

MONITORING STRATEGIES AND WARNING MODELS FOR WEATHER-INDUCED LANDSLIDES

ABSTRACT

Weather-induced landslides cause a large number of casualties as well as severe economic losses worldwide every year. Such a diffuse risk cannot be mitigated only by means of structural works, typically characterized by significant economic and environmental impacts. Therefore, landslide early warning systems (LEWS) are being increasingly applied as non-structural mitigation measures aiming at reducing the loss-of-life probability and other adverse consequences from landslide events by prompting people to act appropriately and in sufficient time to reduce the possibility of harm or loss. The systems can be distinguished, as a function of the scale of design and operation, in two different categories. Territorial systems (Te-LEWS), deal with multiple landslides over wide areas at regional scale, i.e. typically a basin, a municipality or a region; local systems (Lo-LEWS) address single landslides at slope scale.

In a preliminary phase of this study, a detailed review of Lo-LEWS operational worldwide is provided. The information has been retrieved from peer-reviewed articles published in scientific journals and proceedings of technical conferences, books, reports, and institutional web pages. The main characteristics of these systems have been summarized and described according to a scheme based on a clear distinction between three modules: landslide model, warning model and warning system. The monitoring strategies implemented therein have been presented and discussed, focusing on the monitored parameters and the monitoring instruments for each type of landslide. Subsequently, warning models developed within Te-LEWS for weather-induced landslides have been analyzed, pointing out that: their outputs are strongly dependent from the accurateness and reliability of the information on landslide

occurrences; and only meteorological variables are considered in most of the cases, thus leading to an unavoidable uncertainty in the empirically defined thresholds. To overcome these issues, original procedures for defining warning models are herein proposed and tested on case studies in Campania and Emilia-Romagna regions (Italy) and in Norway. In Italy, a probabilistic approach has been developed to determine landslide conditional probabilities related to rainfall of specific intensity and duration. The adopted Bayesian methodology allows to consider the uncertainty of the data and to provide a quantitative assessment of the reliability of the results. Data on landslide occurrences have been derived from a new landslide inventory, named “FraneItalia”, wherein data are retrieved from online journalistic news; the correlations between landslides and rainfall have been assessed by analyzing satellite-rainfall records within weather alert zones. On the other hand, the methodology proposed for Norway aims at integrating the hydro-meteorological variables employed within the regional model used by the national early warning system (i.e. combinations of relative water supply and relative soil water saturation degree) with monitoring data collected at local scale, specifically pore water pressure observations acquired by the Norwegian Geotechnical Institute for a variety of projects. The analyses are carried out on a number of hydrological basins (test areas) defined at national scale and selected considering the occurrence of landslides in loose soils from 2013 to 2017 and the availability of a significant number of pore water pressure measurements. For each basin, the alerts issued by the regional model are assessed by means of a 2-step analysis employing indicators derived from simple moving averages of the pore water pressure measurements.

The warning models developed herein were successfully applied to selected case studies. Therefore, the proposed methodologies can be considered valuable frameworks considering aspects that are crucial for improving the efficiency of the models, such as: the potential of non-conventional landslide inventories and remote sensing monitoring instruments to complement the traditional sources of data, the use of probabilistic techniques for defining more objective rainfall thresholds, and the additional contribution of the information derived from the local observations of pore water pressures.

SOMMARIO

Le frane meteo-indotte causano un numero elevato di vittime oltre a ingenti perdite economiche in tutto il mondo ogni anno. Un rischio tanto diffuso non può essere mitigato solamente attraverso opere strutturali, tipicamente contraddistinte da considerevoli impatti economici e ambientali. Di conseguenza, i sistemi di allerta da frana (LEWS) vengono sempre più applicati come misure di mitigazione di tipo non strutturale con lo scopo di ridurre la probabilità di perdita della vita e altre conseguenze avverse derivanti da eventi franosi inducendo le persone ad agire responsabilmente e in tempo utile per ridurre la possibilità di danno o perdita. Tali sistemi possono essere classificati in due differenti categorie, in funzione della scala a cui vengono progettati e applicati. I sistemi territoriali (Te-LEWS), si occupano di numerose frane su vaste aree a scala regionale, tipicamente un bacino idrografico, un comune o una regione; i sistemi locali (Lo-LEWS) operano su singole frane alla scala di pendio.

In una fase preliminare di questo studio, è presentata una rassegna dettagliata dei sistemi di allerta locali operanti in tutto il mondo. Le informazioni sono state ricavate sia da articoli specializzati pubblicati in riviste, sia da atti di conferenze tecniche, libri, report e pagine web istituzionali. Le principali caratteristiche di questi sistemi sono state sintetizzate e descritte secondo uno schema basato su una chiara distinzione tra tre moduli: modello di franosità, modello di allerta e sistema di allerta. Le strategie di monitoraggio ivi implementate sono state presentate e discusse, concentrandosi particolarmente sui parametri monitorati e sugli strumenti di monitoraggio adottati per ciascun tipo di frana. Successivamente, sono stati analizzati i modelli di allerta sviluppati all'interno dei sistemi di allerta territoriali, rilevando che i loro rendimenti dipendono fortemente dall'accuratezza e dall'affidabilità delle informazioni sull'occorrenza delle frane e nella maggior parte dei casi sono considerate soltanto variabili meteorologiche, portando dunque a un'ineluttabile incertezza nelle soglie definite in via empirica. Al fine di risolvere queste problematiche, delle procedure originali per definire dei modelli di allerta sono proposte in questo lavoro e testate in casi di studio in Emilia-Romagna e Campania (Italia) e in Norvegia. In Italia, un

approccio probabilistico è stato sviluppato per determinare le probabilità condizionate relative a frane di specifica durata e intensità. La metodologia bayesiana adottata permette di considerare l'incertezza dei dati e di garantire una stima quantitativa dell'affidabilità dei risultati. Le informazioni sull'occorrenza delle frane sono state derivate da un nuovo inventario di frane, chiamato "FraneItalia", i cui dati sono ricavati da articoli di stampa online; le correlazioni tra frane e piogge sono state valutate analizzando dati satellitari di pioggia all'interno di zone di allerta meteo. Invece, la metodologia proposta per la Norvegia mira ad integrare le variabili meteorologiche impiegate nel modello regionale utilizzato dal sistema nazionale di allerta (combinazioni di apporto idrico e grado di saturazione del suolo relativi) con dati di monitoraggio raccolti a scala locale, nello specifico misure di pressioni interstiziali acquisite dal Norwegian Geotechnical Institute per diversi progetti. Le analisi sono eseguite su una serie di bacini idrografici (aree di studio) definiti a scala nazionale e selezionati considerando l'occorrenza di frane in sedimenti sciolti dal 2013 al 2107 e la disponibilità di un numero significativo di misure di pressioni interstiziali. Per ogni bacino le allerte emanate dal modello regionale sono valutate attraverso un'analisi in due passi che impiega indicatori derivati da medie mobili semplici delle misure di pressioni interstiziali.

I modelli di allerta sviluppati in questo studio sono stati applicati con successo ai casi di studio selezionati. Di conseguenza, le metodologie proposte possono essere considerate degli utili schemi che tengono conto di aspetti cruciali per migliorare l'efficienza dei modelli di allerta, fra cui: il potenziale di inventari di frana non convenzionali e strumenti in telerilevamento nell'integrare le tradizionali fonti di dati, l'utilizzo di tecniche probabilistiche per definire soglie pluviometriche più obiettive e il contributo addizionale delle informazioni derivate da osservazioni locali di pressioni.