Klimaänderungen sind. Diese zwei Hochgebirgssysteme weisen die grössten Eismassen ausserhalb der Polarregionen auf. Wichtige Flusssysteme entspringen hier und die flussabwärts gelegenen Gebiete sind dicht besiedelt. Allerdings sind die hochgelegenen Anden- und Himalaya-Wassereinzugsgebiete abgelegen und Beobachtungsnetze sehr weitmaschig. In einem Umfeld von sich ändernden Randbedingungen, herbeigeführt zum Beispiel durch Klimaänderungen, sind für die Modellierung von hydrologischen Systemen entsprechende Modelle erforderlich, welche die zugrunde liegende Physik der wichtigsten Prozesse wiedergeben können. Der Mangel an glaziologischen, hydrologischen und meteorologischen Daten stellt jedoch einen grossen limitierender Faktor für solche Modelle dar. Bis zum jetzigen Zeitpunkt basieren die Abflussprojektionen der meisten Studien in diesen Regionen daher auf konzeptionellen Modellen, welche das hydrologische System stark vereinfacht darstellen und gewisse Prozesse nicht abbilden können. Weitere Forschungsanstrengungen sind notwendig, um glazio-hydrologische Modelle anhand von spezifischen Daten zu aktualisieren und zu validieren.

In dieser Doktorarbeit wird ein systematischer Ansatz entwickelt, um die Unsicherheit von Modellsimulationen von zukünftigem Wasserabfluss aus hochgelegenen, vergletscherten Einzugsgebieten zu vermindern. Der Ansatz basiert auf einem iterativen Schema, welches die Teilschritte i) Datenerfassung, ii) Prozessverständnis und Modellkonstruktion, iii) Modellkalibrierung, iv) Modellvalidierung und v) Modellevaluation und Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse umfasst. Fortschritte theoretischer und praktischer Natur in allen erwähnten Arbeitsschritten erlauben einen verbesserten Fokus auf Beobachtungs- und Messtechniken in abgelegenen Hochgebirgsregionen und auf die Nutzung von Informationen zur Verbesserung der Fähigkeiten von glazio-hydrologischen Modellen. Der entwickelte methodologische Ansatz wird schliesslich für Simulationen des zukünftigen Gletscherrückgangs, der Schneebedeckung und Abflussänderungen im einundzwanzigsten Jahrhundert in zwei Einzugsgebieten in den Zentralen Anden und dem Zentralen Himalaya angewendet.

Die Anwendung des glazio-hydrologischen Modells für die zwei Einzugsgebiete verdeutlicht, dass beide Gebiete von signifikantem Gletschermassenverlust über das gesamte einundzwanzigste Jahrhundert hinweg betroffen sind. Allerdings unterscheidet sich der Verlauf der simulierten Abflusskurven oder der totalen Gletscherschmelze grundlegend. Im oberen Langtang Tal im Zentralen Himalaya zeigen die Modellrechnungen ansteigenden Abfluss bis zur Mitte des einundzwanzigsten Jahrhunderts und anschliessend in Abhängigkeit des Klimaszenarios abnehmenden oder konstanten Gesamtabfluss. In der Juncal Region in den Zentralen Anden nimmt der simulierte Abfluss gemäss einer Mehrheit der Modelldurchgänge nach 2031-2040 stark ab, so dass sich der jährliche Gesamtabfluss bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 60% verringert. Das unterschiedliche hydrologische Verhalten in den beiden Untersuchungsgebieten kann auf Unterschiede in den Klimavorhersagen sowie in der Höhenverteilung und Schuttbedeckung der Gletscher zurückgeführt werden. Zugleich führt in dem Juncal Gebiet die vorausberechnete Klimaerwärmung zu einer Angleichung der saisonalen Abflussmengen und zu einer deutlichen Abnahme sowie einer Vorverschiebung der jährlichen Abflussmaxima.

Die optimalen Parameterwerte, abgeleitet von den erfassten Felddaten, unterscheiden sich substantiell zwischen den zwei Untersuchungsgebieten und können direkt auf das lokale Klima zurückgeführt werden. Ein Vergleich mit früheren Modellstudien weist ausserdem darauf hin, dass ermittelte Parameterunterschiede einen signifikanten Effekt auf die Zukunftsprojektionen haben. In Anbetracht der starken Klimavariabilität in den Anden oder dem Himalaya wird daher empfohlen, dass in Zukunft auch grossflächige Modellstudien mehr lokal erfasste Felddaten zur Abschätzung der Parameterwerte heranziehen. Der systematische Ansatz, umrissen durch diese Doktorarbeit, präsentiert zukünftigen hydrologischen Modellanwendungen in datenarmen Hochgebirgsregionen einen Bezugspunkt. Er dient zur Evaluation von Kalibrierungsansätzen und messtechnischen Einrichtungen und führt zu einer Reduktion der Prognoseunsicherheit.