



Doctoral Thesis

Remote Sensing Analyses of Slope Instabilities in Northwestern Bhutan

Author(s):

Dini, Benedetta

Publication Date:

2020

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000387619> →

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 26227

REMOTE SENSING ANALYSES OF SLOPE INSTABILITIES IN NORTHWESTERN BHUTAN

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Benedetta Dini

MSc, UCL

Born on 9 March 1983

Italian citizen

Accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Simon Löw, examiner

Dr. Andrea Manconi, co-examiner

Dr. Janusz Wasowski, external co-examiner

2020

Summary

Slope instabilities adversely affect mountainous regions by posing direct and indirect hazards. Landslides can evolve in catastrophic failures that can directly cause loss of lives, damage to properties and to critical infrastructure. Moreover, indirect effects can cause destruction of arable land and, in case of landslide damming of rivers, subsequent floods that can have an impact a long way downstream of the landslide site. A large-scale overview of unstable slopes in mountainous regions is therefore important in order to understand the spatial distribution, to investigate the activity, to create a basis for landslide hazard assessment and to further the science regarding the predisposing and controlling factors. Bhutan was chosen for this study given its relatively poor regional knowledge of unstable slopes, despite its proneness. The main purpose of our work is to understand the spatial distribution of past large rock slope movements in the region, to quantify the recent rates of displacements and to investigate the structural and geological controls. Given the inaccessibility of the region and the large scale of the study, we used remote sensing techniques through all stages of our investigations. In particular, a combination of optical images and high-resolution digital surface model analysis and synthetic aperture radar differential interferometric (DInSAR) techniques was used. The use of DInSAR allowed also to image, quantify and discern slope displacements that are related to soil slide/creep or rock glaciers creep, moreover, it allowed to illuminate areas with reversible displacements related either to freeze-thaw cycles in the permafrost region, or to groundwater table seasonal fluctuations at lower elevations. We produced some new datasets for the region including: 1) a regional rock slope instabilities inventory based on optical images, 2) a rock glaciers inventory based on optical images, 3) an active slope instabilities inventory based on the analysis of individual interferograms, 4) an inventory of active slope instabilities based on multi-temporal DInSAR analyses which includes gravitational and reversible deformation, 5) a regional structural inventory largely based on remote sensing mapping with the inclusion of some in-situ measurements.

We present the analysis of individual interferograms aimed at the identification of actively unstable slopes. We perform a geomorphological classification based on the landslide types and we propose a new method to assess the activity likelihood uniquely based on remote sensing techniques. This methodology is based on an articulated decision tree, which takes into account the number of sensors used for the analysis, the number of interferograms in which displacements are identified, the satellite orbit geometry, vegetation cover, geometrical distortions, estimated velocity and temporal coverage of the data. This method allows lowering or maintaining the confidence regarding the activity of each identified slope instability by analysing what would be the detection expectation. It maximises the

level of information retrievable from standard interferometric analyses and is new and applicable to other mountainous regions.

We use multi-temporal analyses based on SAR data to show the potential of the technique in identifying specific instabilities of which no previous knowledge existed. Here we show a methodology to combine a model-based atmospheric correction and an empirical correction to remove stratified, long wavelength signals from the cumulative displacement maps, without an atmospheric correction on the interferograms used to generate them. This method takes advantage of the local nature of slope processes leading to surface displacements to separate them from the long-wavelengths signals related to artifacts. This method allows to identify small-scale reversible displacements related with freeze-thaw cycles in the permafrost region and, moreover, it provides insights into the possibility of observing the dynamics of natural annual ground water table variations on valley flanks, which, had not yet been explored with multi-temporal satellite based InSAR analyses.

We show the analysis performed with the combination of our structural dataset and landslides dataset aimed at investigating predisposing factors to large rock slope instabilities in the region. The methodologies developed here involve the generation of a compound structural dataset that makes use of different sources of information. The latter include remotely mapped fault traces and planar valley flanks, but also some field measurements of foliation and faults. The methodology used to compile this dataset addresses the biases deriving from uneven sampling of the different data types across the area and allows to make the dataset more balanced for systematic kinematic analyses. We apply kinematic analyses across the structural domains identified in the study region in a probabilistic way, in order to investigate the regional structural control on large rock slope instabilities formation. These methodologies are also new, and applicable to other mountainous regions where remote sensing analyses are the main source of information.

We identify a structural and lithological control on rock slope instabilities across large parts of the study region. A higher predisposition to failure seems to be associated with the presence of specific sets of regional faults and foliation structures. The average orientation of one of such fault sets corresponds to the orientation of the Lingshi fault, a major known structure in the northwest of the region. Moreover, there seems to be a lithological control both on past rock slide activity and on more recent activity in association with shales, quartzite and limestone belonging to the Tethyan sediments and found in the northwest of the region.

The analysis by means of DInSAR of rock slope activity in the recent past (our observation window is between 2006 and 2011) shows that the majority of active rock slope instabilities identified have rates which correspond to the slow to very slow categories, with maximum displacement rates of up to 160 mm/year, with only very few exceptions.

These findings, combined with the field observations of a large number of past rock slide deposits, covered by thick soils, point to the fact that active unstable rock slopes are less abundant in the region in recent times than in the past. We postulate that this may be related to the lack in recent times of major earthquakes that could have previously caused widespread landslide activity at a given point in time. We have also observed that rock glaciers in northwestern Bhutan creep downslope with velocities that are on the whole lower than what has been observed in the Alps in recent years. This could be due to either a less pronounced recent warming trend than at higher latitudes or to less water being available to penetrate into the frozen unconsolidated material supersaturated with interstitial ice and to deeper subsurface shear horizons.

Riassunto

Le instabilità di versante sono fonte di pericolosità causando danni diretti e indiretti nelle zone di montagna. Alcuni tipi di frane possono evolvere in maniera catastrofica, causando la perdita di vite umane e animali, danni alle proprietà private e a infrastrutture critiche. Inoltre, possono causare effetti indiretti quali la distruzione di terreni agricoli o la chiusura di una valle e conseguenti alluvioni con impatti molto più a valle. Una visione d'insieme di fenomeni di instabilità in zone montagnose è quindi fondamentale per capirne la distribuzione spaziale, per investigarne l'attività, per creare una base per la valutazione di pericolosità e per avanzare le conoscenze scientifiche per quanto riguarda i fattori di controllo e predisposizione. Il Bhutan è stato scelto come area di studio per questa tesi a causa della scarsa conoscenza regionale sui fenomeni franosi e di versante, nonostante l'elevata propensione. Lo scopo principale di questo lavoro è quello di comprendere la distribuzione spaziale di grandi frane in pendii rocciosi, di quantificarne i tassi di movimento recenti e di investigare i controlli sulla distribuzione imposti da fattori strutturali e geologici. L'inaccessibilità e la vastità della regione hanno determinato la scelta di utilizzare tecniche satellitari per le varie fasi dell'investigazione. In particolare, è stata utilizzata una combinazione dell'analisi di immagini ottiche e modelli digitali del terreno ad alta risoluzione e di tecniche di interferometria radar (DInSAR, Synthetic Aperture Radar Differential Interferometry). L'utilizzo della tecnica DInSAR ha permesso di identificare, quantificare e discernere movimenti di versante causati da scivolamenti in suolo o di ghiacciai rocciosi (rock glaciers), ha permesso di identificare movimenti reversibili associati o a cicli di gelo e disgelo nelle zone di permafrost o a variazioni della falda idrica di sotto della linea di permafrost. Sono stati prodotti nuovi dataset per l'area di studio, tra cui: 1) un inventario regionale di fenomeni di instabilità in pendii in roccia basato su immagini ottiche, 2) un inventario di ghiacciai rocciosi basato su immagini ottiche, 3) un inventario di instabilità di versante attive basato sull'analisi di interferogrammi singoli, 4) un

inventario di instabilità di versante attivo basato su un'analisi di interferometria radar multi-temporale che include fenomeni di versante gravitazionali e reversibili, 5) un inventario regionale delle strutture, basato quasi interamente su una mappatura da satellite con l'inclusione di alcuni dati di terreno. In questo lavoro presentiamo un'analisi di interferogrammi singoli con lo scopo di identificare fenomeni attivi. Viene fatta una classificazione geomorfologica basata sulle tipologie di frane e viene proposta una nuova metodologia per valutare la probabilità di attività basata unicamente su analisi satellitari. Questa metodologia sfrutta un albero decisionale che tiene in conto del numero di sensori utilizzati, del numero di interferogrammi in cui viene identificato uno spostamento, della geometria dell'orbita satellitare, della vegetazione, delle distorsioni geometriche, della stima di velocità e della copertura temporale dei dati. Questo metodo consente di alzare o abbassare il livello di confidenza a riguardo dell'attività di ogni instabilità identificata analizzando l'aspettativa di identificazione. Questa metodologia massimizza il livello di informazione che può essere ottenuto da analisi interferometriche standard, è nuova e può essere applicata a altre regioni montuose. Utilizziamo anche analisi interferometriche multi-temporali per mostrare il potenziale della tecnica nell'identificazione di instabilità precedentemente sconosciute. Mostriamo una nuova metodologia per combinare una correzione atmosferica basata su modelli atmosferici e una correzione empirica al fine di rimuovere gli effetti dell'atmosfera stratificata e segnali a grande lunghezza d'onda senza precedentemente correggere gli interferogrammi utilizzati per l'analisi. Questo metodo utilizza la natura localizzata dei processi di versante che causano movimenti superficiali e li separa dai segnali a grande lunghezza d'onda (quali gli effetti atmosferici, o artefatti di processamento). Questo metodo quindi consente di identificare fenomeni alla scala del versante che causano spostamenti reversibili associati a cicli di gelo e disgelo, inoltre, offre una nuova prospettiva per l'identificazione dei cicli annuali associati a variazioni della falda idrica finora non osservati con l'interferometria radar. Mostriamo l'analisi basata sulla combinazione dei dati strutturali con i dati delle instabilità, al fine di investigare i fattori di predisposizione per grandi frane in versanti in roccia. Le metodologie qui sviluppate includono la generazione di un complesso inventario strutturale che utilizza sorgenti di informazione diverse. Queste ultime includono tracce di faglia mappate con tecniche satellitari, versanti rettilinei, ma anche misure sul terreno di foliazione e faglie. Il metodo di compilazione di quest'ultimo dataset cerca di affrontare il problema generato da bias che derivano da un campionamento disomogeneo dei vari tipi di dato. In questo modo, il dataset ottenuto è adeguato all'utilizzo nelle analisi cinematiche. Le analisi cinematiche vengono svolte per tutta l'area, suddivisa in settori strutturali, in modo probabilistico, per investigare il controllo strutturale a scala regionale sulla distribuzione di frane in roccia. Anche le metodologie relative a questa fase del lavoro sono nuove e applicabili ad altre zone montuose dove informazioni satellitari sono la principale fonte di informazione. Viene identificato un controllo

strutturale e litologico sulla distribuzione delle grandi frane in roccia identificate per la gran parte dell'area. Un'altra predisposizione al franamento sembra essere associata con la presenza di specifici sets di strutture (faglie o foliazione). L'orientazione media di uno di questi sets corrisponde all'orientazione della Linghi Fault, una grande struttura nel nordovest della regione. Inoltre, viene rilevato un controllo litologico su fenomeni passati e fenomeni recentemente attivi, questi spesso associati a argilliti, quarziti e calcari appartenenti ai sedimenti della Tetide, affioranti per lo più nel nordovest della regione. L'analisi multi-temporale fatta con l'interferometria radar (periodo d'osservazione 2006-2011) mostra che la maggior parte di instabilità attive in pendii rocciosi hanno velocità di spostamento che corrispondono alle categorie di frane lente o molto lente, con velocità massime di 160 mm/year, con rare eccezioni. Questi risultati, in combinazione con l'osservazione di un grande numero di antichi depositi di frana ricoperti da cospicui strati di suolo, indicano nella regione un minor livello di attività recente rispetto al passato. Ipotizziamo che questo possa essere relazionato con la mancanza in tempi recenti di terremoti ad alta magnitudo che possono invece aver causato un'estesa attività franosa in passato. Osserviamo anche che i ghiacciai rocciosi nel nordovest del Bhutan si muovono con velocità che sono in generale meno elevate di quelle identificate per i ghiacciai rocciosi alpini. Questo potrebbe essere collegato a un riscaldamento meno pronunciato rispetto a latitudini più alte oppure dalla minore disponibilità di acqua che possa infiltrare nel materiale inconsolidato sovrassaturato con ghiaccio interstiziale e negli strati più profondi dove avviene lo scorrimento.