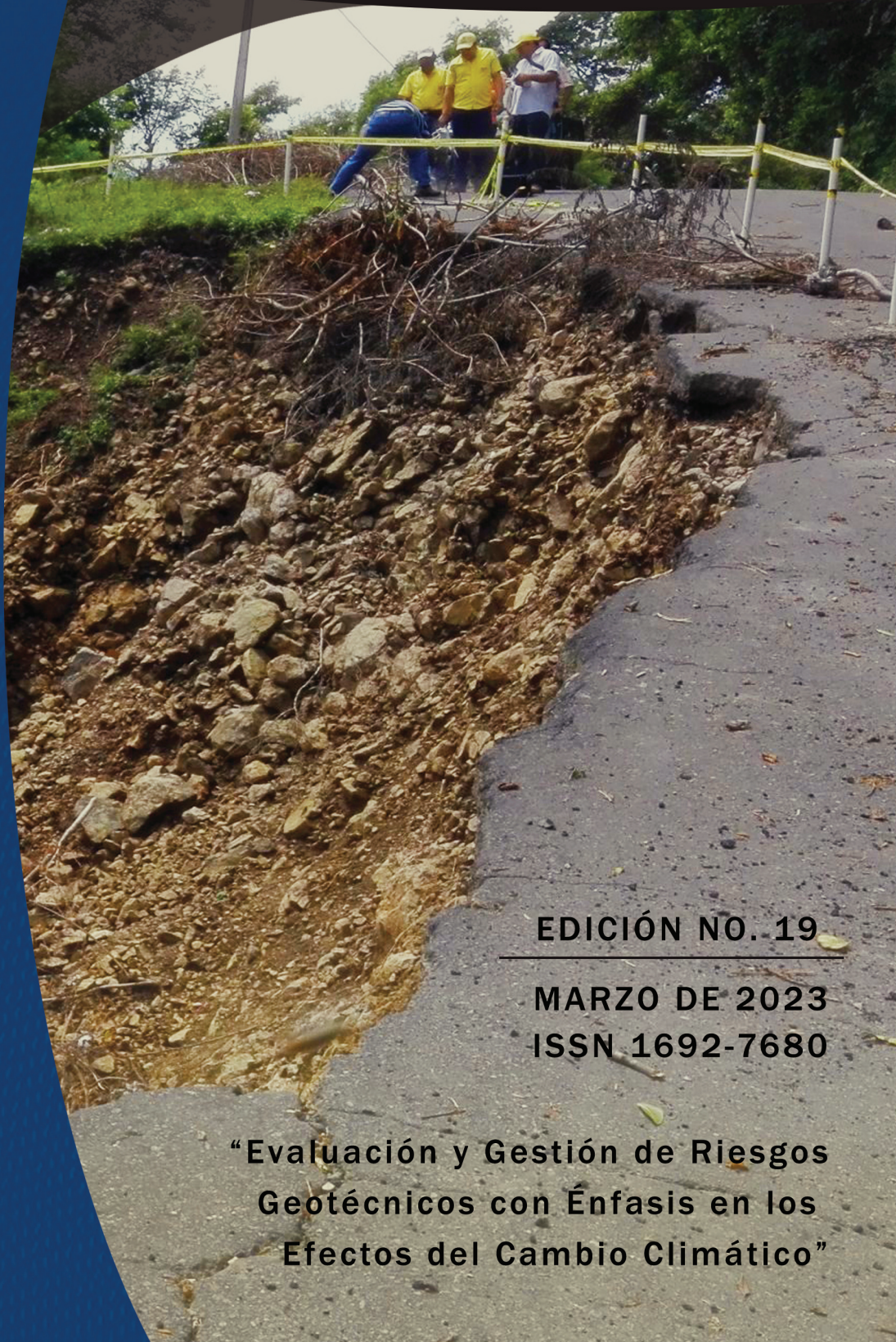


BOLETÍN COLOMBIANO DE
GEOTECNIA

ÓRGANO DE DIVULGACIÓN DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA



51
años
1971-2022



EDICIÓN NO. 19

MARZO DE 2023

ISSN 1692-7680

**“Evaluación y Gestión de Riesgos
Geotécnicos con Énfasis en los
Efectos del Cambio Climático”**

Editor: Dr.-Ing. Mario Camilo Torres Suárez - Presidente SCG, por delegación de la JD-SCG

Foto Portada: https://dacger.mop.gob.sv/wp-content/uploads/2022/02/IMG_20160927_103416-scaled.jpg



BCG

BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA

Sociedad Colombiana de Geotecnia

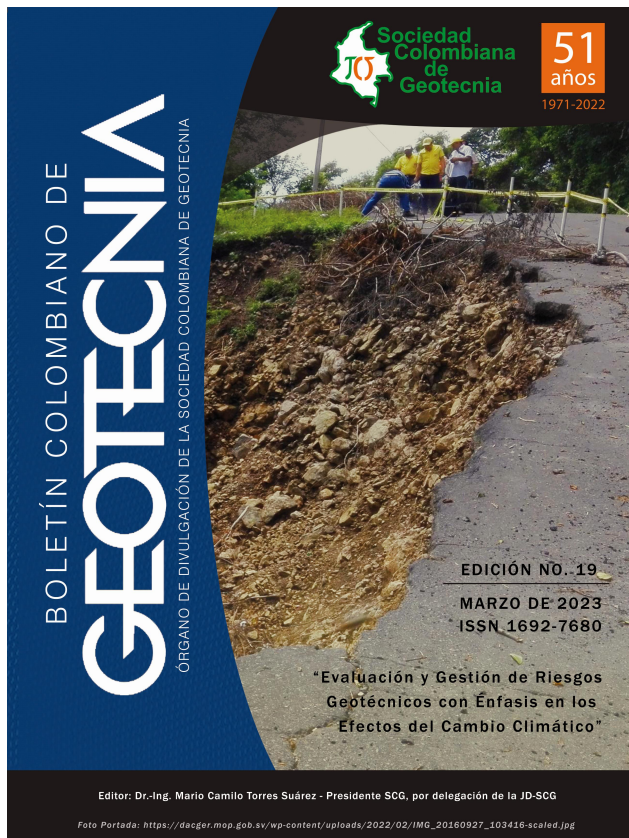
“Evaluación y Gestión de Riesgos Geotécnicos con Énfasis en los Efectos del Cambio Climático”

Edición 19 | Marzo de 2023

ISSN 1692-7680
<http://www.scg.org.co/>

Comité Editorial: Mario Camilo TORRES SUÁREZ, Luis Felipe PRADA SARMIENTO, Guillermo PABÓN GUTIÉRREZ

2023



Nuestra portada: XVII Congreso Colombiano de Geotecnia, Cartagena, Colombia. 2022

JUNTA DIRECTIVA 2022-2024

Mario Camilo Torres Suárez	-	Presidente
Guillermo Gutiérrez	-	Vice-Presidente
Mónica Bedoya Martínez	-	Vocal Secretaria
Ana María Gómez	-	Vocal
Hugo Coral Moncayo	-	Vocal
Luis Felipe Prada Sarmiento	-	Vocal
Omar Leonardo Torres P.	-	Vocal
José Vicente Amortegui Gil	-	Procurador
Carlos Eduardo Motta Tierradentro	-	Procurador Suplente
Carlos H. Cantillo	-	Director del ICEIG
Luz Ángela Vásquez	-	Secretaria administrativa

COMITÉ TÉCNICO PERMANENTE

- Álvaro Jaime González García † , IC, MSc, DIC
- Juan Montero Olarte † , Geólogo, MSc Geotecnia
- Mario Camilo Torres Suárez, IC, MSc, Dr.-Ing.
- Luis Felipe Prada Sarmiento, IC, MSc, Dr.-Ing.
- Guillermo Pabón Gutiérrez, IC, MSc, PhD.
- Silvana Montoya Noguera, IC, MSc, PhD.
- Ana María Parra Bastidas, IC, MSc, PhD.
- Mauricio Tapias, IC, MSc, PhD.
- Carlos Hector Cantillo, IC, MSc.

COMITÉ EDITORIAL

- Mario Camilo Torres Suárez – Editor
- Luis Felipe Prada Sarmiento – Co-Editor
- Guillermo Pabón Gutiérrez

EDICIÓN Y DIAGRAMACIÓN

- Mario Camilo Torres Suárez
- Luis Felipe Prada Sarmiento

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN PORTADA

Juan Pablo Montero & Mario Camilo Torres Suárez

PUBLICACIÓN

Edición en línea (www.scg.org.co)

“Evaluación y Gestión de Riesgos Geotécnicos con Énfasis en los Efectos del Cambio Climático” - Edición BCG No. 19



TABLA DE CONTENIDO

1	Editorial	1
2	Artículos I Seminario Suramericano de Geotecnia	3
	J. Corominas. The challenge of managing landslide risk in the face of climate change	4
	K. Ho, C. Cheung. Holistic Management of Landslide Risk: systems framework and public safety policies	24
3	Resúmenes seleccionados del XVII Congreso Colombiano de Geotecnia	50
3.1	Geotecnia Ambiental	50
	Barriga et al. Simulación de los efectos de condiciones extraordinarias por el fenómeno de El Niño en la sedimentación y consolidación de relaves mineros de baja densidad	51
	Sfriso et al. Análisis de vulnerabilidad a la licuación estática de presas de relaves	53
3.2	Amenazas y Riesgos geotécnicos: evaluación, análisis y mitigación . .	55
	Ruiz et al. Evaluación de Riesgo Físico por Movimientos en Masa en el casco urbano del Municipio de Villarrica-Tolima, a escala 1:2.000	56
	Montoya-Araque et al. Desarrollo computacional para la evaluación espacial de desplazamientos permanentes debidos a eventos sísmicos	58
	Bustos et al. Análisis, verificación y ajuste de umbrales de peligro Geotécnico a partir del monitoreo con radares IBIS en el Cerrejón	60
	Jaramillo-González et al. Rainfall Thresholds for Shallow Landslides using Distribute Physically-Based Model: TRIGRS in some Colombian Andes Catchments	62
	Ruiz et al. Estudios para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial	64
	Ortiz et al. Evaluación de la influencia de la morfometría en la distancia de viaje de movimientos en masa en la región andina nororiental de Colombia	66
	García-Melo et al. Aplicación del enfoque sistémico en la selección de obras de mitigación ante flujo de detritos	68
	Arcila et al. Efectos de sitio en estudios de riesgo sísmico en Colombia	70
	Mateus et al. Propuesta metodológica para la estimación de la amplificación sísmica debida a la topografía	72
	Mateus-Tarazona et al. Deslizamientos submarinos en el Caribe colombiano	74
3.3	Aplicaciones geológicas y geotécnicas de ingeniería: casos de estudio, obras, instrumentación, monitoreo y análisis	76
	Vásquez. Diseño incremental de pavimentos asfálticos mediante herramientas de código abierto	77
	Sanín et al. Análisis de las deformaciones de las lutitas negras en el túnel Guillermo Gaviria Echeverri	79
	Alvarado et al. Sistema de contención y secuencia constructiva para la excavación de 3 niveles de sótanos del edificio calle 125 de la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá	81
	Prada-Sarmiento. Influencia del tamaño de bloques en la capacidad portante de cimientos superficiales apoyados en bimsoils	83
	Restrepo et al. Aplicaciones de monitoreo remoto para deslizamientos en proyectos de infraestructura en Colombia	85
3.4	Comportamiento de suelos y rocas	87
	Rodríguez et al. Interpretación de ensayo de corte directo consolidado drenado	88

	Polanía et al. Colapso de columna granular: influencia de la polidispersidad en la movilidad y velocidad	90
	Jiménez et al. Formación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento de suelos finos ante la presencia de un montículo en la roca basal en experimentación con maquina centrifuga	92
	Utrera et al. Evaluación de tiempos de equilibrado de la succión total en muestras compactadas de materiales granulares de subbase a partir de simulaciones numéricas	94
	Ruiz et al. Influencia de la distribución de carbonatos en el comportamiento mecánico de una arcilla cementada – Estudio experimental	96
	Cifuentes et al. Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa utilizando el método de elementos Discretos	98
	Castillo et al. Interacción entre el sismómetro SEIS de la misión InSight y un análogo de regolito marciano	100
	Montoya-Noguera et al. Comportamiento de acantilados blandos tropicales ante sollicitaciones cíclicas de las olas	102
3.5	Confiabilidad en geotecnia	104
	Viviescas et al. Entendiendo la variabilidad de las propiedades geotécnicas a través de los procesos de formación geológica y sus implicaciones en los diseños probabilísticos	105
	Acosta et al. Un caso de análisis de confiabilidad en pilotes en suelos blandos	107
3.6	Exploración directa e indirecta del subsuelo	109
	Suárez Díaz. Efectos geotécnicos y caracterización mediante geofísica de las fallas geológicas jóvenes o secundarias	110
	Rodríguez et al. Desarrollo de un sistema de calibración para la medición de pérdidas de energía en el ensayo de penetración estándar bajo las condiciones de aplicación en Colombia	114
3.7	Geosintéticos	115
	Espinosa et al. Aspectos y Detalles Fundamentales sobre el Diseño y Construcción de Muros de Contención en Suelo Reforzado	116
3.8	Normatividad	119
	Mattos et al. Caracterización de enfoques de estado límite para diseño de muros embebidos	120
	Moreno et al. Implicación de la Normativa Colombiana para Diseño de Relaves Mineros - Comparativa con principales Normativas Latinoamericanas	122
	Niño et al. Estimación de Desplazamientos Admisibles para Determinar el Coeficiente k , en Análisis Pseudoestático de Estabilidad de Taludes	124
4	Eventos Sociedad Colombiana de Geotecnia 2022 - 2023	126
5	Instrucciones para los autores del BCG - SCG	128

Evaluación y Gestión de Riesgos Geotécnicos con Énfasis en los Efectos del Cambio Climático

Hoy, como sucede en muchos momentos de la vida, y en la Sociedad Colombiana de Geotecnia – SCG, no es tan distinto a como nos pasa en nuestras propias vidas, tenemos sentimientos encontrados. De una parte, la desaparición inesperada de nuestros mentores y faros en el ejercicio de la especialidad de la Geotecnia, me atrevería a decir, sin ser injusto, de todo el país geológico – geotécnico, los ilustres Álvaro Jaime González García y Juan María Montero Olarte, quienes marcharon seguramente a mejores estados, con escasos cuatro meses de diferencia, como si se hubieran puesto de acuerdo, aunque en muchas ocasiones no se ponían de acuerdo. Su partida, aunque previsible porque todos los mortales algún día marcharemos, fue sorpresiva y dejó una estela de impotencia, acompañada por supuesto de una profunda tristeza, ya que se habían convertido para muchos de nosotros, no solamente en profesores de los más idóneos y sensibles, sino en familiares, aquel padre que nos abandonó antes o simplemente el referente académico y profesional que siempre se tiene como ideal.

Desde esta líneas, Paz en su tumba, abrazo solidario para con sus familiares y amigos, que los extrañan cada vez más y un mensaje de aliento y optimismo para que sigamos adelante, luchando por perseverar en ese legado que nos dejaron, al menos en la SCG; por ello, cuando asumimos nuevamente el reto de dirigir esta comunidad de colegas y amigos geotecnistas, siempre su fuerza y dedicación nos inspira y fortalece en ese propósito. Es por ello que logramos, casi contra viento y marea, con el Comité Organizador y el acompañamiento y gestión de los miembros de la Junta Directiva, anterior y actual, organizar y desarrollar con gran éxito los eventos centrales de la SCG: I Seminario Suramericano de Geotecnia – XVII Congreso Colombiano de Geotecnia, llevados a cabo del 14 al 18 de noviembre de 2022, en la hermosa y acogedora ciudad de Cartagena, Colombia, con sede en el Hotel Las Américas.

Fue una semana llena de gratos encuentros y excelentes presentaciones, particularmente con la presencia de jóvenes geotecnistas, que vienen empujando los avances y logros de las generaciones mayores, incluyendo nuestro ilustres Ex-presidentes de la SCG y Profesores de quienes todos hemos recibido esos conocimientos que han fundamentado todo el desarrollo de la Geotecnia y la Geología para Ingeniería en Colombia. Los eventos contaron con sendos cursos previos, uno relacionado con modelamiento numérico ofrecido por la casa de software geotécnico Rocscience® y el otro con metodologías de análisis y diseño en geosintéticos dictado por la IGS Internacional, con quienes además celebramos convenio de representación en Colombia a modo de Grupo Nacional, a través de la recién creada Comisión Técnica Permanente de Geosintéticos y Mejoramiento de Geomateriales.

La temática central de los eventos realmente no es más que la excusa para haber concertado y congregado toda una serie de intereses, con diversas motivaciones, que permitieron una excelente organización tanto del componente académico como del asociativo. El encontrar a los amigos, colegas y conocidos, con quienes no nos veíamos físicamente desde hace casi tres años, fue muy significativo y conmovedor para muchos. Los casi 250 asistentes con los que contó el evento, pudieron disfrutar de las diferentes temáticas, presentaciones y eventos que se organizaron y llevaron a cabo con excelencia, gracias desde aquí a todos quienes asistieron y participaron de alguna manera para este logro. El reto que nos queda es grande y esperamos que el próximo evento resulte igual o mejor, gracias a los Profesores, Estudiantes, Firms Patrocinadoras, Logística, Hotel Las Américas y a todo el Comité Organizador.

Es motivo de orgullo también poder hacerles entrega del presente número de nuestro Órgano de Divulgación de la SCG, el **BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA – BCG**, el cual no se había vuelto a editar desde hace poco menos de 9 años, constituyéndose en una de las demandas mas sentidas de nuestros asociados y un llamado de atención permanente y amistoso de nuestro Procurador. El Boletín Número 19, por tanto, se constituye en un esfuerzo que hace esta administración, con el apoyo decidido y magnífico del Ing. Luis Felipe Prada Sarmiento, como también lo hizo al editar las memorias del Congreso de Cartagena; en esta ocasión se presenta en formato digital, con miras a aportar a la política de “cero papel” que ostenta la SCG.

Los invito a que asistan a nuestra Sede, renovada y puesta a punto para recibir a todos nuestros asociados, allí se pueden organizar las reuniones de las Comisiones Técnicas o encuentros ocasionales, disfrutando de sus instalaciones, que, aunque modestas son dignas para que todos nos sintamos cómodos. La **Biblioteca Geotécnica Colombiana – BGC**, está abierta y disponible para consulta, además de que recibió varios volúmenes de incunables de la Geotecnia, donados amablemente por los familiares de nuestros mentores fallecidos. Pronto esperamos disponer en la página web el listado de documentos disponibles, para consulta, descarga o para la venta.

Esperamos que el Boletín resulte de su interés y quedamos atentos a cualquier inquietud que los trabajos incluidos puedan suscitar.

Con consideraciones de aprecio y respeto,

EL EDITOR

Mario Camilo Torres Suárez

IC, MSc, Dr. en Ingeniería – Geotecnia

Presidente de la Sociedad Colombiana de Geotecnia

ARTÍCULOS I SEMINARIO SURAMERICANO DE GEOTECNIA

The challenge of managing landslide risk in the face of climate change

Jordi Corominas¹
emeritus professor

Department of Civil and Environmental Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya Institution,
Barcelona, Spain

ABSTRACT

In this paper is we briefly review the link between climate and landslides and how the latter might react to the projected changes of the former. We specifically comment on three factors that modify the equilibrium of slopes and existing landslides: (a) the increase in temperature, responsible for the melting of permafrost and the reduction of forest cover; (b) the increase of the areal extent and intensity of the rainfall events, which are typical triggers of shallow and mid-size landslides; (c) the continuous sea level rise along with the erosive action of the waves and sea storms that seriously threaten the stability of the coastal cliffs. Landslide risk management is challenged by the appearance of new landslide hotspots and also by the occurrence of unprecedented large magnitude landslide events. Consequently, hazard analyses must be revisited considering specifically how landslide frequency and magnitude is affected by the projected climate change. This work synthesizes various previous contributions made by the author.

INTRODUCTION

Climate change is undisputable. Most recent reports of the IPPCC panel [1] not only confirm the increase of temperature trend but also show that the pessimistic scenarios will be achieved sooner than previously estimated. During last decades, many efforts have been devoted to decipher the complex relationship between climate and the stability of the slopes and how this relation can be affected by the climate change [2-4]. The analysis of this relation has multiple implications [5]:

- (a) Search for rainfall thresholds which would enable the short-term prediction of slope failures and the implementation of warning systems
- (b) Quantification of the mid and long-term landslide activity. Determination of the frequency of the events, which is a fundamental parameter for the landslide hazard assessment
- (c) The response of the slopes and existing landslides to the current climate and climate fluctuations. The analysis of recent and past activity of landslides provides clues for understanding future scenarios.
- (d) Testing the suitability of using landslides as geoindicators of the changing climate conditions. New trends of the landslide activity may be interpreted as the result of changes in hydrological conditions of the slopes, which at their turn, are controlled by climate.

In this paper is we briefly focus on the following issues: (1) the linkage between climate and landslides; (2) how landslides may respond to the climate change; (3) how climate change may affect landslide

¹ Corresponding author: Jordi.corominas@upc.edu

hazard and risk. Understanding these relationships is fundamental in order to develop strategies to build resilient societies, particularly considering that we are still far from implementing policies and solutions for the successful management of the future landslide risk.

CLIMATE-RELATED LANDSLIDE TRIGGERS

A trigger is an external stimulus that causes a near-immediate response in the form of a landslide by rapidly increasing the stresses or by reducing the strength of the slope material [6]. Main landslide triggers are the intense rainfall, snow melting, earthquake shaking, volcanic eruption, wave undermining and rapid stream erosion. However, landslides also occur spontaneously without any apparent trigger. It is expected that shortly after the occurrence of the trigger the slope failure will take place and that a cause-effect relationship can be established. In this document we will only consider the role landslide triggers that might be modified by the climate change.

Landslides are generally triggered by either persistent processes or by extreme events (e.g. extreme rainfall), which are unusual, especially severe, or unseasonal. Climate researchers consider extreme weather events as rare within their statistical reference distribution at a particular place. Definitions of “rare” vary, but an extreme weather event would normally be as rare as or rarer than the 10th or 90th percentile [1]. Thus, a high magnitude extreme rainfall event may result in a high number or density of slope failures. However, the frequency distribution of landslides usually differs from that of the rainfall events. This is because different predisposing factors control the occurrence of landslides which can also be triggered by other climate-related processes such as snow melting, permafrost thawing, or other mechanisms such as earthquakes, river erosion, among others.

Rainfall-triggered landslides

Rainfall is the most frequent and widespread landslide trigger. Rainfall infiltrates into the slope increasing positive pore-water pressures within the material above the potential surface of rupture. The ratio between the amount of rain infiltrating into the terrain and that of the groundwater draining out of the slope controls the changes in pore-water pressures. Infiltrated water may raise up the pore-water pressures in the slope to a critical level at which the resistance of the soil is overcome and the failure takes place [7]. The critical rainfall necessary to cause the slope failure will thus vary from one slope to another and, therefore, the establishment of landslide-triggering rainfall thresholds for large areas is affected by some degree of uncertainty. The relation between rainfall and landslides has been largely analyzed by numerous researchers. Updated reviews may be found in [8-10].

Three landslide-triggering rainfall patterns have been identified [5]: (a) short duration high-intensity rainfall events; (b) rainfall episodes of moderate to low intensity lasting for several days or weeks; (c) abnormally either seasonal or interannual rainfall episodes.

Landslides triggered by extreme short-lasting rainfall events

Shallow slides and debris flow are typically triggered short duration high-intensity rainfall events. Failures often appear on steep slopes blanketed with colluvium or weathered bedrock in first-order watersheds. The term shallow slide refers to a slope failure up to few meters' depth, however, the latter may be significantly bigger if the soil layer or weathered rock is well developed as it occurs in tropical environments.

In slopes covered with pervious soils, the build-up and dissipation of positive pore pressures may be very rapid, with the whole cycle lasting less than 24 hours and little influence of the antecedent precipitation [11]. Argillaceous soils may display similar behavior when preferential groundwater passageways are present in the soil (e.g. animal burrows, soil pipes). However, even in pervious soils, the effect of the antecedent rain cannot be completely disregarded [12-13]. In low-permeability soils, antecedent rain is often found as a necessary condition for the slope failure. Its effect in reducing soil strength has been observed in clayey-rich materials such as glacial tills [14] and colluvium [15]. Therefore, with antecedent rainfall, slope failures may occur with rainstorm intensities lesser than those normally required [16-17]. In high mountains, snow melting may trigger of debris flows either alone or in combination with rainfall episodes.

Landslides triggered by long-lasting moderate to low intensity rainfall events

Long lasting low to moderate rainfall episodes may trigger or reactivate earthflows and both mid-size rotational and translational landslides in clayey materials. As fine-grained materials drain slowly, reactivation occurs usually as a response to the increase of pore water pressures caused by cumulative rainfall. The length of the period in which rain accumulates is variable and may last from few weeks to several months. It may be expected the influence of the cumulative rainfall increases with the size of the potential landslide.

The response of active landslides to rainfall deserves a further comment. Some mudslides and earthflows may keep in motion for months or years without a direct relationship with the rainfall. Mechanisms explaining such a behavior are the sudden loss of strength of the slide material as a result of the brittle behavior of the clay or the undrained increase of pore-water pressures [18-19]. Earthflows may remain active irrespective of the weather conditions although rainy events may accelerate the movements. The Slumgullion earthflow in the San Juan Mountains, Colorado, is an excellent example of this type of behavior. Its active part of 20 million cubic meters, has been moving continuously for the past 300 years. Some changes in the rate of displacement are noticed over the course of the year but the rate appears to be constant over long periods, thus illustrating its complex hydrological system. [20] consider that this landslide must contain various internal mechanisms that operate to regulate the rate of sliding. For example, groundwater pressure changes might be counterbalanced by the presence of springs or by water inflow through open cracks on the landslide. Springs will dissipate excess of pore water pressures while infiltration cause the opposite effect.

Rainfall thresholds for active landslides may be blurred by the presence of cracks and fast drainage-ways. In extensional zones of landslide stretching may take place resulting in the development of fissures. These cracks allow a rapid infiltration of the surface water into the landslide with the subsequent increase of water pressures. Because of this, active landslides often show immediate responses to rainfall [21-22].

Landslides triggered or reactivated by abnormally wet seasonal/annual rainy periods

Long seasonal or annual rainfall is found as one main influencing factor for generating large slope failures or reactivating large dormant landslides. However, conditions leading to the first-time failure of large landslides are diverse and sometimes unpredictable. Earthquakes, volcanic eruptions and over excavation of slopes are identified as the most frequent triggers. Large first-time slope failures in rock masses show complex hydrological and mechanical behavior, in which the geological structure and

geometrical evolution during the development of the instability process, strongly influence the behavior of the slope [23-26].

Instead, rainfall is the most frequent cause of both the reactivation of dormant landslides and the acceleration (surges) of the active ones [27-28]. However, the relationship is difficult to establish as wet episodes have occurred in the past without noticeable response of the landslide. Tentative to establish relationships between activity episodes and effective rainfall, river discharge and hydrological balance at a seasonal scale has sometimes been unsatisfying [29-30]. Besides the long-term response of some large landslides, there exist a number of cases in which reactivation takes place in association to short-lasting intense rains. In these cases, the response of the landslide cannot be properly understood without considering the special geological and hydrogeological settings that favor the rapid concentration of groundwater into the landslide body (e.g. presence of karstic systems, well developed network of fissures) [21,31]. Overlooking of these features may lead to a misconception of the role of climate in triggering landslides

Landslides related to temperature changes

Slopes are sensitive to the environmental changes. In high-latitude and alpine regions the occurrence of debris flow events is often related to the permafrost thawing combined with precipitation. Since the Little Ice Age, permafrost has progressively vanished in the highest mountain ranges, leaving uncovered poorly consolidated debris masses placed on steep slopes. Some debris flow events are originated on slopes of periglacial areas that were glacier-covered about 150 years ago [32]. The increase of debris flow activity due to permafrost melting is also observed in other alpine regions. Continued warming will enlarge the susceptible areas and amplify the activity of periglacial debris flows in the next decades and centuries [33].

Glaciers also recede as a consequence of the temperature increase. In this context, debris avalanches may result from the detachment of the glacier fronts and failure of morainic lakes, which incorporate large amounts of debris by erosion of old morainic deposits and colluvium that are found on the path. Several examples of glacier collapse have occurred due to warm weather conditions that followed the Little Ice Age in the alpine ranges [34]. Alternation of dry (drought) periods that facilitates physical weathering and erosion, which may facilitate the occurrence of extreme debris events [35-36].

Rockfalls are also reported during to rain storms. Although rainfall is responsible for rock fall activity, establishing a quantitative relationship is challenging [5]. Rock falls may also occur associated to snow melting, freeze-thaw cycles, rock weathering or root wedging. Infiltration from rain or from snow melting raise cleft water pressures in joints of rock masses promoting destabilization of blocks. Thermo-mechanical stresses due to temperature fluctuations [37], repeated freezing and thawing of water in joints [38-40] weaken rocks by creating and propagating fissures which eventually may destabilize rock blocks [41].

Erosional processes and slope stability

Despite being a less analyzed process, fluvial undercutting is one main cause of slope instability. River entrenchment and slope steepening are continuous processes in active mountain ranges. Erosion of the toe of dormant landslides is able to change the equilibrium conditions of the landslide mass, thus leading to instability. The erosion may take place in the form of both vertical and lateral undercutting, which

increases shear stresses on the surface of rupture. In terms of stability toe erosion can be as effective as the groundwater pore pressures increase [31].

Where mountain ranges meet the sea, the landscape is characterized by a rugged coast. Cliffs are continuously eroded by wave attack and sea storms [42-43]. Rockfall is the predominant mechanism of failure in sea cliffs but large landslides may also develop through weak lithological contacts, especially in layered sedimentary and volcanic formations. This context is well represented in volcanic islands, formed by the stacking of successive lava flows and pyroclastic products, arranged unfavorably on the slopes of the large volcanic edifices. The erosion and retreat of the volcanic materials generate imposing cliffs with frequent rockfalls. Volcanic islands have experienced giant pre-historic landslides and the most accepted hypotheses for failure suggest the destabilization of the accumulated volcanic material by dyke intrusions and the associated seismicity, and marine erosion [44-45]. The influence of climate and, indirectly, the drop of the sea level associated with glacial episodes cannot be ruled out [46-47].

Landslide triggered by other natural and human-induced processes

There is a general recognition that anthropic activities combined with climate disturb the slope equilibrium. Forest fires and logging practices (harvesting and deforestation) favor the landslide occurrence by affecting slope stability, particularly on steep slopes [48-49]. Changes in the vegetative cover on steep slopes have increased debris flow frequency [50]. The reason is that tree roots anchor the upper soil layers and weathered rock by tying them across planes of weakness, providing an overall reinforcement in shallow or deep layers [51-52]. When forest is cleared or the native vegetation has been replaced by new cultivated forest with a shallower root network, the soil cover mobilizes lesser strength [53].

Anthropic disturbances are also the cause of increasing the frequency of the slope failures. Housing development and transport network generate new cuts that facilitate not only shallow failures but also large landslides. Analyses carried out in northern Spain [54] have shown that the frequency of landslides and their mobilized volume increased almost one order of magnitude in less than 50 years, while total rainfall, number of storms and the annual number of rainy days show no significant changes. Furthermore, they found that up 30% of the landslides in the second half of the 20th century was related to the human activity. In a global analysis [55] also observed an increase of landslides triggered by human activity, in particular in relation to construction, illegal mining and hill cutting.

CLIMATE CHANGE: WHAT DO CLIMATE MODELS FORESEE

IPCC reports include several facts and projections in relation to the climate that have a direct influence on the landslide predisposing and triggering factors. This is a summary of the most relevant [1,56]:

Observations and facts

Global surface temperature has increased by 1.09 °C from 1850–1900 to 2011–2020. Paleoclimate evidence indicates that temperatures as high as during the most recent decade (2011–2020) exceed the warmest centennial-scale range reconstructed for the present interglacial, around 6500 years ago (0.2°C to 1°C). The next most recent warm period was about 125,000 years ago during the last interglacial when the multi-centennial temperature range (0.5°C to 1.5°C) encompasses the 2011–2020 values. Warming

of the emerged land is about 45% larger than for global surface temperature and about 80% larger than warming of the ocean surface.

It is now an established fact that human-induced greenhouse gas emissions have led to an increased frequency and/or intensity of some weather and climate extremes since 1850, in particular for temperature extremes, extreme precipitation, droughts, tropical cyclones and compound extremes. The frequency and intensity of hot extremes (warm days and nights) and the intensity and duration of heatwaves have increased globally and in most regions since 1950, while the frequency and intensity of cold extremes have decreased. The frequency and intensity of heavy precipitation events have increased over a majority of land regions.

The probability of compound flooding (storm surge, extreme rainfall and/or river flow) has increased in some locations and will continue to increase due to both sea level rise and increases in heavy precipitation, including changes in precipitation intensity associated with tropical cyclones.

Both palaeoclimate and modern observations suggest that the strongest El Niño and La Niña events since the pre-industrial have occurred during the last fifty years. There have been three occurrences of extreme El Niño events (1982–1983, 1997–1998, 2015–2016), all characterized by pronounced rainfall in the normally dry equatorial East Pacific. There have been two occurrences of extreme La Niña (1988–1989, 1998–1999). El Niño and La Niña variability during the last 50 years is unusually high compared with average variability during the last millennium.

Over recent decades, widespread loss of snow and ice has been observed, and several elements of the cryosphere are now in states unseen in centuries. Snow cover duration has declined in nearly all regions, especially at lower elevations, on average by 5 days per decade. Low elevation snow depth and extent have declined, although year-to-year variation is high. Measurements of selected locations in the Northern Hemisphere show an increase in permafrost temperature of $0.19^{\circ}\text{C} \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ on average during the past decade. Other observations reveal decreasing permafrost thickness and loss of ice in the ground. There have been reductions in Arctic sea ice since the late 1970s (with late-summer sea ice loss likely unprecedented for at least 1000 years) and the widespread retreat of glaciers (unprecedented in at least the last 2,000 years).

Glacier, snow and permafrost decline has altered the frequency, magnitude and location of related natural hazards. Exposure of people and infrastructure to natural hazards has increased due to growing population, tourism and socioeconomic development. Glacier retreat and permafrost thaw have decreased the stability of mountain slopes and increase the number and area of glacier lakes, which may result in landslides and floods, and cascading events. In some regions, snow avalanches involving wet snow have increased, and rain-on-snow floods have decreased at low elevations in spring and increased at high elevations in winter.

Global mean sea level (GMSL) increased by 0.20 m over the period 1901 to 2018 at an average rate of 1.7 mm yr^{-1} . The rate of rise that has accelerated since the 1960s to 3.7 mm yr^{-1} for the period 2006–2018. In the past, the GMSL was only considerably higher than today during the Last Interglacial (LIG; 129–116 ka), when global mean surface temperature was 0.5°C – 1.0°C warmer than pre-industrial, and the mid-Pliocene Warm Period (mPWP; ~3.3 to 3.0 million years ago), 2°C – 4°C warmer. Despite the modest global warmth of the Last Interglacial, GMSL was likely 6–9 m higher.

Extreme wave heights, which contribute to extreme sea level events, coastal erosion and flooding, have increased in the Southern and North Atlantic Oceans by around 1.0 cm yr^{-1} and 0.8 cm yr^{-1} over the period 1985–2018. Sea ice loss in the Arctic has also increased wave heights over the period 1992–2014.

Projections for 21st century

The average surface warming over land will continue to be higher than over the ocean. The warming pattern will vary seasonally, with northern high latitudes warming more during winter than summer. Compared to 1850–1900, average global surface temperature over the period 2081–2100 will be higher by 1.0°C to 1.8°C and by 3.3°C to 5.7°C in the low and high CO_2 emissions scenario, respectively. Projected Mediterranean summer temperature increase will be larger than the global mean. Warming drives an increase in atmospheric evaporative demand and in the severity of drought events.

Near-term projected changes in precipitation are uncertain mainly because of internal variability, uncertainty of the model and natural and anthropogenic forcings. By 2081–2100, global annual precipitation over land is expected to increase on average between 2.4% and 8.3% relative to 1995–2014, depending on the emission scenario considered. Patterns of precipitation change due to the temperature increase exhibit substantial regional differences and seasonal contrast. A warmer climate increases moisture transport into weather systems, leading to the intensification of heavy precipitation from sub-daily up to seasonal time scales, increasing the severity of flood hazards. Extreme precipitation will increase in many regions around the world on almost all continents.

Extreme El Niño and La Niña events are expected to increase in frequency and intensify existing hazards, with drier or wetter responses in several regions across the globe. Extreme El Niño events are projected to occur about as twice as often when compared to the 20th century. The global land monsoon precipitation will increase in all time horizons and scenarios. At global and regional scales, near-term monsoon changes will be dominated by the effects of internal variability. The average intensity of tropical cyclones, the proportion of Category 4 and 5 tropical cyclones and the associated average precipitation rates are projected to increase for a 2°C global temperature rise above any baseline period.

Further warming will lead to further reductions of Northern Hemisphere snow cover and near-surface permafrost volume. In permafrost regions, increases in ground temperatures in the upper 30 m over the past three to four decades have been widespread. For each additional 1°C of warming (up to 4°C above the 1850–1900 level), the global volume of perennially frozen ground to 3 m below the surface is projected to decrease by about 25% relative to the present volume.

GMSL will continue to rise over the 21st century in response to continued warming of the climate system and is projected to be faster under all scenarios. Relative to the period 1995–2014, GMSL will rise between 0.18 m and 0.23 m (by 2050, depending on the emission scenario. By 2100, the projected rise is between 0.38 m and 0.77 m. Higher amounts of GMSL rise before 2100 could be caused by earlier-than-projected disintegration of marine ice shelves, the abrupt, widespread onset of marine ice sheet instability and marine ice cliff instability around Antarctica, and faster-than-projected changes in the surface mass balance and dynamical ice loss from Greenland. Rising mean sea levels will contribute to higher extreme sea levels associated with tropical cyclones. Coastal hazards will be exacerbated by an increase in the average intensity, magnitude of storm surge and precipitation rates of tropical cyclones.

Due to projected GMSL rise, Extreme Sea Level (ESL) that are historically rare (for example, today's hundred-year event) will become common by 2100. In the absence of adaptation, more intense and frequent ESL events, together with trends in coastal development will increase expected annual flood damages by 2-3 orders of magnitude by 2100 (However, well designed coastal protection is very effective in reducing expected damages and cost efficient for urban and densely populated regions, but generally unaffordable for rural and poorer areas). Even with well-designed hard protection, the risk of possibly disastrous consequences in the event of failure of defences remains.

The changing climate state is already altering the likelihood of extreme events, such as decadal droughts and extreme sea levels, and will continue to do so under future warming. Compound events and concurrent extremes contribute to increasing probability of low-likelihood, high-impact outcomes and will become more frequent with increasing global warming. Higher warming levels increase the likelihood of events unprecedented in the observational record.

CLIMATE CHANGE AND LANDSLIDE OCCURRENCE

The response of the slopes to the climate variability has been studied using historical records of temperature, precipitation, and landslide events. The observed behavior has been taken into account in the future predictions from downscaled Global Circulation Models. These studies have found that the occurrence or activity of landslides is expected to increase in areas where the frequency and magnitude of precipitation is predicted to increase and decrease in areas where the frequency and magnitude of precipitation is predicted to decrease. However, interactions between ongoing climate shifts, anthropogenic activities and landslide behavior are difficult to assess due to uncertainties in both climate and landslide models.

Landslide response to the high-intensity rains

Simulations based on climate projections and slope stability models yield diverging results [57]. Some models confirm the increase of landslide events, particularly shallow slides and debris flows chiefly due to the increase of rainfall intensity [58]. It has also been observed the increase of both the frequency and magnitude of the events [59]. In contrast, a number of cases predict the reduction of landslide occurrence and decrease of rate of movement in the existing ones as the result of a greater evapotranspiration and lesser precipitation. Other models show that the increase of precipitation is counterbalanced by the increase of evapotranspiration [60]. Care is needed with the projections as the results depend largely on the climate models, the downscaling methods, and weather generators selected to obtain temperature and rainfall time series [57] and on the inherent limiting stability factors of the slopes which ultimately govern the response to the changing climate [61]. The lack of reliable relations between climate projections and slope stability at this time, poses some limit to the consideration of the climate change in the QRA.

The immediate consequence of greater number of intense rainfall episodes will be an increase in shallow slides and debris flow. In the medium-long term, however, the rate of appearance of failures may be restricted by the availability of movable material on the slope [62]. It may occur that, in a given region, too close high-intensity rainfall episodes produce unlike results. The reason for this is because shallow failures require both the presence of a trigger and the availability of movable material. A first storm may sweep away large amount of colluvium and weathered soils and, as these slopes have been emptied of movable material, the chances that a later storm could trigger further slope failures could be drastically reduced. The infill of the hollows with new material and weathering may require decades or even

hundreds of years in contexts such as the Mediterranean region. Only slopes with unlimited sediment supply (e.g. till deposits or thick layers of weathered rocks) would increase the frequency of shallow landslides. The increase may also be due to anthropic disturbances and to the lesser protection of slopes by vegetation (e.g. logging, forest fires, ...).

Despite all the uncertainties, the human activity itself is today the main geodynamic agent, which directly and indirectly introduces changes that destabilize the slopes. How landslide activity will evolve in the future will depend more on this than on the precipitation (changes on the susceptibility to failure from human activities are much bigger than the effect of changing the rainfall pattern) [55,63]. We entered a new geological era, the Anthropocene, which is characterized by the dominance of men in the processes of erosion and sedimentation.

Landslide stationarity

Landslide susceptibility and hazard analyses rely on the principle of uniformity that future landslides will likely occur in slopes having similar geo-environmental conditions than the slopes that experienced failures in the past. Based on this principle, the probability of occurrence may be calculated from a list of both historic and prehistoric landslide events. The practical implementation of this approach assumes stationarity of the landslide record (i.e. statistical properties such as the mean or variance are constant over time). In the current practice, the stationarity assumption is accepted to make the problem tractable mathematically [64] but in the scenario of the global change (both climate and human change) it should be reconsidered [65].

The assumption of stationarity is a serious limitation to the reliability of hazard analysis. As mentioned above, once a dense cluster of landslides removes a large proportion of soil cover from steep slopes of an area, another cluster may not be possible for a considerable period of time until the slopes are again refilled [5, 62, 66]. An illustrative example is found in the Campania Region, Italy. There, shallow failures entrain the pyroclastic mantle that overlies the bedrock, deposited by successive eruptions of the Vesuvius volcano. As the mantle is progressively reduced over time so does the frequency of the events, until it is refilled again with new eruptions [67].

Glacierized regions are highly sensitive to the increase of temperature and ice-cover shrinkage and permafrost degradation is a global process [33,68], with consequences on the geometry of the slopes, on physical properties of the newly exposed soils and rocks as well as on the hydrological conditions [69]. Outside the mountain ranges, coastal cliffs emerge as highly vulnerable locations in front of the widespread sea-level rise [70].

A list of both anthropogenic and climate-induced processes affecting the landslide occurrence is presented in Table 1. Several works [33,40,71-75], argue that the frequency and magnitude of debris flows, rockfalls and rock avalanches increases in high mountain regions. It is due to a combination of factors such as the raise of air temperature, permafrost thawing [40,76-77], and sediment availability [32]. However, the intensification of landslide activity cannot be generalized. One should expect that the response of the slopes to the climate forcing be geographically uneven, nonlinear, and with a variable time lag. The increase will probably be less evident in the slopes of valleys already deglaciated during Late Pleistocene and Early Holocene times [78] and in mid latitude regions. There, it has been observed that the high initial landslide activity has declined following an exhaustion model [79], particularly in locations where sediment has been progressively washed away [80-81]. As an example, the rockfall

	Parameter	Predisposing factors	Triggering factors
Increase landslide occurrence and/or magnitude	Hydrology	Wetter antecedent conditions in the slopes [61]	Increase of rainfall duration and/or intensity [58]
		Water impoundment: e.g. landslide dams [85]	Excess of pore water pressures due to permafrost thawing [86]
	Slope geometry	Redistribution of stresses in response to changes of slope geometry (e.g. overstepping) by glacier erosion or wave actions on shorelines and cliffs [61]	
		Cracking and bulging of the slopes as result of the unloading and debuttinging [71, 87]	Melting of ice-bonds in rock joints [77, 88]
	Soil/rock Strength	Rock deterioration/ weathering - Segregation ice growth and joint widening [77]	
Unprotected soil cover as result of wildfires and/or logging [89]			
New exposures	New susceptible landforms: e.g. moraines and moraine-dammed lakes [90-91]		
		Increase of available unconsolidated sediment [77, 92]	
Decrease landslide occurrence		Dryer antecedent conditions: reduction of the mean annual precipitation associated to an increase of evapotranspiration [57]	Reduction of the rainfall intensity and /or duration [60]
		Long term evolution towards more stable slope profiles [83]	
		Sediment exhaustion [62]	
		Increase of forest (abandonment) [93]	

Table 1. Changes in landslide occurrence in response to climatically and anthropogenically-driven modifications of the slopes [94]

activity in Sierra Nevada during the last 150 years, in which temperatures have raised, is about 50% lower than the average of postglacial activity rate [82]. This process is known as “event resistance” [81]. Improved stability conditions are also achieved in places where large unstable rock masses slid down over discontinuity surfaces leaving more stable topographic profiles [83-84].

CLIMATE CHANGE AND LANDSLIDE RISK MANAGEMENT

In term of landslide risk management, climate change is challenging. The pace and intensity of the hazardous processes is affected but so are the exposure and resilience of the affected population and infrastructures. In this section we will not review management measures and strategies, but we will briefly highlight some critical aspects that may be affected by climate change.

Unprecedented scenarios

It is feasible to estimate of probabilities of extreme events without understanding of the causal structure that controls the stability of slopes. [95] complained that the historical or geological record it is often assumed as a random sample drawn from the postulated distribution and that frequencies are transformed in probabilities, without proper consideration of the hydrology, meteorology or climatology. Engineers design their protection works (retention basins, channelization for debris flows, etc.) based on statistical methods which extrapolate the magnitude of possible future events. Climate change will challenge this approach because purely data-driven methods can only extrapolate from past landslide records, but cannot anticipate unprecedented events. Hazard mapping based exclusively on historical events could be deceptive, as shown in recent debris flow events in Italy [96].

According to IPCC [1,56], many of the climate-related changes observed since the 1950s are unprecedented over decades to millennia and are changing at rates unprecedented in at least the last 2000 years. Sea level observations show that GMSL rose by 0.20 m over the period 1901–2018, at an average rate of 1.7 mm yr⁻¹. New analyses and paleo-evidence show that this rate is faster than during any century over at least the last three millennia.

Furthermore, most types of hydro-geomorphical hazards are expected to change in frequency, magnitude and areas affected. Thus, as the cryosphere continues to decline, landslides, floods, and cascading events resulting from glacier retreat and permafrost thaw, will also emerge where in locations where there is no record of previous events. This will affect especially alpine regions in which permafrost is vanishing, leaving uncovered poorly consolidated debris masses on steep slopes and generating new debris flow sources, while continued warming will further enlarge these zones.

The use of numerical models and, in particular, hydrological models coupled with mechanical models are therefore needed to overcome the limitations offered by statistical approaches and incorporate climate change forcing. To this aim, a minimum geological and geomechanical data are needed, such as an complete landslide inventory over a long time, an accurate 3D lithological model (e.g. the spatial distribution and the thickness of the surficial formation) and to account for the spatial variability of the geomechanical parameters [96]. These models must be upgraded to account for the expected changes not only of the climate forcing, anthropogenic changes and their effect on the landslide predisposing parameters of the slopes.

A critical issue behind the climate change is whether it will modify the magnitude/intensity of future events. As already mentioned above, this will depend on the sediment availability and the weathering rate in the affected basins [62,66]. Mitigation measures such as debris flow channels are designed for specified returns periods. They may become undersized if magnitude of the mobilized materials is bigger than the design event [73]. Increase of magnitude is feasible in locations having unlimited sediment source as it

occurs in slopes composed of weak volcanic materials [98] or where the strength of the slope materials deteriorates quickly as for example, deepening of the active layer by thawing permafrost [86]. The magnitude increase might occur despite the fact that the overall frequency suffers only slight changes [99].

Exposure

Exposure is a key component of the landslide risk assessment and management. [100] concluded that even though summer monsoon and tropical cyclones are important climatic triggers of landslides in Asia, population growth is driving the increase of fatal landslides and damages.

Various studies show an increase in fatal landslides and the number of victims. However, it is not clear whether the increment is due to the increase in landslides, to the anthropogenic changes, to the exposure or to the combined effect of all of them. These relationships deserve more careful analyses. Despite rainfall is the most common trigger for fatal landslides, an increasing trend in anthropogenically related events in the last decades has been observed in different countries [101-102]. An analysis of the period 1995-2014 in Europe shows that the increase in mortality has occurred at the same time as there was a significant reduction in intense rains in the Iberian Peninsula and an increase in the same in areas such as the north of Italy [103].

To our knowledge, there are no specific studies on how exposure has modified the observed risk. A recent study has analyzed the evolution of rockfalls with victims that occurred in the natural environment (coastal cliffs and high mountains) in Spain in the last 70 years [104]. The the number of victims has multiplied by a factor between 3 and 6 during the last two decades, coinciding with a greater human concurrence of natural spaces. These figures support the need to disaggregate fatal landslide data in order to properly assess the role of exposure and the anthropogenic factors.

Landslide mitigation measures

Landslide mitigation measures have revealed fundamental in order to reduce casualties and losses from landslide occurrence. The number of projects involving all kind of engineering and bio-remedial measures for preventing and reducing landslides has increased substantially all over the world. This is the case of China [53], where 244,559 projects and \$15,920.8 million were engaged into landslide mitigation programs between 2004 to 2016. During this period, 13,603 landslides were successfully predicted and 641,333 people were spared from landslide damage, together with an estimated saving of \$1,372.94 million in economic losses. However, despite the efforts and that the number of landslide events is declining, the number of fatal landslides is increasing due to the human disturbance of the slopes [53]. A similar study conducted in China showed that very large fatal landslide events (≥ 30 fatalities) increased during 1950–1999 and declined from 2000 to 2016 [105]. The decreasing trend after 2000 is attributed to the landslide mitigation investments. Conversely, small and medium-sized fatal landslide events (fatalities < 10) showed an increasing trend between 1950 and 2016. This significant increasing trend is partly due to the data availability but it may also be related to the increase in extreme precipitation events, urban development, and others.

Existing protections may have limitations in providing a satisfactory level of security. The engineering designs may be not be fully adequate, the construction may be poor-quality and maintenance lacking. A striking example is the event of Arás torrent in Biescas, Spain [106]. The torrent basin has 18.6km² and 40 check dams were built in between 1931 and 1950. On 7 August 1996, an intense and short-lasting

storm resulted in a 400-600m³/s flood. Significant scouring and widening of the torrent bed occurred and nearly all the check dams were destroyed, releasing about 68,000 m³ of stored sediments which spread over the fan downstream. The existing channel in the fan with a capacity of 120 m³s⁻¹ was buried with sediments and overflowed. Flood waters burst into a campsite with a toll of 87 campers and economical losses estimated at ~US\$55 million. The return period of the rainfall was estimated between 200 and 300yr. The calculated discharge ranged between 400-600 m³/s. However, according the regional hydrological records, the maximum hydrological discharge for a basin of this size is 200 m³/s, far from the value of this event. The stratigraphic record obtained from the excavation of trenches in the accumulated sediments in the fan, shows that the size of the transported blocks in this event was unprecedented. The check dams were built to restrict torrent down cutting and widening, to prevent erosion, slope undermining, and decrease bed gradient and water velocity. However, dam undermining, scour of lateral buttress, hydrostatic pressure and impact of boulders, lead to the failure of the structures. The presence of these check dams provided a false sense of security to the users of the alluvial fan. The analysis of the event suggests that the collapse of the dams caused an aggravation of the flood and of the damages. Similar findings were obtained from the analysis of the Zhouqu debris flow disaster in China in 2010, with 1700 people killed [107]. The existence of poor engineering practices and inadequate construction is found to play a critical role on the increase of fatal landslides in Turkey [101].

It is important to highlight that protection measures encourage the development of places previously classified as hazardous. In the case of the occurrence of events bigger than the design or operational failure the damages may be substantially greater. In this regard, it must be insisted that hazard and risk maps should specifically specify/delineate the areas considered as residual risk areas, in the sense defined by the Swiss standards [108].

In coastal regions, sea level rise (SLR) remains a challenge. A diversity of adaptation responses to coastal impacts have been implemented around the world, but mostly as a reaction to current coastal risk or experienced disasters. Most of measures are reactive based initially on hard engineering structures (e.g. seawalls, breakwaters) and are found all around the world, particularly around many coastal cities and deltas. Despite of this, it lacks of a global management strategy to fight coastal erosion. The protection of long stretches of cliffs and the stabilization of coastal landslides remains a challenge. As a general conclusion, it will be very difficult to establish protection measures against erosion and undermining of long stretches of coastal cliffs. Only in the case of large slides threatening property and infrastructures the protection measures would be economically feasible or affordable [63].

Early Warning/Alert Systems

These are last-option measures that are applied when the threatened population cannot move from the dangerous locations. Alert systems rely on a chain of decisions/component (proper prediction in both temporal and spatial coordinated, sturdy and redundant measurement system, communication/alert system and educated population and enough time for reaction). The predicted scenario may be overcome by disaster aggravation processes. Recent experiences show that despite their implementation they cannot avoid catastrophic consequences as shown in Tongzilin Gully in China. There, despite the existence of an alert system the event produced 25 fatalities and large economic losses [36]. The catastrophe was aggravated by coarse particles blocking road culverts leading to an overflow. The affected area was 25% bigger than the model predictions.

FINAL REMARKS

Increasing evidence indicates that global change (both climate and anthropogenic) affect the stability of slopes worldwide and this fact can no longer be omitted in landslide hazard assessment and in QRA. A main restriction is that the quantitative relation between the global change and the landslide occurrence is not yet entirely reliable. The response of the slopes is complex, geographically dissimilar and non-linear. It may involve late responses that can be delayed from a few decades to hundreds of years. Analysis of future scenarios has to consider the occurrence of opposing effects: (i) shift of potential landslide sources towards receding glacial and periglacial environments, which release large amount of sediments, exposing degraded rock mass and overstepped slopes. In contrast, the reduction of both the activity and frequency may be expected following sediment exhaustion and evolution towards more stable slope profiles; (ii) the increase precipitation will favor the increase of landslide frequency, particularly in high-latitude and alpine settings. Conversely, a substantial reduction of precipitation is expected in other regions such as the Mediterranean basin, with the subsequent reduction of landslides.

Special concern is required in locations where landslide activity was hitherto minimal. In this sense, coastal areas can become new hotspots for the occurrence of landslides. In any case, it should not be forgotten that a number of studies show that anthropogenic alterations can be more detrimental to the future incidence of landslides than the climate.

In terms of hazard analysis, statistical approaches have to be revisited as they might have become obsolete due to climate change. Hazard should be estimated based on numerical analysis and coupled models in which the climate change input incorporated.

Although preventive measures to reduce landslide hazard and risk should be preferred to reactive measures, in particular, the land use planning. There are still numerous difficulties in implementing preventive measures, especially in developing countries. The management of the landslide risk by means of structural protection works is expensive and sometimes unsustainable. With the economic development, the impact of engineering activities on mountain disasters is expected become more prominent in the future. The existing protection and diversion engineering structures must be checked in base of future scenarios. Some design can be undersized if new events become much larger than the design-event. Care is particularly needed in locations where existing protection works have promoted the development of previously considered dangerous areas (residual risk areas). It is therefore necessary to perform follow-ups and evaluations after major events to analyze the cost-benefit ratio of the measures undertaken.

Effective governance is fundamental for reducing risk. A key issue is the consideration of the exposure and undertake measures such as planning, zoning, and exert strong control to restrict urbanization in potentially hazardous areas. Early warning systems must be considered the last-option and requires reliable alerts (population is reluctant to false alerts), careful supervision and follow up and permanent checking of the appropriate functions of the component and an educated population.

Acknowledgements

This study was supported by the National Research Project "Advances in rockfall quantitative risk analysis (QRA) incorporating developments in geomatics (GeoRisk)" with reference PID2019-103974RB-I00, funded by MCIN/ AEI/10.13039/501100011033.

References

- [1] Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G et al. (2021). *The Physical Science Basis* . . In Climate Change 2021. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY,USA, pp. 33–144. doi:10.1017/9781009157896.002
- [2] Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr. Ann.*, 62A, 23-27
- [3] Iverson, R.M. (2000). Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36(7), 1897-1910.
- [4] Delonca, A., Gunzburger, Y., and Verdel, T. (2014). Statistical correlation between meteorological and rockfall databases, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 1953–1964, doi:10.5194/nhess-14-1953-2014
- [5] Corominas, J. (2000). Landslides and climate. Keynote lecture- In Bromhead E, Dixon N, Ibsen ML (eds).: *Proceedings 8th International Symposium on Landslides*, Cardiff, UK; A.A. Balkema, CD-ROM vol. 4: 1–33
- [6] Wieczorek, G.F. (1996). Landslide triggering mechanisms. In A.K. Turner & R.L. Schuster (eds.) *Landslides: investigation and mitigation*. TRB Special Report, 247. National Academy Press, Washington: 76-90
- [7] Casadei, M., Dietrich, W.E., Miller, N.L. (2003). Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 925–950.
- [8] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, Stark C. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5: 3-17.
- [9] Baum, R.L., Godt, J.W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides*, 7:259–272.
- [10] Segoni, S.; Piciullo, L.; Gariano, S.L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides* 2018, 15, 1483–1501.
- [11] Johnson, K.A., Sitar, N. (1989). Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27: 789-801
- [12] Au, S.W.C. (1998). Rain-induced slope instability in Hong Kong. *Engineering Geology*, 51: 1-36
- [13] Finlay, P.J.; Fell, R. and Maguire, P.K. (1997). The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall" *Canadian Geotechnical Journal*, 34: 811-824
- [14] Sandersen, F.; Bakkehøi, S., Hestnes, E.; Lied, K. (1996). The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. In: Senneset (Ed.). *Landslides*. Proceedings 7th International Symposium on Landslides. A.A. Balkema. Vol. 1: 97-114
- [15] Wieczorek, G.F. (1987). Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. *Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology*, 7: 93-104
- [16] Rahardjo, H., Li, X.W., Toll, D.G., Leong, E.C., (2001). The effect of antecedent rainfall on slope stability. *Geotechnical and Geological Engineering* 19, 371–399
- [17] Rahimi A, Rahardjo H, Leong C (2011) Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure. *J Geotech Geoenviron Eng (ASCE)* 137(5):483–49
- [18] Hutchinson, J.N.; Bhandari, R. (1971). Undrained loading: a fundamental mechanism of mudflows and other mass movements. *Geotechnique*, 21: 353-358

- [19] Aaron, J., Loew, S., Forrer, M. 2021. Recharge response and kinematics of an unusual earthflow in Liechtenstein. *Landslides*, 18: 2383-2401. DOI 10.1007/s10346-021-01633-5
- [20] Savage, W.Z.; Fleming, R. W. (1996). Slumgullion landslide fault creep studies. In D.J Varnes & W. Z. Savage (eds.). *The Slumgullion earth flow: a large-scale natural laboratory*. U. S. Geological Survey Bulletin, 2130: 73-76
- [21] Corominas J, Moya J, Ledesma A, Lloret A, Gili JA. (2005). Prediction of ground displacements and velocities from groundwater level changes at the Vallcebre landslide (Eastern Pyrenees, Spain). *Landslides* 2:83–96
- [22] Malet J.P., van Asch, T.H.W.J., van Beek, R., Maquaire, O. (2005). Forecasting the behaviours of complex landslides with a spatially distributed hydrological model *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5: 71-85, 10.5194/nhess-5-71-2005
- [23] Eberhardt, E., Stead, D., Coggan, J.S., (2004). Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes—the 1991 Randa rockslide. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41 (1), 69 – 87
- [24] Guglielmi, Y. Cappa, F. (2010). Regional-scale relief evolution and large landslides: insights from geomechanical analyses in the Tinée Valley (southern French Alps). *Geomorphology* 117, No. 1–2, 121–129.
- [25] Pánek T, Klimeš J. (2016). Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: a review. *Earth-Science Reviews* 156: 14–38
- [26] Stead, D., and A. Wolter (2015), A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology, *J. Structural Geol.*, 74: 1–23, doi:10.1016/j.jsg.2015.02.002.
- [27] Noverraz, F.; Bonnard, Ch.; Dupraz, H., Huguenin, L. (1998). *Grands glissements et climat. Rapport final PNR 31*. Vdf. Zurich. 314 pp.
- [28] Ronchetti, F.; Borgatti, L.; Cervi, F.; Corsini, A. (2010). Hydro-mechanical features of landslide reactivation in weak clayey rock masses. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 69, 267–274
- [29] Flageollet, J.C.; Maquaire, O.; Martin, B. & Weber, D. 1999. "Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France)". *Geomorphology*, 30: 65-78
- [30] Gariano, S.L., Guzzetti, F. (2016). "Landslides in a changing climate". *Earth Sci. Rev.* 162: 227–252
- [31] Corominas, J.; Alonso, E.E. Geomorphological effects of extreme floods (November, 1982) in the southern Pyrenees. (1990). In *Hydrology in mountainous regions*. IAHS, 1990, Publ. 194: 295-302
- [32] Zimmermann, MN., Haeberli, W. (1992). Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas. A case study in the Swiss Alps. In: *Greenhouse-Impact on Cold-Climate Ecosystems and Landscapes*. Catena supplement, 22: 59-72
- [33] Patton, A.I., Rathburn S.L., Capps, D.M. (2019). Landslide response to climate change in permafrost regions. *Geomorphology*, 340: 116–128.
- [34] Eisbacher, G. H. & Clague, J.J. (1984). Destructive mass movements in high mountains: hazard and management. *Geological Survey of Canada Paper* 84-16: 230 pp.
- [35] Irmiler, R., Daut, G., Mäusbacher R., (2006). A debris flow calendar derived from sediments of lake Lago di Braies (N. Italy). *Geomorphology* 77, 69–78
- [36] Zhong, Z.; Chen, N., Hu, G., Han, Z., Ni, H. 2021. Aggravation of debris flow disaster by extreme climate and engineering: a case study of the Tongzilin Gully, Southwestern Sichuan Province, China. *Natural Hazards*, 109: 237–253 <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04834-2>
- [37] Draebing, D. and Krautblatter, M. (2019). The efficacy of frost weathering processes in alpine rockwalls, *Geophys. Res. Lett.*, 46, 6516–6524
- [38] Matsuoka, N. & Sakai, H. (1999). Rockfall activity from alpine cliff during thawing periods. *Geomorphology*, 28: 309-328
- [39] Regmi D, Watanabe T (2009) Rockfall activity in the Kangchenjunga area, Nepal Himalaya. *Permafrost and Periglacial Processes* 20: 390-398. <https://doi.org/10.1002/ppp.664>

- [40] Ravanel, L., Deline P. (2010). Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the north side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, 21: 357-365
- [41] Savi, S., Comiti, F., Strecker, M. (2021). Pronounced increase in slope instability linked to global warming: a case study from the eastern European Alps *Earth Surf. Process. Landforms*, 46 (7): 1328-1347
- [42] Sallenger, A. H., W. Krabill, J. Brock, R. Swift, S. Manizade, and H. Stockdon. (2002). Sea cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave run-up during the 1997–1998 El Niño. *Marine Geology* 187:279–297
- [43] Hapke, C.J., Green, K.R., (2006). Coastal landslide material loss rates associated with severe climatic events. *Geology* 34, 1077–1080
- [44] Hürlimann, M.; Ledesma, A. y Martí, J. (1999). Conditions favouring catastrophic landslides on Tenerife (Canary Islands). *Terra Nova* 11: 106-111
- [45] Masson, D. G., et al. (2002), Slope failures on the flanks of the western Canary Islands, *Earth Sci. Rev.*, 57, 1 – 35, doi:10.1016/S0012-8252(01)00069-1
- [46] Carracedo, J.C., Day, S., Guillou, H., Pérez Torrado, F.J., (1999). Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research Special Issue*, 94, 1-4: 169-190
- [47] Ablay, G. y Hürlimann, M. (2000). Evolution of the north flank of Tenerife by recurrent giant landslides. *J. Volcanol. Geoth. Res*, 103: 135-159.
- [48] Turner, TR; Duke SD, Fransen BR, Reiter ML, Kroll AJ, Ward JW, Bach JL, Justice TE, Bilby RE (2010) Landslide densities associated with rainfall, stand age, and topography on forested landscapes, southwestern Washington, USA. *For Ecol Manage* 259(12):2233–2247
- [49] Pfeil-McCullough E, Bain DJ, Bergman J, Crumrine D (2015) Emerald ash borer and the urban forest: Changes in landslide potential due to canopy loss scenarios in the City of Pittsburgh, PA. *Sci Total Environ* 536:538–545
- [50] Strunk, H. (1997). A 3300 years history of debris-flow activity in the southern Alps: vegetation cover, soil depth, forest fire and overgrazing as controlling factors. *Palaeoclimate Research*, 19: 223-232
- [51] Jakob M (2000). The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena* 38(4):279–300
- [52] Shu HP, Hürlimann M, Molowny-Horas R, González M, Pinyol J, Abancó C, Ma JZ (2019) Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d’Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction. *Sci Total Environ* 693:133557
- [53] Zhang FY, Peng, J., Huang, X., Lan, H. 2021. Hazard assessment and mitigation of non-seismically fatal landslides in China. *Natural Hazards* (2021) 106:785–804 <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04491-x>
- [54] Remondo, J., Soto, J.; González-Díez, A.; Díaz de Terán, J.R.; Cendrero, A.(2005). Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas. *Geomorphology*, 66, 69-84.
- [55] Froude MJ, Petley DN (2018) Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18(8):2161–2181
- [56] IPCC, 2019: Technical Summary Pörtner, H.O.; Roberts, D.C. et al. (2019). IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.O.; Roberts, D.C. et al (eds.)]. In press.
- [57] Gariano, S.L., Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth Sci. Rev.* 162: 227–252
- [58] Chiang, S.H., Chang, K.T. (2011). The potential impact of climate change on typhoon-triggered landslides in Taiwan, 2010–2099. *Geomorphology* 133: 143–151.
- [59] Jakob, M., Owen, T. 2021. Projected effects of climate change on shallow landslides, North Shore Mountains, Vancouver, Canada. *Geomorphology*, 393, 107921. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107921>

- [60] Comegna, L., Picarelli, L., Bucchignani, E., Mercogliano, P. (2013.) Potential effects of incoming climate change on the behaviour of slow active landslides in clay. *Landslides*, 10 (4): 373–391
- [61] Crozier, M. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*, 124: 260-267
- [62] Corominas, J., Moya, J. (2008). A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. *Engineering Geology*, 102: 193-213.
- [63] Corominas, J.; Mateos, R.M.; Remondo, J.(2017) Review of landslide occurrence in Spain and its relation to climate. In *Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change*; Ho, K., Lacasse, S., Picarelli, L., Eds.; CRC Press: Leiden, The Netherlands. pp. 351–377; ISBN 978-1-315-38778-9.
- [64] Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M. (2005). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Nat. Hazards Earth System Sci.*, 6: 115–131
- [65] Meusburger, K., Alewell, C. (2009). On the influence of temporal change on the validity of landslide susceptibility maps in an alpine catchment, Switzerland. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 1495–1507.
- [66] Jakob, M., Bovis, M., Oden, M., (2005). Estimating debris flow magnitude and frequency from channel recharge rates. *Earth surf. Processes Land.* 30, 755–766
- [67] Ferlisi, S., De Chiara, G., Cascini, L. (2016). Quantitative risk analysis for hyperconcentrated flows in Nocera Inferiore (southern Italy). *Nat. Hazards*, 81 (Suppl. 1): 89–115
- [68] Bottino, G., Chiarle, M., Joly, A., Mortara, G. (2002). Modelling rock avalanches and their relation to permafrost degradation in glacial environments. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13: 283 – 288.
- [69] Johnson, B.G., Smith, J.A., Diemer, J.A. (2017). A chronology of post-glacial landslides suggests that slight increases in precipitation could trigger a disproportionate geomorphic response. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42: 2223-2239.
- [70] Bray, M.J., Hooke, J.M. (1997). Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *J. Coastal Research*, 13: 453-467.
- [71] Geertsema, M., Clague, J.J., Schwab, J.W., Evans, S.G. (2006). An overview of recent large catastrophic landslides in northern British Columbia, Canada. *Eng Geol.*, 83:120–143
- [72] Petley, D.N., Hearn, G.J., Hart, A., Rosser, N.J., Dunning, S.A., Owen, K., Mitchell, W.A. (2007). Trends in landslide occurrence in Nepal. *Nat Hazards*, 43:23–44.
- [73] Keiler, M., Knight, J., Harrison, S. (2010). Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 368: 2461–2479
- [74] Dietrich, A., Krautblatter, M. (2017). Evidence for enhanced debris-flow activity in the Northern Calcareous Alps since the 1980s (Plansee, Austria). *Geomorphology*, 287: 144–158
- [75] Deline, P., Gardent, M., Magnin, F. and Ravanel, L.. (2012). The morphodynamics of the Mont Blanc massif in a changing cryosphere: a comprehensive review. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, 265–283. doi:10.1111/j.1468-0459.2012.00467.x.
- [76] Gruber, S., Haeberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature- related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research* 112, F02S18
- [77] Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K., Avian, M., Carrivick, J. (2012). Climate change and rock fall events in high mountain areas: numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94, 59–78. doi:10.1111/j.1468-0459.2011.00449.
- [78] Messenzehl, K., Meyer, H., Otto, J.C., Hoffmann, T., Dikau, R. (2017). “Regional-scale controls on the spatial activity of rockfalls (Turtmann Valley, Swiss Alps) - A multivariate modeling approach”. *Geomorphology*, 287: 29–45.
- [79] Ballantyne, C.K., Sandeman, G.F., Stone, J.O., Wilson, P., (2014). Rock-slope failure following Late Pleistocene deglaciation on tectonically stable mountainous terrain. *Quat. Sci. Rev.*, 86: 144–157.
- [80] Jomelli, V., Pech, V.P., Chochillon, C., Brunstein, D., (2004). Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change* 64, 77–102.

- [81] Glade, T., Crozier, M. (2005). The nature of landslide hazard impact. In: Glade T, Anderson M, Crozier M (eds) *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, pp 43–74
- [82] Wieczorek, G.F.; Jäger, S. (1996). Triggering mechanisms and depositional rates of postglacial slope-movement processes in the Yosemite Valley, California. *Geomorphology*, 15: 17-31
- [83] Cruden, D.M., Hu, X.Q. (1993). Exhaustion and steady state models for predicting landslide hazards in the Canadian Rocky Mountains. *Geomorphology*, 8: 279-285
- [84] Ballantyne, C.K. (2002). Paraglacial geomorphology. *Quat. Sci. Rev.*, 21: 1935-2017.
- [85] Richardson, S.D., Reynolds, J.M. (2000). "An overview of glacial hazards in the Himalayas". *Quat. Int.*, 66: 31–47.
- [86] Harris, C., Arenson, L. U., Christiansen, H. H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hölzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M. A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J. B., Nötzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S. M., Mühl, D. V. (2009). "Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses". *Earth-Sci. Rev.*, 92, 117–171,
- [87] Holm, K., Bovis, M.J., Jakob, M. (2004). The landslide response of alpine basins to post-Little Ice Age glacial thinning and retreat in southwestern British Columbia. *Geomorphology*, 57: 201 – 216
- [88] Davies, M.C.R., Hamza, O., Harris, C. (2001). The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 137–144
- [90] Clague, J.J., Evans, S.C., (2000). A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quat. Sci. Rev.*, 19: 1763–1783
- [91] Kääb, A., Reichmuth, T. (2005). Advance mechanisms of rockglaciers. *Permafrost and Periglacial Processes* 16 (2), 187–193.
- [92] Frank, F., Huggel, C., McArdeell, B.W., Vieli, A. (2019). Landslides and increased debris-flow activity: A systematic comparison of six catchments in Switzerland. *Earth Surf. Process. Landforms* 44, 699–712
- [93] Houet, T., Grémont, M., Vacquié, L., Forget, Y., Bourrier, F., Peltier, A., Puissant, A., Bernardie, S., Grandjean, G. (2017). "Downscaling scenarios of future land use and land cover changes using a participatory approach: An application to mountain risk assessment in the Pyrenees (France)". *Reg. Environ. Chang.*, 17: 2293–2307.
- [94] Corominas, J. (2021). Quantitative assessment of landslide risk: how well are we doing? In : M. A. Cabrera, L.F. Prada-Sarmiento & J. Montero (editors). *SCG- XIII International Symposium on Landslides*. Cartagena, Colombia. June 15-19, 2020. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- [95] Klemes, V. (2000). Tall tales about tails of hydrological distributions. *J. Hydrol. Eng.* 5: 227-231
- [96] Arattano, M., Conte, R., Franzl, L., Giordan, D., Lazzari, A., Luino, F. (2010). Risk management on an alluvial fan: a case study of the 2008 debris-flow event at Villar Pellice (Piedmont, N-W Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 999-1008
- [97] Baum R, Coe JA, Godt JW, Harp EL, Reid ME, Savage WZ, Schulz WH., Brien DL, Chleborad AF, McKenna JP, Michael JA., 2005. Regional Landslide-Hazard Assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides*, 2: 266-279
- [98] Yano, A., Shinohara, Y., Tsunetaka, H., Mizuno, H., Kubota, T. (2019). Distribution of landslides caused by heavy rainfall events and an earthquake in northern Aso Volcano, Japan from 1955 to 2016. *Geomorphology*, 327: 533–541.
- [99] Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M., Gobiet, A. (2014). Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change* 122, 141–155.
- [100] Petley, D.N. (2010). On the impact of climate change and population growth on the occurrence of fatal landslides in South, East and SE Asia. *Q J Eng Geol Hydrogeol*, 43:487–496

- [101] Görüm, T., Fidan, S. (2021). Spatiotemporal variations of fatal landslides in Turkey. *Landslides*, 18:1691–1705. DOI 10.1007/s10346-020-01580-7
- [102] Garcia-Delgado , H., Petley, D.N., Bermúdez, M.A., Sepúlveda, S.A. (2022). Fatal landslides in Colombia (from historical times to 2020) and their socio-economic impacts. *Landslides*, DOI 10.1007/s10346-022-01870-2
- [103] Haque U, Blum P, da Silva PF, et al. (2016) Fatal landslides in Europe. *Landslides* 13(6):1545-1554, doi: 10.1007/s10346-016-0689-3
- [104] Corominas, J (2022). Los desprendimientos rocosos, impacto y análisis cuantitativo del riesgo. X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España. Keynote lecture
- [105].Lin, Q.G.; Wang, Y. (2018). Spatial and temporal analysis of a fatal landslide inventory in China from 1950 to 2016. *Landslides*, 15: 2357–2372
- [106] Alcoverro, J., Corominas, J., Gomez, M., (1999). The barranco de Aras flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Engineering Geology* 51, 237 –255
- [107] Wang, G.L. (2013) Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China. *Nat Hazards* 69(3):1835–1847. [https:// doi. org/ 10. 1007/ s11069- 013- 0772-1](https://doi.org/10.1007/s11069-013-0772-1)
- [108] Lateltin O, Haemmig C, Raetzo H, Bonnard C. (2005). Landslide risk management in Switzerland. *Landslides* 2: 313–320

Holistic Management of Landslide Risk: systems framework and public safety policies

Ken K. S. Ho^{1*} and Carrie Cheung²

¹ Formerly Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department,
Hong Kong SAR Government, China

² Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering and Development Department,
Hong Kong SAR Government, China

ABSTRACT

This paper reflects on the insights and lessons learned in the formulation and implementation of integrated landslide risk management in Hong Kong over the past 45 years. From the safety manager's and governance perspective, a systems approach appears to be the most effective means in managing, at scale, the landslide risks posed to a community. However, it is imperative to recognise that the evolution of a comprehensive system is the result of many years of experience accumulation and collaboration of key stakeholders, including professionals, safety managers, policy-makers and the general public. While learning from past landslide incidents is a painful way to systems design, it is advisable for a country/jurisdiction to maximise the benefits from technical studies, management reviews as well as experience transfer (including other countries' current policies or guidelines/framework/recommendations from international organisations with suitable adaptation for local conditions) in terms of public safety policies. A paradigm shift from conventional geotechnical approach to risk management is of the essence. Key factors for quality public safety policy and potential pitfalls, and the risk management strategies for slopes in the urban and rural settings, are also discussed.

The advances and extensive applications of innovation and technology for slope safety management in Hong Kong in recent years are consolidated in the paper. In addition, the acute challenges associated with climate emergency, in particular the impact of extreme weather events, are highlighted, together with the pragmatic strategies and measures adopted in Hong Kong to manage the corresponding landslide risks under the context of mitigation, adaptation and resilience.

* Corresponding author: kenho911@gmail.com

1. INTRODUCTION

Rapid urban development and climate change leading to extreme weather events occurring more frequently and becoming more severe can bring about a drastic increase in landslide risk. Slope failures are usually more detrimental to many developing and less-developed countries where slope safety management appears to be piecemeal and largely comprised of reactive measures following landslide disasters.

The establishment of a customised slope safety management system is not the sole responsibility of a policy-maker. In fact, unless the policy-maker is deeply engaged, it will generally be difficult for the concerned person to appreciate the imminent need for continued funding of risk reduction policies against potential losses. Political considerations may also override in practice. The buy-in process relies heavily on engaging and initialising stakeholders regarding the nature and reality of landslide risks at all levels of stakeholders. Under the context of landslide risk management, there are three key parties, namely (i) professionals providing expert geotechnical/geological input, (ii) slope safety managers and regulators who are involved in designing and implementing risk management governance and processes, together with the corresponding resource allocators and policy-makers, and (iii) general public whose activities may knowingly or unknowingly destabilize a slope or unduly expose themselves to landslide risk (Ho & Cheung, 2020). A proper understanding of the respective empowerment, authority, technical competence and limitations, as well as their inter-relationships, is of paramount importance.

This paper focuses on the roles of slope safety managers and regulators, who are usually the most influential to policy-makers, in formulating the slope safety policies and designing regulatory systems that are most appropriate and fit-for-purpose to a particular country or jurisdiction, taking into account the political and societal environment, retrofitting works vis-à-vis landslide remedial costs, scientific understanding of the key problems faced and technological support, etc. While the apportionment of the reliance on risk factors for decision-making, and hence resources allocation, may be split between urban and rural slopes due to their different constraints, the fundamental risk-based concepts are aligned and applicable to both settings.

2. SYSTEMS FRAMEWORK FOR RISK MANAGEMENT

2.1 Evolution of Hong Kong's Slope Safety System

It is common that the government of a jurisdiction is expected to discharge its due diligence and undertake full responsibility in protecting her vulnerable citizens against natural disasters. From an engineering point of view, this is an acute challenge due to the uncertainties and risk that could not be fully eliminated. To better manage expectations, it is more appropriate to describe that the government would undertake a centralised and prompting role among various stakeholders or key parties to ensure potential management weak-links are strengthened via a systems framework, while nurturing an environment for devolution and community-based approaches. An ideal system should comprise both top-down (e.g. legislation-empowered audits, risk management policies and plans, assignment of slope maintenance responsibilities, etc.) as well as bottom-up (e.g. community participation, capacity building, empowerment of local champions amongst indigenous population, private slope owners proactively carry out regular slope maintenance, etc.) policies and approaches to be applied in different proportions that best fit a specific district/area/community.

The adoption of a risk-based or risk-informed approach for slope safety management is believed to be an indispensable element of holistic landslide risk management. This has proven to be successful in

many aspects, including parametric measurements (e.g. rolling average annual slope failure rate statistics) and international peer benchmarking (e.g. Slope Safety Technical Review Board or its equivalent). These are also useful tools for geotechnical professionals to demonstrate to policy-makers or the general public the overall performance of a basket of slope safety management strategies. Hong Kong has a track record of the evolution of a comprehensive slope safety system over more than four decades (adjustments were made mainly on a crisis-driven basis at early stages with designed enhancements at later stages), with strategies addressing various slope classes, systematically learning hard lessons from serious landslides, uncertainties and achievements, together with key observations for potential system improvement. (Malone, 1999; Wong, 2005 & 2009; Morgenstern, 2017; Ho & Cheung 2020).

2.2 Systems Design

2.2.1 *From problems to solutions and public safety policies*

A proper understanding of the key problems is the first step to systems design. The problems could either be revealed by landslide incidents raising an alarm or public outcry (viz. painful lessons), technical studies (viz. enhancing understanding by research development), or management reviews (viz. governance). Quality data is of the essence in this regard. Based on the identified problems, goals, roadmaps and associated strategies should be set and prioritized. These rudiments of public safety policies will have to be reviewed in respect of the scope and coverage (e.g. new and existing slopes, urban man-made features and rural natural terrain including illegal site formation works, pre-construction and post-construction condition review, etc.), developed based on consideration of relative priorities, and implemented in an orderly manner with a view to achieving the most cost-effective and efficient risk reduction/management approach.

The next step is resource allocation which comprises two parts. 'Part 1: justification' is a 'selling' process which involves lobbying the resource allocators (usually the politicians) on the imminent needs and value for money of the proposed approach and investment. On top of risk-based considerations of socio-economic factors, relevant technical standards and international best practice, the recommendations by international counterparts in the form of a Technical Review Board- or Expert Panel may short-circuit the approach and tap expert insights and hard-earned lessons from other places with similar challenges. Technically competent persons who are renowned professional practitioners or from the academia may also add to the cogent argument in the form of think-tanks or learned societies. Their contributions to the risk management perspective for hazard evaluation and mitigation are most valuable.

'Part 2: risk-based allocation' is a scientific mechanism incorporated into the systems framework, which is subject to review and refinement based on Key Results Areas (Wong & Ho, 2006). For instance, urban man-made slopes can include those with high consequence upon failure and strategies supporting a stabilization approach to prevent major failures may be more appropriate. Slopes dispersed in a rural setting with a correspondingly lower risk in terms of consequence-to-life may not deserve the same emphasis under the principle of prudent management of public finance. What really deserve attention are human activities (e.g. unregulated site formation works/dumping of construction waste or household waste/mining, human settlements towards hillsides with adverse site settings, deforestation, cultivation, etc.) that contribute to predisposing and triggering factors for landslides and increase the cost and risks correspondingly. For these, a regulatory or preventive approach with solid and at-scale actions should be taken. As for natural terrain which is too sizeable to treat using in-situ engineering measures, a mitigation approach (e.g. use of debris-resisting or rockfall barriers) should be adopted. Afterall, the allocation of resources should preferably be a risk-based, data-driven balance of political, socio-economical and technical considerations.

During the decision-making process, the connections and collaboration of stakeholders/interested parties should form a strong bond to advocate policy proposals. Usually, the policy proposals would comprise different options, e.g. soft-start-progressive approach or aggressive-start approach, their financial implications and risk apportionment in the long term, etc. are key considerations by the policy-makers.

2.2.2 From public safety policies to participation by stakeholders

Risk management strategies and public safety policies are empowered and materialized via legislation for private slopes and through administrative measures for government slopes. It is imperative to define clearly the agent, together with its authority and ambit, for control actions.

One-way implementation of legislation and administrative measures by the safety manager cannot guarantee a good system. A further step forward is to engage the public (through alignment of goals and objectives), but the prerequisite is to educate them and enhance their emergency preparedness. For example, stepping up public awareness and education programme, community early alert-and-alarm system or systematic programme to upskill and enhance community resilience, improve social cohesion and promote self-help culture, etc. For example, the key components that contributed to landslide risk reduction in the Hong Kong Slope Safety System are (i) regulating and policing new developments, (ii) engineering measures to retrofit existing substandard slopes, (iii) slope maintenance and (iv) non-engineering measures (Cheung, 2021).

The Sandai Framework for Disaster Risk Reduction (2015-2030) (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015) promulgates the urgent need to re-address and build a risk reduction framework under the context of sustainable development in respect of adaptation to climate change and extreme weather events. It provides comprehensive guiding principles on priorities for action at local, national, regional and global levels. It also outlines the specific roles and responsibilities of stakeholders, from leaders to the under-privileged persons, in terms of their commitment, goodwill, knowledge, experience and resources. It calls for international, regional, sub-regional and trans-boundary cooperation, as well as cross-sectoral inputs, such as technology transfer and capacity building, that should be implemented in a timely manner.

2.2.3 From conventional geotechnical approach to risk management – a paradigm shift

Traditionally, the margin of safety of a slope is assessed by stability calculations, supported by site-specific ground investigation. The key premise of this conventional geotechnical approach is that only specific slopes are being assessed, which is mainly suited for engineering projects when assessing the performance of slopes within a site on a 'microscopic' scale. The risk-informed approach, which provides a much broader scale of understanding and perspective, is more appropriate for policy decisions, particularly for slope managers responsible for a large portfolio of slopes. Instead of knowing the stability of an individual slope, the overall risk (i.e. likelihood and consequence of different forms of potential failure) is evaluated for an area, with grid resolutions ranging from district, territory, regional to national scales. Examples of application for land-use planning and control are the susceptibility, hazard and risk maps. Recently, the concept of risk mitigation design has been extended to local (individual slope) and is found to be particularly pragmatic for poor countries where resources are severely limited (United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2017).

Another paradigm shift is the willingness of some policy-makers to proactively invest in spite of future uncertainties in order to protect life and property, hence in turn averting potential social problems,

considering that the reactive (i.e. post-disaster remedial) approach will be more expensive and damaging, not to mention the possible creation of socio-economic and political crises. Having said that, post-disaster forensic landslide investigation and review to pin-point the predisposing and triggering factors are still vital. While it is usually human nature to look at problems in hindsight, mishaps are apparently becoming more unpredictable (in terms of occurrence and scale) even for countries that have a fairly well-established system, one of the main reasons being the increasingly more frequent occurrence of extreme weather events due to climate change.

2.2.4 Keys to success

The keys to success of a systems approach include the following:

- (i) each system component corresponds to certain hazards and risk-based targets;
- (ii) scalable (i.e. a balance of scope of coverage, public expectation and resources);
- (iii) measurable (i.e. articulable and traceable); and
- (iv) continuous improvement mindset and culture (i.e. responsive to technical audits and collaborations).

The Hong Kong Slope Safety System is an example of a highly mature state with components covering policing, works projects, technical development work and setting standards, and public education and information, which contribute to reducing the likelihood and/or consequence of landslides, or addressing public attitude and tolerability of landslide risk as a goal (Wong & Ho, 2006). In recent years, emphasis has been placed on the extensive application of innovation and technology in respect of hazard identification, risk mitigation and management of residual risk (Ho, 2020 and Ho & Cheung, 2020). It took Hong Kong more than 40 years of development in an evolutionary manner responding to various painful lessons arising from fatal landslides. Countries/jurisdictions whose slope safety policy framework is still at its preliminary or infancy stage can take advantage of others' lessons and experience and short-circuit the process by tapping relevant key ingredients for policy setting and systems design. The post-disaster reviews of major failure cases (e.g. Balmforth, 2020, Robertson et al., 2019 and many other landslide investigation reports available in the public domain, including the GEO reports for past major landslide incidents) provide insights to the probable causes and pragmatic recommendations to prevent the recurrence of similar failures. The importance of forensic landslide investigations is highlighted by Ho et al. (2009), Ho & Lau (2010), Oliver-Smith et al. (2016) and Morgenstern (2018).

Depending on the maturity levels and affordability, developing or less-developed countries should be mindful in prioritizing their needs when customizing others' experience for their application. A smart knowledge and technology transfer refers to the judicious selection of fit-for-purpose risk-reduction approaches strategically and tactically, targeting at specific major hazards and taking into account local conditions. This does not only call for the insight of the policy-holders, but also quality and insightful advice from geotechnical professionals that are conversant with risk concepts, socio-economical conscious and pragmatic.

Another secret of success is being open to feedback from technical review board members and stakeholders to pursue continuous improvement of the system. The organisation undertaking the role of a slope safety manager may opt to establish a dedicated research and development (R&D) section to conduct applied research and technical development work with a view to addressing practical and pressing initiatives, with measureable metrics which are an essential proof of money well spent to taxpayers, and in turn justifying sustained funding from the resources allocators. Apart from policy-driven in-house research, the safety manager should also collaborate with the industry, learned societies and the academia on R&D (Government Office for Science, 2013, Noveck et al., 2019), which can have multiple benefits, i.e. capture expertise and state-of-the-art practice by engaging the design consultants

and the works contractors, benchmarking best practice across practitioners, aligning goals among stakeholders, bring best value to resources spent which could be part-funded by government and private companies, etc. (see also Section 3.2.2 of this paper). For example in Hong Kong, a Working Group established under the Hong Kong Institution of Engineers comprising members from the Hong Kong SAR Government, academics and practitioners to review the design guidelines on use of soil nails in loose fill slopes in 2011. Each member contributed according to their expertise and carried out either numerical modelling or construction review to consolidate experience gained and explore improvement in future practice. The result of the Working Group was the publication of supplementary guidelines in 2011 (GEO & HKIE Geotechnical Division, 2011).

One should never underestimate the potential value that would be brought about by overseas experts in the form of technical review boards or consultancies for specialised services (e.g. landslide investigation for major incidents, highly-specialised technology such as slope stability in close proximity to explosives depot, special geology, etc.), as well as professionals from other related disciplines, particularly for innovations and application of new technologies.

Continuous improvement also means that a system should not be immutable and frozen, but to be enhanced corresponding to updates in slope safety policies in view of changing circumstances. Taking Hong Kong as an example, system evolution includes the extension of Landslip Preventive Measures (LPM) Project in 2000 in order to accelerate risk reduction to high-consequence slopes including roadside slopes in response to higher public expectations under economic boom, the introduction of Landslide Prevention and Mitigation Programme in 2010 to dovetail the LPM Project to address the risks posed by natural hillsides (Wong, 2009), as well as the change in policies on slopes affecting squatters(GEO, 2021). The rationale and potential trigger for public safety policy changes are further discussed in Section 3 below.

3. PUBLIC SAFETY POLICIES

3.1 Maturity-based customisation

Policing is an indispensable component of risk management systems design. It is the master plan of related legislation, administrative measures, community engagement programmes, etc. Reference may be made to the Control Objectives for Information and Related Technology (COBIT), which was promulgated by the Information Systems Audit and Control Association (ISACA) and the IT Governance Institute (ITGI) in 1996 for software development/data management, which can be applied to e-business process management. The six levels of process maturity adopted to customize public safety policies are illustrated in Table 1.

Level	Definition	Characteristics	Status under the Public Safety Policy Context
0	Non-existent	<input type="checkbox"/> Unrecognised issues	<input type="checkbox"/> No specific policy for tackling landslide risks <input type="checkbox"/> Disasters imminent
1	Initial/Ad-hoc	<input type="checkbox"/> Recognised issues <input type="checkbox"/> No standardised process <input type="checkbox"/> Ad-hoc approach for tackling problems on a case-by-case basis <input type="checkbox"/> Disorganised management	<input type="checkbox"/> Reactive (remedial actions and review of lessons learnt) only after each landslide event <input type="checkbox"/> No comprehensive analysis
2	Repeatable and Intuitive	<input type="checkbox"/> Similar procedures undertaken for the same task <input type="checkbox"/> No formal training/standardised procedures	<input type="checkbox"/> Some policies outlined <input type="checkbox"/> Heavy reliance on knowledge and ad-hoc judgement of geotechnical professionals

		<input type="checkbox"/> Reliance on individual knowledge <input type="checkbox"/> Errors likely	
3	Defined Process	<input type="checkbox"/> Standardised and documented procedures <input type="checkbox"/> Communication through training <input type="checkbox"/> Mandated processes and minimal chance of deviation <input type="checkbox"/> Non-sophisticated procedures	<input type="checkbox"/> System framework started to be established <input type="checkbox"/> Personnel trained for risk reduction strategies
4	Managed and Measurable	<input type="checkbox"/> Monitor and measure compliance with follow-up actions <input type="checkbox"/> Constant improvement <input type="checkbox"/> Use of automation and tools	<input type="checkbox"/> Able to monitor and measure performance of systems <input type="checkbox"/> Continuous improvement of various elements <input type="checkbox"/> Use of novel technology to assist the work in some aspects
5	Optimised	<input type="checkbox"/> Refined for good practice <input type="checkbox"/> Integrated tools to automate workflow	<input type="checkbox"/> Well-established comprehensive system covering most of the risk reduction areas, from government-led approaches to community-based elements <input type="checkbox"/> Integrated use of innovative technology to increase effectiveness of different aspects <input type="checkbox"/> Achievements reflected in statistics and are measurable

Table 1. COBIT Level of Maturity and its Application to Public Safety Policy (Adapted from ISACA (2018) and Asian Development Bank (2010))

Another comprehensive framework that is noteworthy is the Information Systems for Health Maturity Assessment Tool (IS4H-MM) of the Pan American Health Organization of the World Health Organization (PAHO/WHO) (Figure 1). Areas for development are grouped into strategic domains, namely the Data Management and Information Technologies (DMIT), Management and Governance (MAGO), Knowledge Management and Sharing (KMSH) and Innovation (INNO), respectively. Their components, characteristics, focus and potential assets are transferrable in the context of landslide risks and slope safety. Through maturity assessment against key capability characteristics by means of the tool which is readily available for downloading, an organization may define its own maturity level for each strategic goal, hence the appropriate starting point, goals and roadmaps can be set.

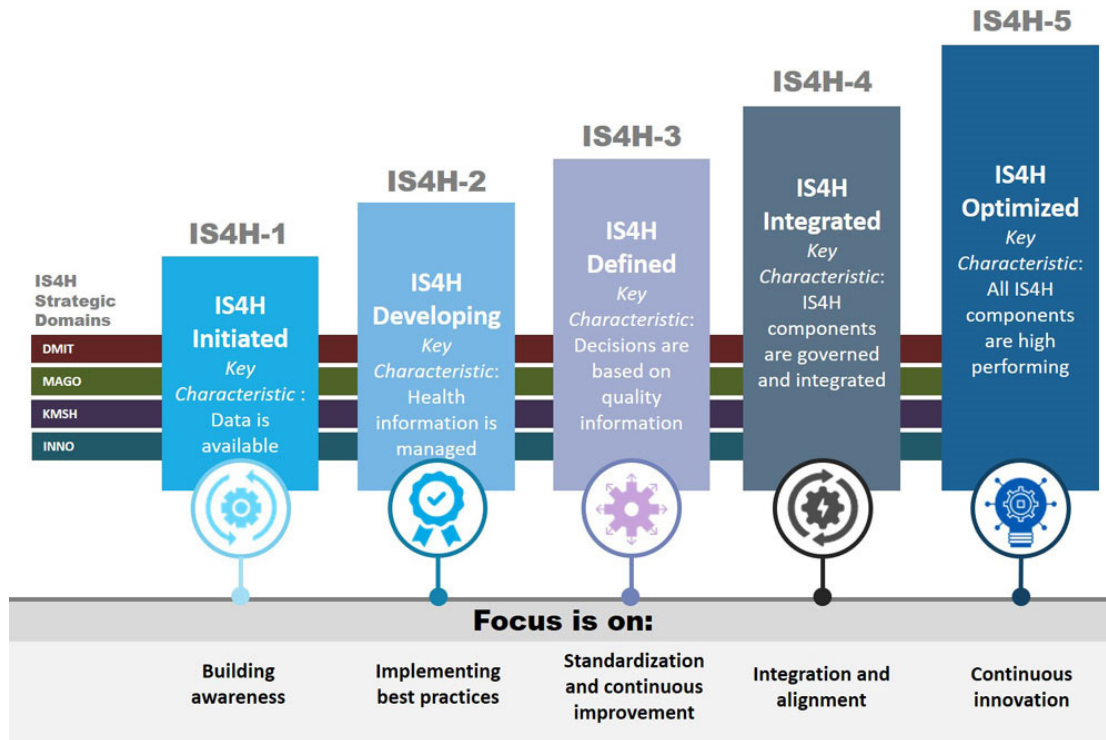


Figure 1. IS4H-MM Framework of the PAHO/WHO (Source: PAHO Website (<https://www3.paho.org/ish/index.php/en/about-mm>))

3.2 Policing Role

3.2.1 Quality public policies

Each country/jurisdiction has its own public policy framework that is compatible with the administration structure, legal system, socio-economic characteristics, etc. The Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) publication “Policy Framework on Sound Public Governance” provides policy-makers with handy guidance and a benchmarking tool for designing and establishing governance in any policy area. It highlights the values (e.g. integrity, transparency, accountability, rule of law, etc.), enablers (e.g. leadership, equitable, evidence-informed, public expectations, resources, etc.), sound policy formulation and implementation (e.g. instruments, quality and coherence of policies, budget decisions, management mechanism, outcome monitoring, etc.), and robust policy evaluation (e.g. level of stakeholders engagement, quality of evaluation, measures to enable realisation of feedback loop and optimisation, etc.). The core considerations, country practices and other miscellaneous resources, including legal instruments and assessment tools, are given, which are particularly useful to policy areas in tackling disaster risks.

There are abundant sources of policy frameworks from various international organisations (e.g. UNSDG objectives), which could be tailored for use. One could also make reference to nation-based documents, such as various Words into Action guidelines (<https://www.undrr.org/words-action-all-guides-series>) and country reports (<https://www.undrr.org/undrr-publication-type/reports>) published on the United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

In qualitative terms, it is important to gauge from time to time as to whether quality and appropriate public policies have been formulated, based on the following metrics:

(i) Defensibility

The time window of opportunity to put forward a new crisis-driven policy is usually very short, taking into account the crisis-shock and time taken to deal with numerous matters during the rescue and remedial phases. It is often very difficult for an all-round decision to be made on a medium-to-long term strategy in a timely manner. As a result, refinement to the direction and implementation approach is likely to materialise sometime after the crisis-driven policy is promulgated.

An alternative to the above is the evolutionary approach. In this case, a much longer time is needed for data collection, analysis, scientific review, policy formulation, political lobbying, etc. Most of the time, the greatest obstacle is to convince the politicians to pass the proposed policy under a 'non-urgent' perception. For any passed laws or measures, the next challenge is to defend the recommendation and prove to the community at large that the money spent would be worthwhile and justified. Miscalculation, near-misses or the like could lead to a socio-political crisis. Any future advocacy might become unprecedentedly difficult. To avoid this, one could take an 'open-book' approach to risk management, i.e. be transparent with the pros and cons and adopting the risk-based advocacy, and to be as rational and scientific to the layman as possible whilst explaining the issues at stake in simple terms.

Back in the mid-2000s, thanks to the insights derived from Quantitative Risk Assessment (QRA), it came to the attention of the Geotechnical Engineering Office of the Hong Kong SAR Government that following city development and under the impact of climate change, natural terrain landslide risk was approaching that of old man-made slopes in terms of their relative risk proportions, the latter of which had been reduced by various measures over the preceding three decades. Preparation work commenced to enhance the slope safety policy to the next level, i.e. a multi-pronged approach to expand risk reduction strategy to include natural terrain. Therefore, when the 2008 severe rainstorm stroke the rural area of Hong Kong (i.e. Lantau Island), the Government was able to react immediately and accelerate the implementation of a matured, rational and defensible plan under the Landslip Prevention and Mitigation Programme.

(ii) Reliability

The most concrete reliability of public safety policy is built on risk-based, data-driven recommendations and risk-informed decisions. While there is intrinsically a certain amount of uncertainties in a risk-based assessment, the importance of acquiring good quality data (i.e. sufficiently comprehensive and accurate) should not be underestimated, since it provides the fundamental basis to estimate the risk level sufficiently reliably. The process of "garbage in, garbage out" must be avoided. The Slope Information System (SIS) in Hong Kong commenced as a compilation of the Old Slope Catalogue in 1977 following the establishment of the Geotechnical Engineering Office, which was later supplemented by "Systematic Identification and Registration of Slopes in the Territory (SIRST) database" and "Systematic Inspection of Features in the Territory (SIFT)" in the 1990's. The SIS was later subsumed into the Geographic Information System (GIS) for data management. During each stage, the mapping and assessment were carried out by professional engineers recording and updating pertinent information and cross-checking against literatures, development records, aerial photographs and topographic maps to ensure data coverage and accuracy.

(iii) Outcome focused

A sound public safety policy has to be outcome-focused. To gauge the effectiveness of the policy implemented over time against resources spent by Government in the promulgation of slope safety and landslide emergency preparedness, there must be an objective means of measurement. The Geotechnical Engineering Office engages an independent organisation to conduct telephone survey every year to interview a random sample of Hong Kong residents about their evaluation of general matters related to slope safety in Hong Kong. For more than two decades, public awareness in terms of regular slope maintenance and private property owners' responsibility remains fairly high (Figure 2). More than two-thirds of the respondents have shown satisfaction towards slope safety conditions and slope appearance in Hong Kong. A great majority of the respondents notice that the Government would issue Landslip Warning through the media during heavy rainfall, and more than half can recite at least one self-help tips when the Landslip Warning is hoisted. These are strong evidences of continued good-performance of the Government's slope retrofitting measures and a successful public education programme.

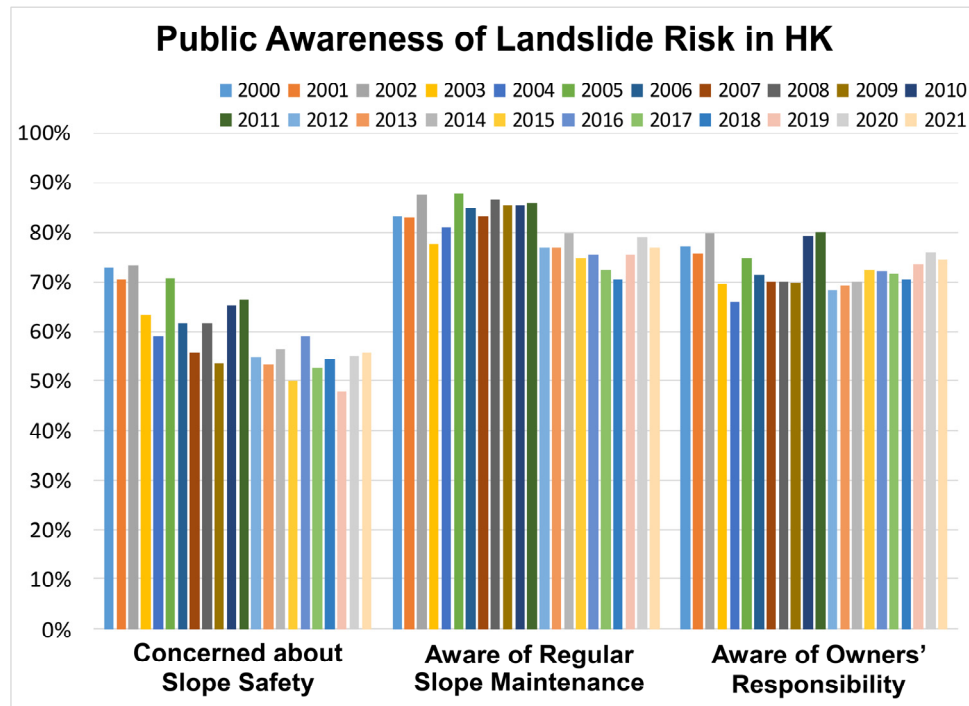


Figure 2. Results of public opinion surveys – some key indicators of public awareness of landslide risk in Hong Kong (CUHK, 2021)

In spite of the promising opinion survey results, it is noteworthy that about 75% of the respondents believe the chance of a landslide in Hong Kong that involve large casualties is small or very small. The lack of major landslide incidents involving casualties in recent years (during which time the rainstorms experienced were not particularly severe as measured by the

'landslide index', has given rise to a sense of complacency among the general public. One of the focus areas of the Hong Kong SAR Government in promoting slope safety is to keep reminding the general public (including the policy-makers and resource allocators within the Government) of the painful lessons in the past, and to promote the need for self-protection and emergency preparedness given the impact of climate change, hoping that they would stay vigilant to the hazards. The problem of complacency is further discussed in Section 3.2.3(i) below.

(iv) People-centric

An effective public safety policy must be people-centric. Collaboration and partnership among professional engineers, academia, experts in inter-related areas such as meteorologists, and the general public are of the essence with a common aim to save lives. It calls for a sense of ownership of the issue. For example, under the legislation and law enforcement framework, the authority and slope owners (or their agents) have to be well-defined and clearly informed of their responsibilities and ambits. Public education is a long-term process requiring a participative environment for immersive learning. It covers top-down pragmatic training to management agencies (adults in the mainstream workforce) and bottom-up message dissemination through teenagers at schools to their parents at home. Identification of suitable platforms and target influencers in the society is an effective multiplier in drawing people's attention to a particular topic.

(v) Holistic

The target of system customisation is to develop governance and best practice that is well-suited to a country's or jurisdiction's legislation as well as socio-economic and political situations. Customisation based on the availability of resources must be done with care and mostly involves prioritisation of the more urgent needs. Modern geotechnology and risk management should be considered and undertaken in a holistic manner. One should always endeavour to avoid discarding totally an aspect within a system with inadequate resources as the sole reason. The multi-pronged approach adopted by the Hong Kong SAR Government in the last few decades encompasses customisation of guidelines, technical development, legislative framework and governance, systematic slope retrofitting and landslide investigation, public education and publicity, international benchmarking of technical guidelines, etc.

3.2.2 Resources

One of the most critical hindrances for implementation of slope safety policies in developing or less-developed countries is limited resources. Apart from convincing policy-makers for prioritisation during internal resources allocation, one may also seek donors' support externally. For instance, the Least Developed Countries Report 2007 (UNCTAD, 2007) suggested collaborative research, technical training and knowledge sharing offered by professional engineering associations, non-government organisations and engineering companies in the developed countries to enhance the technical capabilities at these Least Developed Countries. Public-private partnership is also encouraged. Through this, the developing or less-developed countries would benefit in aspects of technical knowledge including engineering knowledge and public policy strategies, support for education activities, skilled and unskilled volunteers from professional associations and humanitarian relief groups (e.g. Engineers Without Borders, RedR UK, Engineers Against Poverty, iCarE x BAMS projects masterminded by the Institution of Civil Engineers Hong Kong Association, etc.), which will assist these countries in engineering capacity building to a certain extent. Moreover, selected private engineering companies are proactive in providing project-

based support and training as part of their corporate social responsibility (CSR) and company mission (e.g. Wuzhiqiao (Bridge to China) Project). Developing or less-developed countries are strongly encouraged to explore various means (not limited to the above-mentioned ones) to maximise their benefits. Developed countries are also urged to serve as donors or supporters under a humanitarian, sustainable and global village context.

Similar mechanisms may be considered at an inter-state/county/province level.

3.2.3 *Potential pitfalls*

Ho & Cheung (2021) discussed five practical challenges in the implementation of landslide risk management at scale, namely (1) disconnect between policy and practice, (2) human inadequacies or fallacy, (3) weak link between government steer and community-based programme, (4) the importance of system uniqueness and expert benchmarking, and (5) deficiency in risk communication. Each issue would require a paradigm shift of stakeholders' traditional mindset in slope safety to bring about transformation in respect of landslide risk management as a whole.

From the perspective of governance, the following are pertinent:

(i) From inertia to trust, then to complacency

The challenges in explaining a relatively complex technical topic to the vast majority of non-engineering population (layman) would change with the stages of system implementation. Initially, there might be inertia shown by the policy-makers in supporting the allocation of sustained financial resources and the public perception about the importance of ex-ante landslide risk reduction measures. Even where there is strong public outcry after a serious landslide, human memory is usually very short. The pain arising from social and political crisis often would not last long enough to support an overall safety system review cycle. Sections 2.2 and 3.2 of this paper discuss the potential approaches to initiate the spark for the launching of a systematic risk reduction regime.

As system implementation progresses for years and decades, like the situation in Hong Kong, the risk management challenge faced could switch to another angle, i.e. complacency. As shown in the public opinion surveys carried out by a third-party engaged by the Hong Kong SAR Government, more than 75% of the respondents believe that there is only a slim chance of massive fatal landslides to occur in Hong Kong. While this is testament to the success of the sustained slope safety investment and efforts over the years, it is an art to balance continual nurturing of a risk-conscious environment while assuring investors (taxpayers and policymakers) that their investments are paid off by measurable outcomes. The essence is to cultivate a community that is vigilant to exposed risks, especially emerging risks associated with extreme weather scenarios due to climate change and is well-equipped in terms of crisis preparedness and resilience (e.g. engaged in emergency plan development and drills, and collaborate with Government's rescue services in case of need).

(ii) Trademark strategy

The success in the partnership between the government-steered policies and community-based programmes depends very much on public trust, which in turn comes from government's credibility in the subject. The trademark strategy places focus on building a positive image by means of accomplishments and professional character. The accomplishments are data-

supported risk reduction as reflected indirectly by slope failure and landslide fatality rates, and are acknowledged by international peer benchmarking. Positive professional image is related to visibility (which can be enhanced by partnership with the media and local key opinion leaders) and capacity building (professional upskilling). In the long term, it is hoped that a successful trademark strategy could motivate more effective policy implementation and help avoid or minimise a 'blame culture'.

Public distrust would create general political mistrust and discredit spokespersons from the government, hence causing a vicious cycle in regulatory failures, obstacles to policy implementation, suspicious of multiple misconducts such as corruption, revolving doors and conflict of interest. It is imperative to uphold the pillars of integrity, transparency and engagement in order to build or rebuild the trademark. Building of public trust towards the government will also help to maintain the tolerability of landslide risk by the community at a rational and realistic level.

(iii) Changing conditions and risk profiles

To keep pace with the changing conditions and risk profiles, which could be due to slope deterioration with time, urbanisation caused by population increase and impact of climate change and extreme weather events, unregulated human actions with destabilising effects on slopes, etc., the system should incorporate a built-in regular review process. Safety managers will also have to stay vigilant to changing scenarios and their potential effects on the existing practice.

(iv) Managing public and stakeholders expectations

Landslide risk management is not an exact science but involves expert analyses and judgements. It is important for the different parties to understand their own roles and limitations. The safety managers, who are usually professional engineers, should undertake the key responsibility in advising the high-level officials, who are politicians, on ALARP (i.e. risk level that is 'as low as reasonably practicable' in terms of risk tolerability) principles, and not to over-promise, hence managing the expectations of the general public. This is imperative in keeping the society from becoming complacent and avoiding a political crisis intensifying during the post-disaster rescue phase.

4. STRATEGIES FOR SLOPES IN URBAN AND RURAL SETTINGS

4.1 Overview

With respect to the different levels of geotechnical input and human influence, slopes can be classified into man-made slopes (including non-engineered slopes, engineered slopes and special (or high-level) engineered geotechnical structures), quasi-natural terrain and natural terrain (Ho & Cheung, 2021). From a risk management perspective, man-made slopes in the urban setting are usually of the highest safety concern in terms of risk to life and property and deserve engineering measures to achieve the required factor of safety in most cases. Natural terrains are usually located in the rural setting or at urban fringe. Extensive engineering measures might not be cost-effective in terms of risk management. Thus, a mitigation approach or regular monitoring coupled with early warning might be more appropriate. Quasi-natural terrains refer to disturbed terrains or hillside pockets between developed land, which could be located in the urban city or semi-urban zones with human settlements. Preventive, mitigation or monitoring/early warning should be considered on a case-by-case basis.

4.2 Slopes in an Urban Setting

4.2.1 *Characteristics and constraints*

Landslide risk matters only when landslides interact with the built environment. Such interaction is intense in urban areas, where landslide challenges can be particularly severe due to a combination of factors as follows:

- Slope failures in an urban setting could result in serious consequences due to the high concentration of population and vulnerable facilities as well as critical infrastructures.
- Urban development itself, if carried out without adequate geotechnical input, would result in formation of potentially unstable slopes or even trigger landslides, and thereby increase the landslide frequency.
- Given the close proximity of the elements at risk, even relatively small landslides with moderate mobility can cause harm. In addition, due to the need to attend to smaller-sized landslides, predicting and preventing failures would be more difficult.
- Landslide problems may be aggravated by human factors in an urban environment, such as settings that lead to concentrated and uncontrolled surface water flow and localised illegal cutting and filling. In a densely populated city or highly developed community, relocation of existing facilities that are at risk from landslides is often not viable. Provision of landslide prevention and mitigation works can be difficult and costly, given the space, access and private lot boundary constraints.

4.2.2 *Lessons*

The Hong Kong Slope Safety System managed by the Geotechnical Engineering Office has continued to evolve by capturing the lessons learned from its systematic landslide investigation programme and feedback from stakeholders. It is often regarded as a role model in landslide risk management for densely-urbanised cities. For more details, visit the Hong Kong Slope Safety Website: <https://hkss.cedd.gov.hk/hkss/en/home/index.html>.

4.2.3 *Strategies*

In view of the potential severe consequences due to failure of urban slopes, tackling urban landslide problems requires a holistic risk management strategy and system entailing the use of engineering and non-engineering approaches (including policy, legislative, administrative, technical, educational, community-based and emergency-preparedness provisions) (Wong, 2009).

In reality, such a comprehensive system and large amount of work require years to complete. A common question for countries or jurisdictions who find themselves in a less matured level under Section 3.1 is where to start given the abundant number of problematic urban slopes. Appropriate initiatives and measures should be implemented in accordance with a risk-based priority ranking, which provides a scientific basis for selection of deserving slopes to implement enforcement actions or engineering measures in an orderly fashion. The greatest merit of this stepwise approach is to ensure slopes posing the highest risk and deserving more immediate attention to be treated first, which would enable a sharper drop in fatality rate in the course of a systematic risk reduction programme.

The next challenge is to sustain the risk trend, i.e. to keep a decreasing trend until ALARP level is reached. To achieve this, retrofitting old substandard slopes solely will not be sufficient but a holistic risk management approach involving both engineering and non-engineering measures has to be adopted. The objectives and details of various measures implemented by the Geotechnical Engineering Office have already been discussed in many literatures (Cheung, 2021).

4.3 Slopes in a Rural Setting

4.3.1 *Characteristics and constraints*

Human settlements in rural areas or remote villages, particularly in a vast country, pose highly localised and dispersed risks in relation to landslides either from natural terrain or illegal site formations (resulting in substandard man-made slopes).

From a risk management perspective, natural terrain in a rural setting deserves attention only when slope failure is liable to cause damage to human lives and properties. The challenge of tackling natural terrain lies with the prediction of landslide location, scale and characteristics (i.e. debris volume, entrainment and runout distance) so as to assess the potential impact on the community. Low-frequency, large-magnitude landslide hazards could also be a concern, in which case a multi-pronged approach is called for (Ho & Cheung, 2020).

Special engineered structures such as water dams, tailings dams, landfill slopes, etc., despite their usual location in the rural area, are a different story and warrant special and high-level attention. The risk considerations should be at least similar to those of slopes in an urban setting, as the intrinsic risk could be a lot higher than other rural slopes.

4.3.2 *Lessons*

Slopes in a rural setting generally calls for a bottom-up strategy involving a formal community-based approach. This has been implemented at a number of places including Latin America, Taiwan, Mainland China, etc. The corresponding experiences and key observations have been summarised by Ho & Cheung (2020), together with insights on the bottlenecks and limitations that were reported previously.

For a sizeable and well-populated rural village that is located in a vulnerable area (e.g. near the mouth of a major drainage line that could be affected by large-scale debris flows or debris avalanches from the natural terrain in the catchment above upon the impact of a severe rainstorm, the importance of crisis preparedness planning and integrated emergency management (including early warning systems) cannot be over-stated. The wisdom of the indigenous population in this regard should also be tapped as far as possible.

4.3.3 *Strategies*

Due to the scale of potential instability and the far-fetched nature of affected areas, relocation of the settlement away from a vulnerable area may be feasible in certain cases. Otherwise, natural terrain in the rural setting calls for a wider application of the risk mitigation concept than the application of traditional slope engineering practice. In Hong Kong, the recent advances centre on natural terrain hazard study, debris mobility modelling (calibration of impact parameters), debris-barrier interaction, rainfall-landslide correlation, application of quantitative risk assessment (QRA) as well as landslide susceptibility analysis.

The multi-pronged approach against low-frequency, large-magnitude hazards could comprise mitigation measures, real-time monitoring of slope performance as well as early warning and emergency plans in case of alarm.

The strategies for special engineered structures should involve high level input by suitable experts.

4.4 Crisis Management

4.4.1 *Crisis Management Plan*

Risk management of notable hazards, including low-frequency, large-magnitude hazards, relies heavily on a holistic approach which comprises mitigation, monitoring and emergency plans, as well as engineering measures at localised areas where considered appropriate. The emergency plan should be two-fold, one being community-based as in the Latin America's 'Management of Slope Stability in Communities' programme (MOSSAIC) (Anderson & Holcombe, 2006), Taiwan's Integrated Community-based Disaster Management Program (ICBDM) (Chen et al., 2006), Hong Kong's community-based initiatives, etc., and another mainly providing a crisis management protocol for government actions. Figure 3 shows the different stages of a crisis management cycle and the key actions during each stage.

When formulating a crisis management plan involving the entire government, special attention has to be paid to the following areas:

- (i) Compatibility of the response plans of various emergency departments;
- (ii) Protective measures for critical infrastructures (well-defined for identification) by the relevant departments;
- (iii) Information flow between bureaux/departments/offices within the government and public announcements;
- (iv) Procedures for handling reported landslide incidents involving professional expertise of multiple parties;
- (v) Logistics support; and
- (vi) Monitoring and coordination.

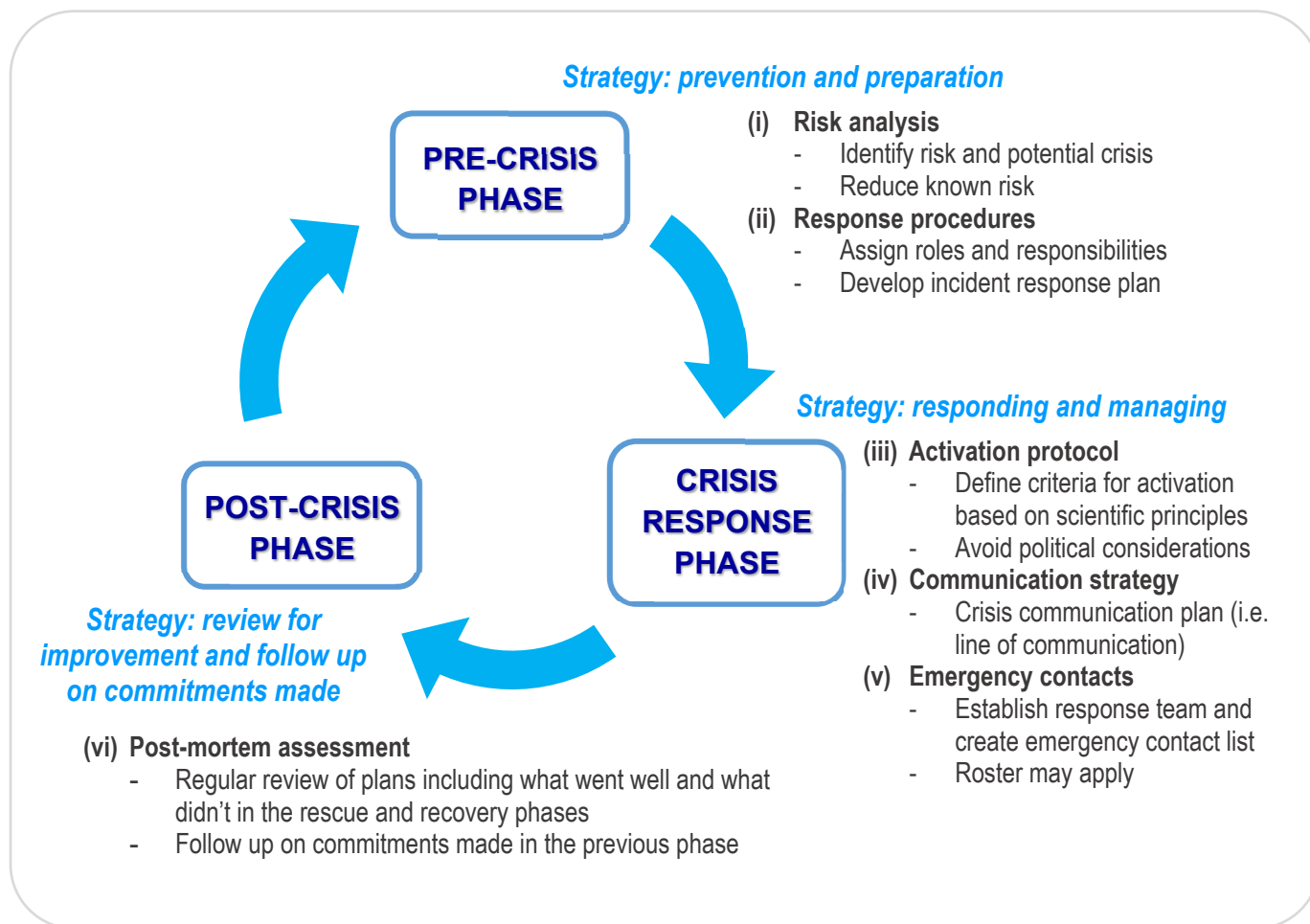


Figure 3. Crisis Management Plan in the context of landslide emergency in Hong Kong

Appropriate information technology should be adopted to minimise manual handling and allow more efficient and accurate sharing of information. For example, the Common Operation Picture (COP) developed by the Hong Kong SAR Government is an electronic Geographic Information System platform containing real-time sharing of emergency incident information (e.g. landslides, flooding, storm surge, major road incidents, etc.) and supporting information (e.g. weather, traffic, mapping data, etc.) in relation to natural disasters. It is accessible on both desktop and mobile devices by the Police, Fire Services Department, Hospital Authority, Hong Kong Observatory, Civil Aid Service, Government Flying Service, Auxiliary Medical Service, Lands Department and various works departments.

4.4.2 Crisis Management Structure

The crisis management structure of an organisation comprises at three levels, namely the strategic level, tactical level and operational level. The strategic level focuses on the long-term interests of the organisation and limits the possible negative ramifications of a crisis situation. The tactical level is responsible for alerting and mobilising. It plans, initiates and monitors all necessary measures. The operational level reduces damage, saves lives and protects assets, and removes the cause of the crisis. Typically, the organisation's response teams will have to work in cooperation with emergency and rescue services. To ensure a clear line of communication, the safety manager is assigned the role of Crisis

Management Controller under whom are the Crisis Investigation Manager, Crisis Manager (together with crisis response teams specific for incidents of different nature), and Crisis Communication Manager.

In Hong Kong, the Geotechnical Engineering Office maintains a 24-hour, year-round service to handle emergency situations of geotechnical nature, mainly involving landslide incidents. The roles and duties of various personnel are clearly delineated, such as the Emergency Manager as the coordinator, while Emergency Duty Officers who carry mobile phones and radio pagers will respond to calls for technical or professional advice from other government departments. In times of envisaged high demands for service, such as when a Landslip Warning and/or tropical cyclone warning signal number 8 or above is in force, the Geotechnical Engineering Office operates the Emergency Control Centre which is manned by an Emergency Team Controller and a team of professional engineers on 8-hour shifts. A training programme is organised for new comers and current staff during the pre-wet season every year to refresh everyone's skills and the latest administration process, as well as to highlight recent technological enhancements.

The progressive development and enhancement of the Hong Kong Landslip Warning System over the years have been discussed in various publications, e.g. Chan et al. (2003), Yu et al. (2004), Wong et al. (2014), Kong et al. (2020), and Cheung et al. (2021).

5. ENHANCING PREPAREDNESS AGAINST IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON SLOPE SAFETY

5.1 Overview

The Joint Technical Committee on Natural Slopes and Landslides (JTC1) coordinated the publication of a book which contains 17 reports on the state-of-the-art on climate modelling and rainfall projections, together with slope safety preparedness for climate change impact in 21 countries (Ho et al., 2017). The landslide hazard will increase in cold areas due to permafrost degradation and snow melting. In more temperate zones, the landslide hazard will depend on the effects of climate change on the precipitation regime, usually in form of shorter-duration but higher-intensity rainfall which corresponds to increase in severe washout. In this connection, areas underlain by coarse-grained soils are susceptible to more frequent occurrence of extreme weather events and the landslide risk is liable to escalate significantly.

The state of preparedness for climate change impact varies considerably across the globe. A cultural shift is needed for enhanced landslide risk management to address climate change related hazards (Picarelli et al., 2021). As an illustration of the range of adaptation and resilience strategy and measures that could be considered for the climate emergency challenge, the multi-pronged approach adopted in Hong Kong is highlighted below.

5.2 Adaptation and Resilience Measures for Climate Change Impact

5.2.1 *Uncertainties*

The assessment of potential impact of climate change on slope safety is fraught with considerable uncertainty, including known unknowns as well as unknown unknowns. There are major uncertainties associated with the behaviour of the hillside under extreme rainfall. The possibility of the landslide hazards adopting new forms (such as more sizeable and mobile debris flow or debris avalanches) cannot be precluded. Lack of experience with the behaviour under extreme rainfall may result in under-estimation of the potential runout zone. It is conceivable that extreme weather events may also trigger

concurrent multiple hazards (e.g. landslides, flash flooding and storm surge), with cascading effects elevating the risk level further.

5.2.2 *Pragmatic measures*

Ho et al. (2021) consolidated the concerted efforts made by the Geotechnical Engineering Office to enhance the slope safety preparedness for extreme weather events associated with climate change. The salient aspects are highlighted below:

- (i) Undertook detailed studies to learning the key technical lessons from a recent record-breaking rainfall event which triggered a large number of mobile landslides on the natural hillsides (e.g. updating the rainfall-landslide density relationship and enhancing the understanding of debris mobility and runout characteristics for different forms of landslides under more severe rainfall, etc.).
- (ii) Conducted scenario-based assessment and stress testing to gauge the probable range of response of the hillside in terms of landslide hazards.
- (iii) Expanded the scope of the systematic slope retrofitting programme to cover natural hillsides which are more prone to the impact of extreme weather events.
- (iv) Expanded the criteria for identifying vulnerable hillsides to include those with the potential for developing mobile debris flows under extreme rainfall (e.g. along major drainage lines).
- (v) Promoting enhanced slope engineering practice (e.g. adopting more robust engineering measures and updating the guidance on the design and detailing of slope drainage with enhanced redundancy).
- (vi) Enhancing the landslide warning system (e.g. the Natural Terrain Landslip Alert was implemented as an added measure to facilitate better emergency preparedness and response under extreme weather events based on the real-time prediction using the rainfall-based landslide susceptibility model).
- (vii) Enhancing emergency preparedness and response (e.g. implemented initiatives to enhance the resilience of the landslide emergency service against any prolonged regional breakdown of communication networks and power grid, together with the use of hand-held laser scanning equipment and unmanned aerial vehicle (UAV) for emergency inspections where access is difficult and unsafe).
- (viii) Adopting a strengthened public education strategy to promote self-protection and neighbourhood support in case of emergency and distributing publicity materials.
- (ix) Adopting a Common Operational Picture (COP) which is an information technology platform with GIS functions for sharing real-time emergency information on different hazards to facilitate decision-making and better coordination of emergency response across different departments.
- (x) Conducting desktop drills with all concerned departments to walk through hypothetical extreme weather events and identify the likely constraints and bottlenecks in respect of emergency management, including the response and recovery phases.
- (xi) Introducing the Smart barrier system to provide instant alerts through a desktop and mobile application when a debris-resisting barrier intercepts landslide debris.
- (xii) Embarking on a programme of systematically dating ancient debris fan deposits to study the potential relationship between landslide activity and climate conditions in the geological past to assist in the consideration of low-frequency, large-magnitude events.
- (xiii) Carrying out vulnerability and risk assessment of landslides affecting critical infrastructures.
- (xiv) Application of innovation and technology in geotechnical practice through collaboration with industry partners and the academia (see also Section 6 below).

6. APPLICATION OF ADVANCED TECHNOLOGIES AND INNOVATIONS

Benefiting from technological advances, there have been significant enhancements to different aspects of landslide risk management over the past decade. COVID-19 pandemic has further provided an opportunity of great leap in the proactive application of digital technology in Hong Kong for virtual site visits, data monitoring and transmission as well as cloud management of site supervision records. A summary of mainstreaming of different advanced technologies and innovations in geotechnical practice is given in Table 2 and Figure 4.

Areas of Development	Advanced Technology / Innovation	Details of Application
Novel Materials	Self-compacting backfill material	<ul style="list-style-type: none"> - Applicable to congested sites in urban area - Reduction of labour and manual handling for fill replacement and compaction at fill slopes, and the waiting time for compaction control test results
	Engineered cementitious composites (ECC)	<ul style="list-style-type: none"> - Allow formation of multiple micro cracks - Self-healing behaviour enhances corrosion protection of soil nails
Automation and Robotics	Automated materials testing systems	<ul style="list-style-type: none"> - Fully computerised testing process for concrete cubes and steel bars - Enhanced efficiency, quality control and occupational safety
	Quadruped mobile robot	<ul style="list-style-type: none"> - Enables site inspection across a wide variety of terrain and site environment, including man-made slopes, landslide sites, disused tunnels, active tunnel construction sites, etc. - Carries with it a hand-held laser scanner, high resolution camera and AI-based camera to capture point cloud data for creation of 3D models to facilitate site reconnaissance and subsequent geotechnical assessment
Digital technology	Building Information Modelling (BIM)	<ul style="list-style-type: none"> - In 7-dimensions including geometry (3D), construction planning (4D), cost estimation (5D), sustainability evaluation (6D) and asset management (7D) - Digital design workflow to enhance design efficiency, buildability and cost effectiveness - Digital automation for slope stability assessment and design of soil nails as upgrading works - Visualisation of construction procedures and final slope appearance from different angles
	Advanced numerical tools	<ul style="list-style-type: none"> - Application of coupled analysis of landslide debris mobility and flexible barrier design using 'LS-DYNA', which can be integrated into a BIM platform - Effective visualisation for public education and project presentation
	Virtual platform for knowledge exchange under COVID-19 pandemic	<ul style="list-style-type: none"> - Online Innotech Forum and virtual site visits that can bring together local and overseas experts and practitioners for knowledge exchange using cutting-edge technologies
	Digital site supervision system	<ul style="list-style-type: none"> - A cloud-based platform to facilitate site inspection record monitoring, processing and retrieval with blockchain technology

	Remote sensing techniques	<ul style="list-style-type: none"> - Adoption of global navigation satellite system (GNSS) for movement monitoring of sensitive structures - Adoption of territory-wide LiDAR survey and site-specific Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry to generate more accurate topographical information to facilitate improved terrain characterisation - Digital rock joint discontinuity mapping
	Internet of Things (IoT)	<ul style="list-style-type: none"> - Novel smart mobile data logger to collect raingauge data and improve data transmission by dual active mobile networks with robustness and redundancy - Data sharing on cloud platform to enhance effective cross-departmental decision-making on issuance and cancellation of landslide warning
	Common Operation Picture (COP)	<ul style="list-style-type: none"> - A cross-departmental cloud platform to facilitate timely information sharing and formulation of effective contingency plan and rescue procedures, particularly when subjected to multiple hazards
	Smart Barrier System	<ul style="list-style-type: none"> - Use of IoT devices installed on debris-resisting barriers to detect the occurrence of landslides by means of all-weather and non-stop real-time monitoring - Provisions of immediate alerts to government officers via mobile applications when the barriers are hit by landslide debris (Reference: GEO Information Note 28/2021)
	GEO Community Messaging System using LoRaWAN technology	<ul style="list-style-type: none"> - Application of the LoRaWAN technology to develop a local community messaging system that provides landslide information and specific messages to local residents potentially threatened by landslide hazards, e.g. in vulnerable villages near natural hillside.
Artificial Intelligence (AI)	Automated identification of natural terrain landslides using aerial photographs and satellite images	<ul style="list-style-type: none"> - Improved turnaround time for updating the natural terrain landslide inventory (viz. a comprehensive database of landslide characteristics and hazards)
	Landslide prediction	<ul style="list-style-type: none"> - Machine learning to handle vast amount of landslide-related data including rainfall and other potential cause factors for estimation of landslide propensity and susceptibility across the territory

Table 2. Applications of advanced technologies and innovations to landslide risk management in Hong Kong (Adapted from Kong et al. (2020) and HKIE Geotechnical Division (2021))

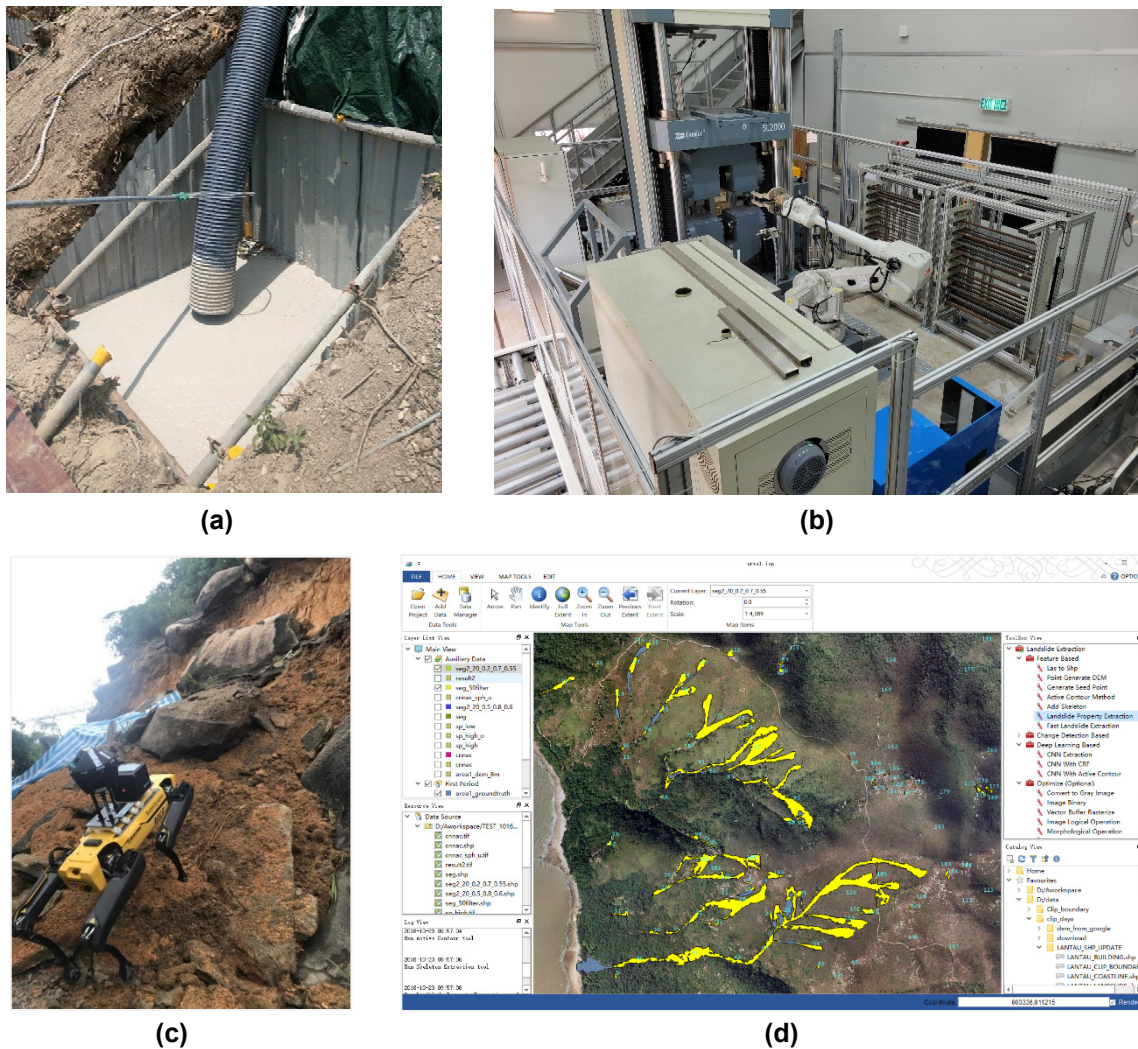


Figure 4. (a) Self-compacting backfill material, (b) automated concrete cube testing system, (c) robotics for landslide inspection and (d) identification of landslides by artificial intelligence

7. MAKING GOOD USE OF INFORMATION IN PUBLIC DOMAIN

Thanks to technology advancement and open data policies of many countries, there are abundant freely available information on the public domain. The Words into Action Guidelines on National Disaster Risk Assessment – Hazard Specific Risk Assessment (UNISDR, 2017) summarises some examples of open databases, which contain some relevant parameters for landslide risk assessment, available from international sources (Table 3). Similar tables are given for other hazards such as flooding and earthquake, which are equally useful particularly for multiple hazard events. The guidelines also provide sources of useful information such as the United States Geological Survey, Hong Kong Slope Safety website, MoSSaiC, etc. The users should be aware of the data source and data resolution in the consideration of the applicability and limitations of the information for specific use.

Description of input data	National entities that most commonly have this data	Examples of open databases available from international sources
Digital elevation model	National mapping and cartography authority	SRTM30 (NASA)
Lithology	National geological survey	UNESCO (CGMW, 2000), One Geology initiative
Vegetation cover	National agriculture/ environment and/or national forest agency	GLC2000 database
Soil moisture factor	National agriculture/ environment and/or national meteorological agency	Climate Prediction Center
Hourly, daily and monthly precipitation	National meteorological agency	Global Precipitation Climatology Centre of the German National Meteorological Service, DWD
Seismicity	National building code(s)	Global Seismic Hazard Program, Global Earthquake Model
Infrastructure and road/railway network in mountainous regions	National road and/or railway authority	Google maps

Table 3. Sources of data for landslide risk assessments at regional and national scale (Source: UNISDR (2017))

Apart from the above, other potentially useful online resources include:

- The Landslide Blog (<https://blogs.agu.org/landslideblog/>) by Professor Dave Petley
- NASA Landslide Team Projects, e.g. Landslide Hazard Assessment for Situational Awareness (LHASA) Model, Global Landslide Model, Global Landslide Susceptibility Map, Global Landslide Catalogue of Cooperative Open Online Landslide Repository, etc. (<https://gpm.nasa.gov/landslides/projects.html>)
- Open LiDAR data from government and non-government organisations, e.g. GEO Open Data for Public Use (<https://www.geomap.cedd.gov.hk/GEOOpenData/eng/Default.aspx>) and Lands Department's Open Data (Geospatial) (<https://www.landsd.gov.hk/en/spatial-data/open-data.html>) of the Hong Kong SAR Government

8. CONCLUDING REMARKS

Globally, the landslide risk is liable to escalate due to population growth, increasing urbanisation, damage of the environment by human activities, and climate change. Holistic landslide risk management, which entails the combined use of engineering and non-engineering measures in a systems approach, is the key. Stakeholders at all levels should be engaged to adopt a participative, multi-disciplinary approach in co-designing risk management measures and enhancing community resilience.

The core of a high-performing team or organisation comprises people, process, technology and data. People take the centre stage and are the drivers of innovations and mastery of solutions to problems. Public safety risk management in an increasingly uncertain world due to climate change is a very challenging and risky business. Continued upskilling of professional competence, mainstreaming the application of innovation and technology, and enhancing collaboration and sharing of experiences and lessons are of the essence.

9. ACKNOWLEDGEMENT

This paper is published with the permission of the Head of Geotechnical Engineering Office and the Director of Civil Engineering and Development, Government of the Hong Kong Special Administrative Region, China.

10. REFERENCES

- Anderson, M.G. & Holcombe, L. (2006). "Sustainable landslide risk reduction in poorer countries". Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering Sustainability, vol. 159, issue ES1, pp 23-30.
- Asian Development Bank (2011). E-Government Capability Maturity Model (online), <https://www.unapcict.org/resources/ictd-infobank/e-government-capability-maturity-model>, 254 p. Project Number: RETA 7351, 2010.
- Balmforth, D. (2020). Troddbrook Reservoir Independent Review Report (online), https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/872769/toddbrook-reservoir-independent-review-reporta.pdf, 89 p. Accessed 24 October 2022.
- Chan, R.K.S., Pang, P.L.R. & Pun, W.K. (2003). "Recent developments in the Landslip Warning System in Hong Kong". In: Ho, K.K.S. & Li, K.S.(editors) Proceedings of the Fourteenth Southeast Asian Geotechnical Conference - Geotechnical Engineering Meeting Society's Needs, Southeast Asian Geotechnical Society, Hong Kong, vol. 3, pp 219-224
- Chen, L.C., Liu, Y.C. & Chan, K.C. (2006). "Integrated community-based disaster management program in Taiwan: A case study of Shang-An Village". Natural Hazards, vol. 37, pp 209-223.
- Cheung, R.W.M. (2021). "Landslide risk management in Hong Kong". Landslides, vol. 18, pp 3457-3473.
- Cheung, R.W.M., Chu, E.K.H., Law, R.H.C., and Chung, W.K. (2021). Keynote abstract: Recent Development of the Hong Kong Landslip Warning System, EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10647, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10647>, 2021.
- CUHK (2021). Public Opinion Survey on GEO's Slope Safety Work and Landslide Preparedness Campaign 2021, Telephone Survey Research Laboratory, The Hong Kong Institute of Asia-Pacific Studies, The Chinese University of Hong Kong.
- GEO (2021). Information Note 24/2021: Reducing Landslide Risks to Squatters, Hong Kong.
- GEO (2021). Information Note 28/2021: Smart Barrier System, Hong Kong.
- GEO and HKIE Geotechnical Division (2011). Design of soil nails for upgrading loose fill slopes. Geotechnical Engineering Office and Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong.
- Government Office for Science (2013). Engaging with Academics: How to Further Strengthen Open Policy Making (online), https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/283129/13-581-engaging-with-academics-open-policy-making.pdf, 32p. Assessed 24 October 2022.
- HKIE Geotechnical Division (2021). "When innovation and technology meeting geotechnical engineering". Hong Kong Engineer, Journal of The Hong Kong Institution of Engineers, vol. 49, pp 7-13.

- Ho, K.K.S. & Cheung, C. (2020). "Human fingerprints in landslides – the importance of strategic landslide risk management" (keynote paper). In: Cabrera, M.A., Prada-Sarmiento, L.F. & Montero, J. (editors) Proceedings of the SCG-XIII International Symposium on Landslides, Cartagena, Colombia.
- Ho, K.K.S. & Lau, J.W.C. (2010). "Learning from slope failure to enhance landslide risk management". Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, vol. 43, pp 33-68.
- Ho, K.K.S., Lacasse, S. & Picarelli, L. (2017). Slope Safety Preparedness for Impact of Climate Change. Taylor & Francis Group, CRC Press, 571p.
- Ho, K.K.S., Lau, T.M.F. & Lau, J.W.C. (2009). "Forensic landslide investigations in Hong Kong – reflections on the past 40 years". Proceedings of the Institution of Civil Engineers, vol. 142, pp 44-51.
- Ho, K.K.S., Sun, H.W., Lam, E.J., Lo, F.L.C. (2021). "Enhancing Preparedness against Impact of Climate Change on Slope Safety in Hong Kong." In: Vilímek, V., Wang, F., Strom, A., Sassa, K., Bobrowsky, P.T. & Takara, K. (editors) Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk, Proceedings of Fifth World Landslide Forum 2020, Osaka, Japan.
- ISACA (2018). COBIT 2019 Framework: Governance and Management Objectives, USA.
- Kong, V.W.W., Kwan, J.S.H. & Pun, W.K. (2020). "Hong Kong's landslip warning system—40 years of progress". Landslides, vol. 17, pp 1453–1463.
- Malone, A.W. (1999). "Slope safety systems for Asian cities". Proceedings of the Second International Conference on Landslides, Slope Stability and the Safety of Infrastructures, Singapore.
- Morgenstern, N.R. (2018). "Geotechnical risk, regulation, and public policy". Soils and Rocks, Sao Paulo, vol. 41(2), pp 107-129.
- Noveck, B.S., Harvey R. & Dinesh, A. (2019). The Open Policymaking Playbook (online), <https://www.thegovlab.org/static/files/publications/openpolicymaking-april29.pdf>, 57 p. Accessed 24 October 2022.
- OECD (n.d.). Policy Framework on Sound Public Governance (online), <https://www.oecd.org/governance/policy-framework-on-sound-public-governance/>. Accessed 26 July 2022.
- PAHO (n.d.). Information System for Health (online), <https://www3.paho.org/ish/index.php/en/about-mm>. Accessed 26 July 2022.
- Picarelli, L., Lacasse, S., Ho, K.K.S. (2021). "The Impact of Climate Change on Landslide Hazard and Risk." In: Sassa, K., Mikoš, M., Sassa, S., Bobrowsky, P.T., Takara, K. & Dang, K. (editors) Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk, Proceedings of Fifth World Landslide Forum 2020, Osaka, Japan.
- Robertson, P.K., de Melo, L., Williams, D.J. & Wilson, G.W. (2019). Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijao Dam I, <https://bdrb1investigationstacc.z15.web.core.windows.net/assets/Feijao-Dam-I-Expert-Panel-Report-ENG.pdf>, 81 p.
- UNCTD (2007). The Least Developed Countries Report 2007 – Knowledge, Technological Learning and Innovation for Development (online), https://unctad.org/system/files/official-document/ldc2007_en.pdf https://unctad.org/system/files/official-document/ldc2007_en.pdf. Accessed 26 July 2022.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2015). "Sendai framework for disaster risk reduction".
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2017). "Words into Action Guidelines – National Disaster Risk Assessment – Hazard Specific Risk Assessment".
- Wong, A.C.W. & Ting, S.M. & Shiu, Y.K. & Ho, K.K.S. (2014). "Latest developments of Hong Kong's landslip warning system". Proceedings of the Third World Landslide Forum, vol. 2, pp 613-618.
- Wong, H.N. & Ho, K.K.S. (2006). "Landslide risk management and slope engineering in Hong Kong". Proceedings of the Seminar on the State-of-the-Practice of Geotechnical Engineering in Taiwan and Hong Kong, Hong Kong, pp 101-141.
- Wong, H.N. (2005). "Landslide risk assessment for individual facilities". In: Hungr., O., Fell, R., Couture, R. & Eberhardt, E. (editors) Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, Canada, pp 237-296.

- Wong, H.N. (2009). *“Holistic urban landslide risk management – challenges and practice”*. Proceedings of Seventh Asian Regional Conference of the International Association of Engineering Geology and the Environment, Chengdu, China.
- Yu, Y.F., Lam, J.S., Siu, C.K. & Pun, W.K. (2004). *“Recent advance in Landslip Warning System”*. Proceedings of the HKIE Geotechnical Division Annual Seminar 2004, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, pp 139-147.

3.1 Geotecnia Ambiental

Simulación de los efectos de condiciones extraordinarias por el fenómeno de El Niño en la sedimentación y consolidación de relaves mineros de baja densidad

Christ Jesus Barriga Paria^{1*}, Eleonardo Lucas Pereira²

¹Universidad Nacional de Moquegua, Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, Perú

²Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia, Brasil

RESUMEN: Para conocer el comportamiento en condiciones extraordinarias y con el uso de coagulante en el proceso de disposición de relaves fosfatados, fue fundamental realizar este estudio para predecir un modelo de disposición final consistente. En la metodología, las pruebas replicaron las situaciones extremas que se presentan en estos años ante la presencia del fenómeno El Niño. Por lo tanto, las pruebas de sedimentación se llevaron a cabo en una columna con seis contenidos de sólidos diferentes. Para ampliar la investigación, se utilizaron seis concentraciones de coagulante para optimizar la sedimentación. Trabajamos con relaves colocados en horno de secado a la temperatura del área de estudio, el cual presentó una velocidad de sedimentación superior a la de condiciones normales, además de mejorar mucho más con el uso de coagulante. El conocimiento del comportamiento fisicoquímico de los relaves finos es una herramienta fundamental para garantizar una mejor gestión de las obras de contención.

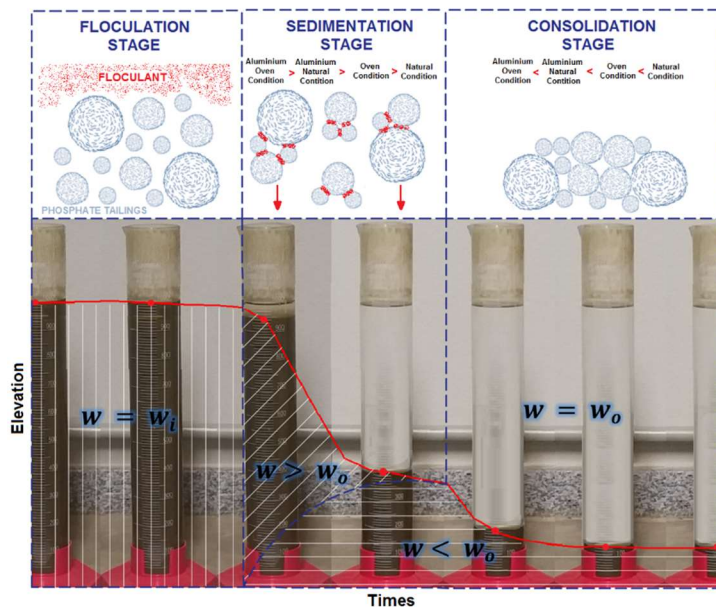


Figura 1. Etapas de la sedimentación de acuerdo con [1] con las etapas de Floculación, Sedimentación propiamente y la etapa final de consolidación.

* Correspondencia: cbarrigap@unam.edu.pe

El local de estudio fue en el Centro Tecnológico de Geotecnia Aplicada (CTGA) del Centro de Geotecnia de la Escola de Minas (NUGEO) en Brasil fue donde se realizaron los ensayos necesarios para este estudio. Las muestras que provienen del país del norte del Perú, oriundas de roca sedimentaria marina dan origen a los relaves del proceso de beneficio y además de agua salada constituye la pulpa arrojada a los tanques de almacenamiento y el sistema de muestreo se realizó directamente desde el sistema de descarga. Así, se buscó conservar el contenido inicial de sólidos del material en un promedio de 15 y 16%. Posteriormente se realizaron pruebas de columna de sedimentación con material en condiciones naturales y los relaves se secaron en estufa de laboratorio.

Se pudo inferir que el coagulante fue más efectivo en condiciones en las que los relaves se secaron en estufa que en condiciones naturales para el proceso de sedimentación, pero al aumentar el contenido de sólidos, esta ventaja se pierde sutilmente hasta alcanzar valores similares a los de sus competidores. El coagulante alcanzó una velocidad máxima de 0.75 cm/min a una concentración de 80 ppm y un contenido de sólidos de 8.5% en condiciones de secado al horno y en condiciones naturales solo pudo llegar a 0.40 cm/min y a una concentración de 60 ppm con el mismo contenido de sólidos. En la mayoría de los casos, los mejores resultados son para concentraciones que oscilan entre 60 y 80 ppm.

Referencias

- [1] IMAI. G.; (1981). Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay minerals. Soil and Foundations. v. 21. n. 1. pp. 7-20.

Análisis de vulnerabilidad a la licuación estática de presas de relaves

Alejo O. Sfriso^{1,2*}, Mauro G. Sottile², Diego Cobos³

¹ Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad de Buenos Aires, Argentina

² SRK Consulting (Argentina), Argentina

³ SRK Consulting (Colombia), Colombia

Los relaves son una harina de roca producida durante el proceso de extracción de minerales. Son almacenados en presas que, cuando son construidas con la técnica “aguas-arriba”, dependen de la resistencia al corte de los propios relaves para garantizar su estabilidad. Los relaves son materiales muy complejos. Desde el punto de vista mecánico, pueden asimilarse a limos no plásticos, sueltos y saturados, con una resistencia al corte no drenado que es generalmente inferior a la resistencia al corte drenado, y que está frecuentemente acompañada por un fuerte ablandamiento por deformación que, en los casos extremos, conduce a la licuación estática de los relaves. Además, en función de su mineralogía, granulometría y técnica de deposición, los relaves almacenados pueden quedar en condiciones muy variables, con intercalaciones de capas de material fino y grueso, muy suelto y más denso, capas saturadas y no saturadas, o incluso materiales que desarrollan una cementación incipiente. Por todo esto, las condiciones reales de una presa de relaves pueden ser enormemente diferentes a sus hipótesis de diseño, y el análisis de la presa, entendida como sistema de materiales, geometría e historia de construcción, entraña una gran cantidad de incertidumbres.

La resiliencia de una presa puede entenderse como su capacidad para resistir acciones adversas, como por ejemplo variaciones significativas del nivel freático, deformaciones en el pie de la presa, o sismos. Una presa de relaves resiliente, sometida a estas acciones, tiene un comportamiento estable, deformaciones pequeñas, y no derrama relaves. Por el contrario, una presa vulnerable puede derramar relaves aún para acciones adversas de magnitud moderada. La vulnerabilidad de una presa -como sistema- se estudia mediante modelos numéricos en los que se reproduce su historia de construcción y se establece su estado actual con una precisión razonable, en condiciones drenadas. A partir de este estado actual, se impone un comportamiento no drenado, se aplican “perturbaciones al equilibrio” y se analiza si estas perturbaciones pueden desencadenar una falla progresiva [1,2,3,4]. Típicamente, estas perturbaciones se eligen para desencadenen la falla desde la cresta (carga en superficie), desde el pie (deformación de la fundación) y desde el interior de la presa (licuación espontánea de relaves o cambios en el nivel freático) (Figura 1).

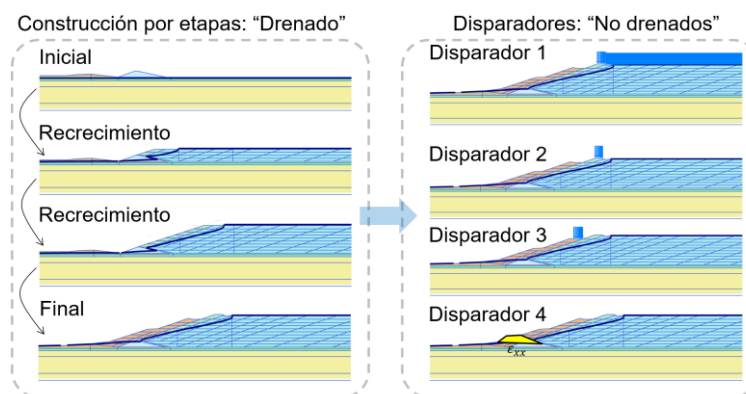


Figura 1. Secuencia de análisis de disparadores de licuación estática.

* Correspondencia: asfriso@srk.com.ar

El procedimiento requiere modelos constitutivos que permitan la simulación del ablandamiento por deformación de los relaves en corte no drenado, lo que típicamente está asociado a modelos de estado crítico en los que el ángulo de fricción interna ϕ' evoluciona con la tensión efectiva σ' y la relación de vacíos e , como se discute en [5]. Sin embargo, en corte no drenado, la relación de vacíos no cambia ($\dot{e} \equiv 0$). Matemáticamente

$$\phi'[\sigma', e] \rightarrow \phi_{cv} \Rightarrow \dot{\phi}' = \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma'} : \dot{\sigma}' + \frac{\partial \phi'}{\partial e} \dot{e} \Rightarrow \dot{\phi}' = \frac{\partial \phi'}{\partial \sigma'} : \dot{\sigma}'$$

Por otra parte, en corte no drenado la deformación volumétrica total es siempre nula ($\dot{\epsilon}_v \equiv 0$) por lo que la generación de presiones de poro queda determinada por la evolución de sus componentes elástica ϵ_v^e y plástica ϵ_v^p . Matemáticamente

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^e + \dot{\epsilon}_v^p \equiv 0 \Rightarrow \dot{\epsilon}_v^e = -\dot{\epsilon}_v^p$$

En esta comunicación se muestra el procedimiento de calibración de HSS, disponible en Plaxis [6], para una dada resistencia al corte normalizado máxima $s_u^{peak} / \sigma'_{v0}$ y residual s_u^{res} / σ'_{v0} [2,4]. Para ello se explica el ajuste progresivo de sus parámetros materiales: $\dot{\epsilon}_v^e = f[E_{ur}^{ref}, \nu]$ y $\dot{\epsilon}_v^p = f[E_{50}^{ref}, R_f]$. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.

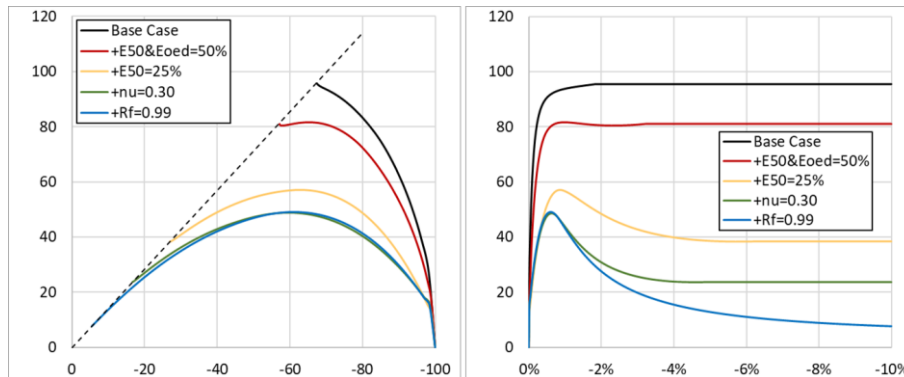


Figura 2. Ejemplo de calibración de HSS para corte no drenado con ablandamiento por deformación.

Referencias

- [1] Ledesma O, Sfriso A, Manzanal D (2022). Procedure for assessing the liquefaction vulnerability of tailings dams. Computers and Geotechnics, doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.104632.
- [2] Sottile M, Cueto I, Sfriso A (2020). A simplified procedure to numerically evaluate triggering of static liquefaction in upstream-raised tailings storage facilities. XX COBRAMSEG, Campinas, Brasil.
- [3] Sottile M, Labanda N, Kerguelén A, Cueto I, Sfriso A (2021). Stability assessment of a tailings storage facility using a non-local constitutive model accounting for anisotropic strain softening. IACMAG 2020-2022.
- [4] Sottile M, Cueto I, Sfriso A, Ledesma O, Lizcano A (2022). Flow liquefaction triggering analyses of a tailings storage facility by means of a simplified numerical procedure. XX ICSMGE, Sydney, Australia.
- [5] Ledesma O, Manzanal D, Sfriso A (2021). Formulation and numerical implementation of a state parameter-based generalized plasticity model for mine tailings. Computers and Geotechnics, doi 10.1016/j.compgeo.2021.104158.
- [6] Brinkgreve R, Kumarswamy S, Swolfs W, Engin E, Fonseca F, Ragi N, Zampich L, Zalamea N (2020). Plaxis Connect Edition V20.03 Manuals by Bentley Systems.

3.2 Amenazas y Riesgos geotécnicos: evaluación, análisis y mitigación

Evaluación de Riesgo Físico por Movimientos en Masa en el casco urbano del Municipio de Villarrica–Tolima, a escala 1:2.000

Gloria Lucia Ruiz Peña^{1*}, Sofía Navarro Alarcón^{1*}, Leonardo Méndez Barón^{1*}, Andrés Reyes Merchán^{1*}

* Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Colombia

En el municipio de Villarrica (Tolima) se han documentado importantes procesos de inestabilidad desde el año 1947, los cuales han afectado notablemente el casco urbano, de tal manera que en el año 2014 se presentó el colapso del techo del colegio y el daño estructural del hospital, debido a movimientos del terreno. Con el fin de apoyar al municipio en su toma de decisiones, el Servicio Geológico Colombiano realizó el Estudio para la Evaluación de Riesgo Físico por Movimientos en Masa en el casco urbano del Municipio de Villarrica – Tolima, a escala 1:2.000 [1], aplicando la Guía Metodológica para la Elaboración de Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa a escala detallada (SGC & UNAL, 2016) [2] en un área de 110, 3 ha, correspondiendo al casco urbano del municipio. Igualmente se realizó la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:10.000 de un área rural de 3662 Ha aledañas al casco urbano.

La metodología empleada para evaluar la amenaza a escala 1:2.000 consideró los siguientes aspectos: análisis de los factores detonantes -unidades de geología para ingeniería (UGI), elementos geomorfológicos, inventario de procesos morfodinámicos, cobertura de la tierra y uso del suelo - exploración geotécnica directa e indirecta, complementada con campañas de monitoreo geotécnico con el objetivo de obtener los datos de deformación del terreno y niveles piezométricos, adicionalmente se realizaron ensayos de laboratorio. Con el fin de determinar el origen, residencia del agua en el subsuelo, y definir posibles líneas de flujo subsuperficiales, se realizaron análisis fisicoquímicos, estableciendo dos orígenes para las aguas, aguas de infiltración y aguas servidas.

Para la definición del modelo geológico geotécnico, se tuvieron en cuenta el mapa de UGI, los resultados de la exploración geotécnica directa e indirecta, los resultados de los ensayos de laboratorio y la base de datos de información geotécnica secundaria recopilada. Según la interpretación de líneas sísmicas, se establecieron los siguientes rasgos geológicos estructurales que controlan el área de estudio: Sinclinal de Cabrera al oriente, Sinclinal de Prado al occidente, en el sector central un sistema anticlinorio erosionado influenciado por fallas de cabalgamiento hacia los flancos y fallas normales (ocasionalmente reactivadas), denominado anticlinorio de Villarrica. Así mismo el municipio de Villarrica se encuentra afectado por tres fallas de cabalgamiento pertenecientes al sistema de fallas Altamisal: Falla Las Delicias, Falla Villarrica y Falla Cuindefeo, que presentan rumbo SW-NE predominante, con saltos de falla aproximados de 58,5 m, 63 m y 36,5 metros e inclinaciones de planos de falla de 78°, 63° y 60° respectivamente, afectando la secuencia cretácica del Grupo Villeta.

Para conocer la posición y variaciones del nivel piezométrico, así como las tasas, dirección y velocidad de los movimientos del terreno, como en la caracterización de la amenaza, se instalaron cinco (5) inclinómetros y cinco (5) piezómetros, Durante el período comprendido entre el 16 de agosto y el 25 de octubre de 2016, realizando siete (7) campañas de lectura inclinométrica y piezométrica. Se estimaron las velocidades máximas de desplazamiento típicas del terreno a partir de las lecturas de los inclinómetros, se determinó para la ventana de observación y para cada profundidad de medición, el vector de mayor magnitud entre los vectores incrementales y el vector resultante. Los resultados para

* gruiz@sgc.gov.co; snavarro@sgc.gov.co; lmendez@sgc.gov.co; areyes@sgc.gov.co

este período de tiempo del monitoreo inclinométrico (71 días) fueron entre 2,6 mm y 6,0 mm, que corresponden a velocidades máximas de movimiento observadas de $3,7 \times 10^{-2}$ mm/día a $8,5 \times 10^{-2}$ mm/día. Las velocidades de movimiento anuales estimadas (velocidades típicas) están aproximadamente entre 13 mm/año y 31 mm/año, encontrándose en el rango de velocidades extremadamente lenta a muy lenta.

Para determinar la cabeza de presión o la posición del nivel freático del agua subsuperficial y sus variaciones en el tiempo, se tomaron siete (7) lecturas en los 5 piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande instalados. En general, los niveles piezométricos registran cabeza de presión sobre la superficie del terreno, los cuales se pudieron asociar con sistemas de drenaje central regulado por la quebrada Botadero, río Cuindécito, así como en la zona de morfología cóncava cercana al Ancianato. Los niveles de agua más bajos y con poca variabilidad, fueron registrados en las zonas de morfología convexa y relativamente más alta.

A partir de los insumos descritos se construyó el modelo geológico geotécnico, insumo necesario para el cálculo, zonificación y caracterización de la amenaza, mediante el cálculo de probabilidades de falla, a fin de obtener la intensidad de los eventos, para nueve diferentes escenarios de agua y sismo.

Para la evaluación de la vulnerabilidad, se realizó el levantamiento de información de los elementos expuestos en el municipio (edificaciones, vías, acueducto, alcantarillado y redes de energía eléctrica), evaluando entre otros aspectos, las principales características constructivas y los daños presentes, con el fin de obtener la fragilidad de los elementos expuestos y personas. Con base en este cálculo de fragilidad y la intensidad de los movimientos en masa se obtuvo la zonificación de la vulnerabilidad.

Con los resultados de amenaza y vulnerabilidad, teniendo en cuenta la valoración económica de los elementos expuestos según su valor presente en pesos y para personas usando el indicador de número de personas por predio, se calculó el riesgo y se propusieron algunas medidas de mitigación para las zonas de riesgo alto, que permitió analizar diferentes escenarios costo/beneficio y la toma de decisiones.

Como resultado de los estudios y del proceso de apropiación social de los mismos, la Alcaldía municipal de Villarrica, apoyada por la Gobernación del Tolima, definieron la necesidad de reubicar el casco urbano. Se seleccionó el sector ubicado al noroccidente del actual casco urbano, en donde se presentan zonas de amenaza baja por movimientos en masa, según los resultados de los estudios a escala 1:10.000 y con el apoyo del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo, se empezó el proceso de compra de predios para la construcción de las primeras 106 viviendas para reubicar a los afectados del sector de la quebrada El Botadero, dando inicio al denominado “Nuevo Villarrica”[3].

Referencias

- [1] Servicio Geológico Colombiano (12017). Estudio para la evaluación de riesgo físico por movimientos en masa en el casco urbano a escala 1:2.000 y la zonificación de amenaza por movimientos en masa de parte de la zona rural a escala 1:10.000 en el municipio de Villarrica – Tolima. Bogotá D.C
- [2] Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia. (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos En Masa Escala Detallada. Bogotá.
- [3] <https://www.tolima.gov.co/noticias/2627-avanza-proyecto-de-reubicacion-de-las-primeras-106>

Desarrollo computacional para la evaluación espacial de desplazamientos permanentes debidos a eventos sísmicos

Exneyder A. Montoya-Araque^{1*}, Silvana Montoya-Noguera¹, Fernando López-Caballero²

¹ Grupo de investigación en Mecánica Aplicada, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia

² Laboratoire de mécanique Paris-Saclay, Université Paris-Saclay, Francia

Tradicionalmente, el análisis de estabilidad de taludes ante condiciones dinámicas por eventos sísmicos se efectúa mediante una de las siguientes aproximaciones: análisis pseudoestático mediante el método de equilibrio límite, análisis de desplazamientos permanentes basados en el método del bloque deslizante de Newmark [1], y análisis esfuerzo-deformación mediante métodos numéricos como el de los elementos finitos.

El presente trabajo se enfocó en el método del bloque deslizante de Newmark [1] para el cálculo de desplazamientos permanentes (también conocidos como desplazamientos de Newmark) en zonas de ladera sometidas a eventos sísmicos. El método consiste en modelar el talud como un bloque de rigidez infinita sobre un plano inclinado; este bloque se desliza cuando durante el evento sísmico, se alcanza una aceleración crítica o de fluencia (a_y), en la cual la fuerza de inercia supera la resistencia friccionante en la base del bloque. El valor de a_y normalmente se expresa como una fracción de la aceleración de la gravedad mediante el denominado coeficiente de aceleración crítico (k_y) tal que $a_y = k_y g$. Debido a que las aceleraciones de un mismo sismo en función del tiempo, $a_{\text{eqk}}(t)$, no siempre son mayores a a_y , los desplazamientos permanentes se calculan mediante la doble integral de la aceleración en exceso $a_{\text{exc}}(t) = a_{\text{eqk}}(t) - a_y$, considerando la disipación de la inercial del bloque cada vez que $a_{\text{exc}}(t) = 0$, es decir, considerando que el bloque no detiene su movimiento abruptamente cada vez que $a_{\text{eqk}}(t) \leq a_y$.

El cálculo de desplazamientos de Newmark puede extenderse a la dimensión espacial y eventualmente tornarse en un criterio para la definición de zonas de susceptibilidad y/o amenaza por deslizamientos detonados por sismos, tal y como ya ha sido implementado históricamente [2]. Para lo anterior, el terreno y sus características se pueden representar como arreglos matriciales en formato ráster donde cada celda correspondería a un bloque de Newmark al cual se le calcularían los desplazamientos permanentes.

SLAMMER [3] es un software que permite realizar análisis rigurosos de Newmark basados en registros sísmicos ingresados por el usuario o análisis simplificados a partir de correlaciones empíricas a partir de parámetros de intensidad sísmica, sin embargo el alcance del programa no es espacial. De hecho, aparentemente no se tienen herramientas computacionales a la fecha que permitan realizar este tipo de análisis a nivel espacial a pesar de que esta aproximación ya ha sido implementada recientemente para tanto para el análisis riguroso (e.g., [4]) o por para el simplificado (e.g., [5]). Debido a la necesidad de contar con una herramienta que permita extender el método de Newmark a nivel espacial, el presente trabajo tuvo por objetivo el desarrollo del software de aplicación *pyNewmarkDisp*, para la implementación del método de Newmark para el cálculo de desplazamientos permanentes de forma espacial. Además, se presenta la implementación del programa a un caso de estudio en el Valle de Aburrá (Antioquia). La Fig. 1 muestra una salida gráfica típica de *pyNewmarkDisp*, en la cual se aprecia el procedimiento de doble integración de $a_{\text{exc}}(t)$ para una celda individual en dentro de cierta zona de estudio delimitada espacialmente.

* Correspondencia: eamontoyaa@eafit.edu.co

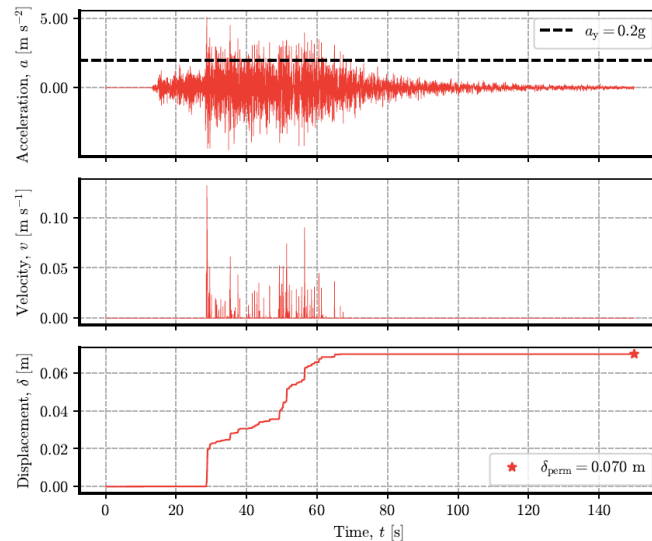


Figura 1. Salida gráfica típica del método clásico del bloque deslizante de Newmark para cálculo de desplazamientos permanentes obtenida con *pyNewmarkDisp*.

Dependiendo de las características del computador donde se ejecute el análisis, la dimensión del área de estudio, la resolución espacial de los archivos ráster y el intervalo de tiempo entre cada lectura de un acelerograma ingresado, el cálculo espacial de desplazamientos de Newmark puede resultar costoso computacionalmente. Es por lo anterior, que *pyNewmarkDisp* fue optimizado a nivel algorítmico mediante la implementación de operaciones entre elementos vectoriales evitando la iteración exhaustiva sobre elementos flotantes, y con esto compensar parcialmente la demanda de recursos requeridos en la escala espacial, especialmente cuando se ingresan acelerogramas con lecturas en intervalos de tiempo muy cortos. Por otro lado, también es posible realizar análisis rápidos de estimación de desplazamientos de Newmark mediante correlaciones en función de parámetros de intensidad sísmica (e.g., aceleración pico), no obstante, estos se deben considerar como análisis preliminares, ya que dichas propuestas no necesariamente son extensibles a cualquier caso generalizado.

La disponibilidad de aplicaciones como *pyNewmarkDisp* permiten que el planteamiento de metodologías de zonificación de amenaza por deslizamientos detonados por sismos no se restrinja simplemente a la cuantificación de un factor de seguridad para el caso pseudoestático, sino que también incluya la respuesta sísmica de las laderas en términos de los desplazamientos permanentes asociados.

Referencias

- [1] N. M. Newmark, "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments," *Geotechnique*, vol. 15, no. 2, pp. 139–160, Jun. 1965, doi: 10.1680/geot.1965.15.2.139.
- [2] G. F. Wieczorek, R. C. Wilson, and E. L. Harp, "Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo County, California," 1985. doi: 10.3133/i1257E.
- [3] R. W. Jibson, E. M. Rathje, M. W. Jibson, and Y. W. Lee, "SLAMMER—Seismic Landslide Movement Modeled using Earthquake Records." U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 12, chap. B1, unpagued, 2013, [Online]. Available: <https://pubs.usgs.gov/tm/12b1/>.
- [4] J. C. Guerra Ospino, "Propuesta para la evaluación de amenaza por movimientos en masa inducidos por sismo," Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [5] E. V. Aristizábal Giraldo, F. J. Gómez Cardona, E. F. García Aristizábal, and J. C. Guzmán Martínez, "Análisis de la amenaza por movimientos en masa detonados por sismo en los Andes colombianos, caso de estudio: Barbosa (Antioquia)," *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 30, no. 2, pp. 31–47, Dec. 2020, doi: 10.18359/rcin.4304.

Análisis, verificación y ajuste de umbrales de peligro Geotécnico a partir del monitoreo con radares IBIS en el Cerrejón

Bustos Rafael^{1*}, Sánchez Ciro¹, Quintana Nicolás¹, Torres Juan¹, León Telly¹

¹ Geotecnia, Cerrejón, Colombia

El presente documento tiene como finalidad evaluar y ajustar los umbrales de peligro utilizados para determinar las condiciones de estabilidad de los taludes correspondientes a los tajos de la mina el Cerrejón mediante el análisis de los movimientos identificados a partir de imágenes de radar por escaneo interferómetro (IBIS por sus siglas en inglés).

Para el análisis de la información obtenida se realizará la organización, tabulación e interpretación de los datos de cada deslizamiento; esto permite generar e identificar el comportamiento de cada evento como punto de partida para realizar el retro-análisis de los datos evaluados durante un periodo de 48 horas antes de la fecha del evento geotécnico [1]. A partir de esta información se realiza una valoración estadística con el fin de poder identificar los desplazamientos/velocidades máximas, mínimas y su frecuencia de ocurrencia relacionado con niveles de alarma 2, 3 y 4 para cada movimiento [2], permitiendo identificar si en las últimas 2 horas de seguimiento se materializó el evento a velocidad constante o si presentó picos de aceleración antes de fallar (ver Tabla 1, Umbrales geotécnicos).

Nivel de alarma	Riesgo geotécnico	Acción
1	Bajo	Equipos pueden transitar y operar con seguridad
2	Medio - Preventivo	Equipos pueden transitar y operar con seguridad
3	Alto - Precaución	Se deben implementar controles y barreras para el tránsito de personal y la operación de equipos
4	Crítico - Alerta	Se debe evacuar el área, cerrar con barreras duras y señalar la condición de riesgo

Tabla 1. Umbrales geotécnicos.

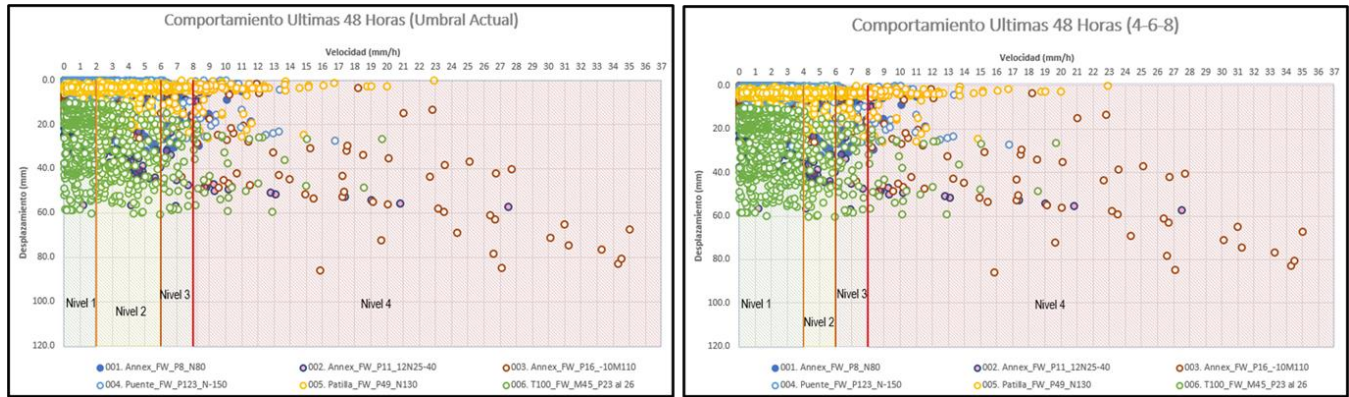
El objetivo principal del presente trabajo es validar y/o modificar los umbrales de peligro implementados en la mina Cerrejón con el fin de optimizar el monitoreo de las condiciones de estabilidad de los taludes presentes en los tajos, reduciendo así el número de falsas alarmas y/o alarmas procedentes de la operación minera. Como metodología de investigación se realiza el planteamiento del problema, el cual consiste en disminuir el número de alarmas operativas y validar los umbrales de monitoreo actualmente establecidos para analizar y prever eventos geotécnicos cuyas tasas de velocidad y desplazamiento indiquen una condición de riesgo geotécnico definido en el plan de respuesta ante emergencias (TARP, por sus siglas en inglés). Para realizar esta investigación es necesario recopilar la información histórica de los deslizamientos que se han presentado durante los años 2021 y 2022 en todos los tajos de la mina, para conciliar la información y finalmente evaluar las alarmas generadas bajo diferentes configuraciones de umbrales en una ventana de tiempo de hasta 48 horas antes de materializarse el evento.

Los resultados del retro-análisis permiten concluir que las fallas geotécnicas en paredes altas (Taludes de mayor inclinación en una excavación minera) se generan con deformaciones y velocidades menores que los eventos de falla de las paredes bajas (Taludes de menor inclinación en una excavación minera).

* Correspondencia: rafael.bustos@cerrejon.com

Posterior a la identificación de las velocidades máximas registradas para cada evento, se realizó un comparativo de las alarmas generadas con los umbrales actuales y los umbrales propuestos, determinando de esta manera una reducción de las alarmas Nivel 2 en un 59% en las paredes bajas y 14% entre alarmas Nivel 2 y Nivel 3 en paredes altas (ver Fig. 1). Lo anterior permite la identificación temprana de movimientos geotécnicos con potencial impacto a la operación.

Figura 1. Resultados del retro-análisis



Con base en los resultados obtenidos del retro-análisis, se recomienda implementar los siguientes umbrales asociados a los diferentes niveles de alarma (ver Tabla 2)

Nivel de alarma	Riesgo geotécnico	Configuración actual Pared alta (mm/h)	Configuración sugerida Pared alta (mm/h)	Configuración actual Pared baja (mm/h)	Configuración sugerida Pared baja (mm/h)
1	Bajo	-	-	-	-
2	Medio	2	3	2	4
3	Alto	4	5	6	6
4	Crítico	6	6	8	8

Tabla 2. Niveles de alarmas y riesgo geotécnico.

A partir de los resultados obtenidos, se determina que, al aumentar el valor de los umbrales de riesgo para el monitoreo de las paredes de los tajos del Cerrejón, se optimiza la predicción de nuevos eventos y se disminuyen en un 14% para pared alta y 59% para la pared baja el número de falsas alarmas o alarmas operativas, permitiendo desarrollar estrategias de detección temprana de deslizamientos, mitigando los posibles impactos negativos generados en la operación por dichos eventos geotécnicos y mejorando los tiempos de respuesta en el personal de campo al momento de materializarse.

La validación de los umbrales sugeridos se realizará mediante un proyecto en paralelo evaluando los valores actuales y los propuestos a partir de las alarmas generadas y su relación con la aparición de posibles eventos, determinando de esta manera la eficiencia en la predicción de estos últimos.

Referencias

- [1] Sharon., & Eberhardt,E. (2020). *Slope Performance Monitoring*. Taylo & Fracis Group.
- [2] Saunders P., & Nicoll S., (2016). *Slope Stability Radar Alarm Threshold Validation at Telfer Gold Mine*.

Rainfall Thresholds for Shallow Landslides using Distribute Physically-Based Model: TRIGRS in some Colombian Andes Catchments

Ricardo Jaramillo-González^{1*}, Edier Aristizábal¹, Edwin García² Roberto J. Marín²

¹ Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Colombia

² Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Universidad de Antioquia, Colombia

Landslides generate economical losses and human fatalities worldwide, and especially in mountainous and tropical countries, such as Colombia. According to Geohazards database (www.geohazards.com.co), 10.438 landslides have been registered in the Colombian Andean between 1921-2020, with almost 7.313 fatalities. The Colombian Andean region exhibits a complex tropical hydrometeorological dynamic affected by different temporal and spatial scale climate processes (Figure 1). It is composed of a diverse geological and geomorphological setting characterized by high steep slopes and morphogenic conditions that are predisposed to gravitational hillslope processes. Most of the Colombian population is established in the Andean region occupying large hilly areas without adequate planning control representing a risk condition that in recent years has encouraged the development of forecast models like Rainfall Thresholds and more complex and complement tools like Early Warning Systems (EWS).

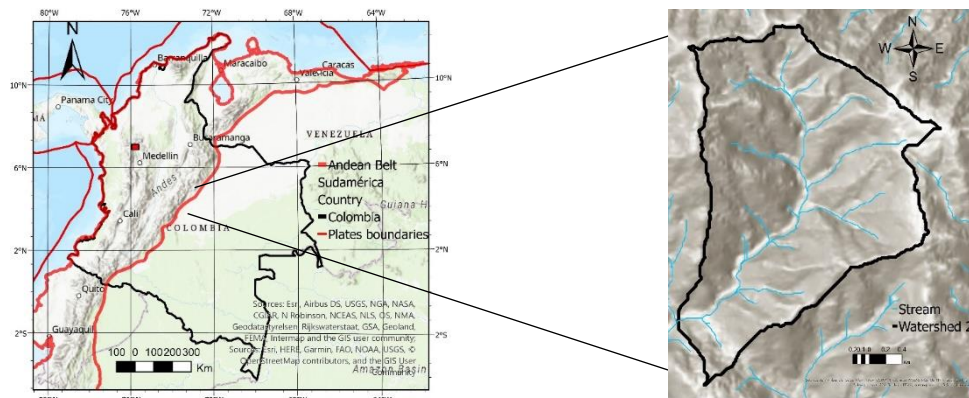


Figure 1. Catchment within the Andean Colombian Region

Physically-based rainfall thresholds consider the spatial distribution or location of the landslides by approaches grounded on physical laws that consider the occurrence of landslides by calculating the static or distributed safety factor which is based on the physical relationship between the resistance forces of the soil and the hydraulic-dynamic forces associated to rain instability effects, taking into account the effects of rainfall coupling hydrological and geotechnical models. This dynamic nature of subsurface hydrology depends on the complex interactions among precipitation inputs, physical properties and heterogeneity of soils, bedrock, local geomorphology, and vegetation and associated biomass. These factors influence the timing of landslides with respect to precipitation inputs and antecedent soil moisture, the mass type and failure mode, providing a wide understanding of the physical behavior of the rainfall throw the hillslope and associated infiltration processes leading to have a spatial and timing distribution

* Correspondencia: rijaramillog@unal.edu.co

of the phenomenon. On the other side, by defining physically-based thresholds may be incorporate rainfall information with high-coarse spatial-temporal resolution data as ground-based radar rainfall, satellite precipitation estimates such as Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and the consolidate database from the satellite constellation GPM-IMERG and gauge-based measurements of rainfall such as IDF curves that defines the empirical relationship between intensity and duration-frequency rain data providing data which allows setting up different return periods (eg. IDEAM, NOAA).

This research propose an approach where the definition of the rainfall thresholds integrates IDF gauge-based rainfall data and the physically-based model (TRIGRS) [1,2,3] to calculate the cumulative density function from the histogram of the distributed safety factor within a basin, providing a better comprehension of the response to heavy rainfall events in a catchment scale in tropical mountainous terrains where actual climate change effects impulses the develop of novels tools that can complement Early Warning Systems (EWS) (Figure 2).

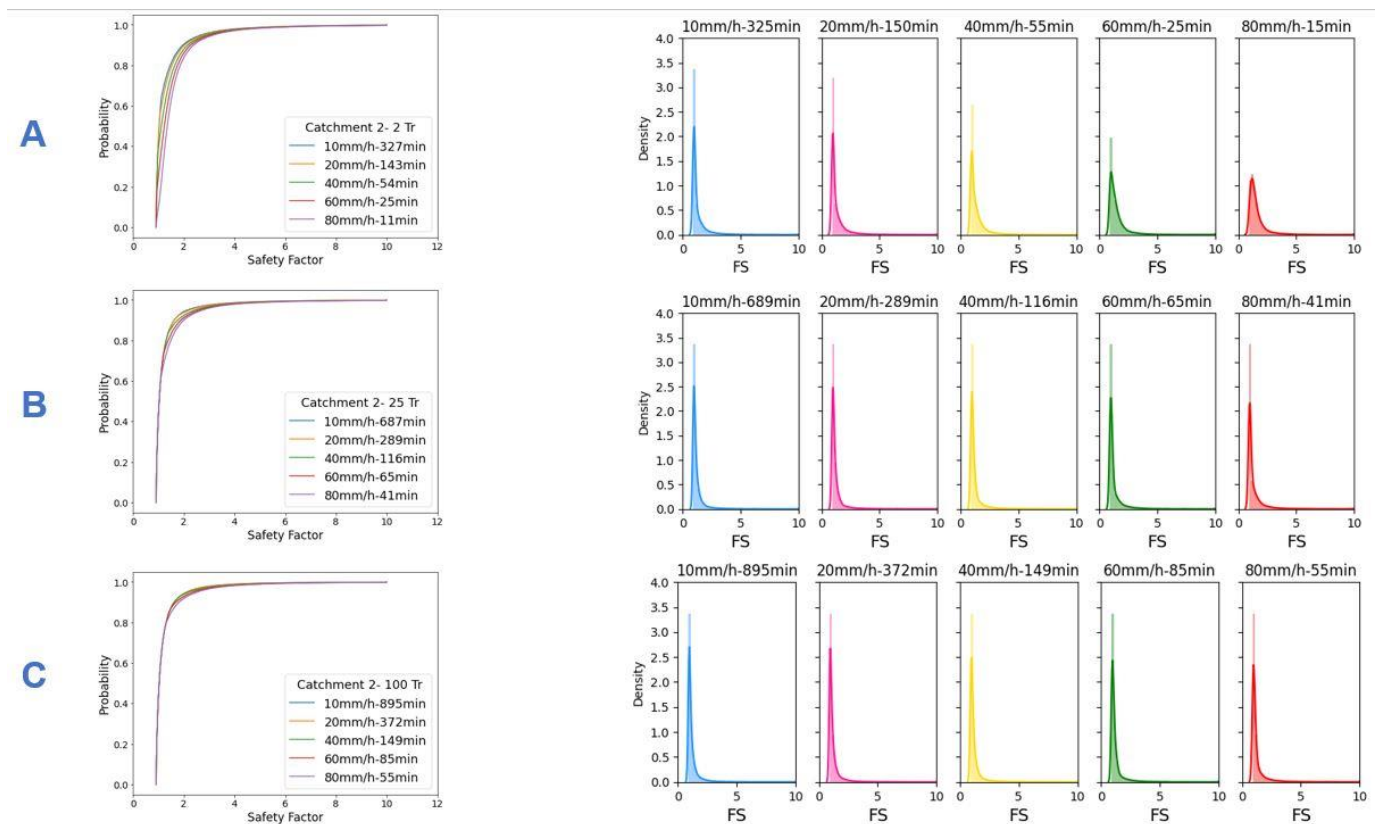


Figure 2. Cumulative Density Function CDF Curves and Histograms of the distributed Safety Factor in Basin A for 2 years of return (Tr2), 25 years of return (Tr25), 100 years of return (C).

References

- [1] Baum, R.L., Godt, J.W., y Savage, W.Z. (2010). Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *Journal of Geophysical Research*, (115), 1-26.
- [2] Marin, R.J., Garcia, E., Aristizabal, E. (2019). Rainfall thresholds for shallow landslides based on physical models: application in a sub-basin of the Valle de Aburrá (Colombia). *DYNA*, (86), 312-322.
- [3] Marin, R.J., Velázquez, M.F. (2020). Influence of hydraulic properties on physically modelling slope stability and the definition of rainfall thresholds for shallow landslides. *Geomorphology*, (351), 106976.

Estudios para la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial

Gloria Lucia Ruiz Peña^{1*}, Leonardo Méndez Barón^{1*}, Sofía Navarro Alarcón^{1*}

¹ Dirección de Geoamenazas, Servicio Geológico Colombiano, Colombia

Con el objetivo de apoyar la toma de decisiones en los procesos de planeación y reordenamiento del territorio en diferentes municipios del territorio Colombiano, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en Convenio con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), realizaron los estudios básicos en ocho municipios priorizados y estudios detallados a nivel de riesgo en dos municipios priorizados (ver Tabla 1), de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1077 de 2015, que define para la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación territorial considerando el principio de gradualidad considerado en la Ley 1523 de 2012 en suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, avenidas torrenciales y movimientos en masa. Por su parte el SGC, aportó los estudios de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000 de los 22 municipios priorizados en el marco del proyecto Actualización del mapa nacional de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000, para un total de 24 informes temáticos y 973 mapas temáticos (ver Tabla 2).

No.	Departamento	Municipio
1	Cauca	La Sierra
2	Cauca	Rosas
3	Cauca	Sotará Paispamba
4	Cauca	Villa Rica
5	Valle del Cauca	Cali
6	Valle del Cauca	Candelaria
7	Valle del Cauca	Yumbo
8	Valle del Cauca	Jamundí
9	Vichada	Puerto Carreño
10	Risaralda	Pereira

Tabla 1. Municipios priorizados

	Municipio	Informes	Mapas	
			Temáticos	Compilados
Bloque 1	Cajibío	1	56	7
	La sierra	1	35	7
	Piendamó	1	35	7
	Sotará	1	49	7
Bloque 2	Bochalema	1	21	7
	Durania	1	21	7
	Herrán	1	14	7
	Lourdes	1	14	7
	Santiago	1	21	7
	Salazar las Palmas	1	49	7
Bloque 3	Chiscas	1	56	7
	Cubará	1	91	7
	Toledo	1	112	7
Bloque 4	Bituima	1	14	7
	Chaguani	1	28	7
	Guaduas	1	77	7
	Guayabal de Síquima	1	14	7
	La Peña	1	14	7
	Quebradanegra	1	14	7
	Nimaima	1	14	7
	Nocaima	1	14	7
	Útica	1	14	7
	Viani	1	14	7
	Villeta	1	14	7
	Total		24	805

Tabla 2. Relación de los productos aportados por el SGC

* Correspondencia: gruiz@sgc.gov.co; lmendez@sgc.gov.co; snavarro@sgc.gov.co;

En el marco del Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: “Pacto por Colombia, pacto por la equidad” (Departamento nacional de planeación, 2019), el MVCT propuso dentro de sus metas, el acompañamiento técnico y/o financiero a 150 municipios para la actualización de sus planes de ordenamiento territorial, lo cual incluyó el apoyo y acompañamiento en la ejecución a los entes territoriales en la elaboración y entrega de estudios básicos para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales, según las condiciones físicas propias del territorio para la incorporación de la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial, de acuerdo con lo dispuesto en el Decreto 1077 de 2015.

Para que se lograra tal fin, el MVCT en conjunto con el SGC, aunaron esfuerzos técnicos, financieros y administrativos por medio del convenio interadministrativo, con el fin de ampliar el conocimiento geocientífico en diferentes eventos amenazantes en los municipios priorizados.

Para adelantar los estudios de los 10 municipios priorizados se suscribieron convenios especiales de cooperación, con las universidades del Valle, Cauca y Javeriana, se obtuvieron un total de 1441 mapas temáticos y 30 informes. Para los 30 municipios en donde se realizaron los estudios básicos, se obtuvieron igualmente las zonas con condición de riesgo y zonas con condición de amenaza, de tal manera que los municipios pudieran continuar con el proceso de actualización de los planes de ordenamiento territorial.

Las metodologías empleadas para los estudios de movimientos en masa escala 1:5.000 para zonas urbanas, 1:25.000 para zonas rurales y avenidas torrenciales a escala 1:2.000 se enmarcan en las guías metodológicas desarrolladas por el SGC en los últimos años (SGC & UN, 2016) [1], (SGC, 2017) [2] y (SGC-PUJ, 2021) [3]. Para el caso de las inundaciones, se partió de la guía metodológica del IDEAM (IDEAM, 2017) [4], la cual se adaptó a la información existente y generada en el marco de los diferentes estudios. Igualmente, para los estudios detallados a nivel de riesgo, se aplicó la guía (SGC & UN, 2016) para todos los estudios se aplicó la metodología de apropiación social del conocimiento que aplica el grupo de trabajo Evaluación de amenaza por movimientos en masa del SGC.

Con estos resultados, las entidades participantes en el convenio, en representación del Gobierno Nacional, esperan que los municipios logren de manera satisfactoria iniciar y finalizar sus procesos de revisión y ajuste de los planes de ordenamiento territorial, considerando que, tal y como lo establece el Decreto 1077 de 2015, solo procederá la revisión y ajuste cuando se incorpore la variable de amenaza y riesgo, fundamentales para lograr a corto, mediano y largo plazo municipios menos vulnerables ante los fenómenos recurrentes en sus territorios.

Referencias

- [1] Servicio Geológico Colombiano; Universidad Nacional de Colombia. (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo Por Movimientos En Masa Escala Detallada. Bogotá.
- [2] Servicio Geológico Colombiano; (2017). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza, Por Movimientos en Masa a Escala 1:25.000. Bogotá.
- [3] Ramos, A.; Reyes, A.; Munévar, M.; Ruiz, G.; Machuca, S.; Rangel, M.; Prada-Sarmiento, L.F.; Cabrera, M.; Rodríguez, C.; Escobar, N.; Quintero, C.; Escobar, J.; Giraldo, J.; Medina, M.; Durán, L.; Trujillo, D.; Medina, D.; Capachero, C.; León, D.; ... Pérez, M. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales. (Servicio Geológico Colombiano, & Pontificia Universidad Javeriana) Bogotá: Servicio Geológico Colombiano. doi:<https://doi.org/10.32685/9789585313156>
- [4] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2017). Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación. Bogotá D.C.

Evaluación de la influencia de la morfometría en la distancia de viaje de movimientos en masa en la región andina nororiental de Colombia

José David Ortiz Contreras¹, Daniel Camilo Román Quintero², Mauricio Alberto Tapias Camacho^{3*}, Helmer Cordero Rebolledo⁴, Gustavo Chio Cho⁵, Gloria Ruiz Peña⁶

^{1,2,3} Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Colombia

^{4,5} Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia

⁶ Servicio Geológico Colombiano, Dirección de Geoamenazas, Colombia

Los deslizamientos se conocen como eventos geológicos en los que una parte de la masa que conforma un talud pierde su equilibrio estático e inicia el movimiento debido a determinadas causas asociadas al medio en el que se encuentra el talud o ladera y al material que la compone. En estudios de escala regional (o de cuenca) de movimientos en masa es importante recopilar información sobre los procesos históricos que ocurren en el campo. Por ejemplo, información correspondiente al lugar y la hora de ocurrencia, las características geológicas-geomorfológicas, de uso y cobertura del suelo del sitio afectado por el proceso, caracterización morfométrica, causas del movimiento, caracterización del movimiento, sus efectos sobre las personas y la infraestructura, son de interés tanto científico como aplicado en la mitigación de riesgos y prevención de éste tipo de desastres. El Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas [1] establece los conceptos básicos sobre los que se sustenta el método de inventario de deslizamientos para el registro de la información anteriormente mencionada.

Este estudio se concentra en la aplicabilidad de la información morfométrica registrada a partir del proceso de medición e inventario de una muestra de 50 movimientos en masa, en una región de estudio correspondiente a la región andina nororiental de Colombia en el polígono con coordenadas definidas entre 7°00'00"N - 7°23'00"N y 73°24'00"W-72 °48'0"O (departamentos de Santander y Norte de Santander), la cual presenta movimientos en masa en locaciones con coberturas y usos como: caminos, viviendas, cultivos, fincas, minas, reservas forestales, áreas recreativas, zonas industriales y otros. Los resultados de esta investigación se enmarcan dentro del proyecto de investigación "*Método para la estimación de distancias de viaje de movimientos en masa con base en aproximaciones geométricas*" financiado por MinCiencias (Convocatoria 852 de 2019).

Los ambientes geomorfológicos y de origen del material geológico predominantemente involucrado en los eventos registrados, evidencian que existe un predominio de los ambientes estructural y denudacional, entre los cuales se encuentran diversas configuraciones geomorfológicas como Espolones, Sierras, Cerros, Escarpes y Lomos en diferentes disposiciones. Por otro lado, los materiales involucrados muestran una gran variedad tanto de origen como de composición en los eventos registrados. Materiales de origen ígneo del Mesozoico-Jurásico, y metamórficos de baja intensidad se encuentran en la parte norte del área de estudio, pasando por materiales de origen sedimentario terrígeno y sedimentos de origen químico en el centro de la región de estudio, hasta rocas sedimentarias más jóvenes como las de la formación Guadalupe y Chipaque en el sur de la región de estudio [2]. Sobre la muestra de estudio se realizan levantamientos fotogramétricos utilizando técnicas con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) sobre el conjunto de movimientos en masa seleccionados, como una herramienta confiable para mapear de manera rápida grandes superficies de tierra con aplicación en

* Correspondencia: matapiasc@unal.edu.co

estudios a escala de cuenca aplicados al reconocimiento y medición de deslizamientos [3] y en estudios de riesgos geológicos, como el registro de deslizamientos de tierra [4].

Con el objetivo de analizar la influencia de la morfometría de los movimientos en masa con la distancia de viaje de los mismos, se correlacionan dos variables morfométricas; el volumen de la masa desplazada y su respectiva área planimétrica (ambas estimadas a partir de las mediciones con base en fotogrametría de: el ancho, la longitud y la profundidad de la masa desplazada) con las distancias horizontal y vertical recorridas por cada movimiento en masa (L y H respectivamente), por medio de la relación entre ambas H/L, conocida como el inverso de la eficiencia del movimiento [5].

La correlación en ambos casos (área y volumen) se evalúa tanto gráficamente por medio de rectas de ajuste y de elipses construidas con el 90% de confianza, como analíticamente por medio de análisis estadísticos sobre la pendiente de las líneas de tendencia para cada caso, bajo la hipótesis que establece que la pendiente es igual a cero. El análisis de la información muestra que, para el caso de los movimientos muestreados en la región andina nororiental de Colombia, por una parte existe una relación directa entre el volumen de la masa desplazada en movimientos en masa tipo flujo y deslizamiento y su distancia de viaje, tal como se ha establecido en otros estudios para diversas partes del mundo [6]–[8], pero además también muestra que el área planimétrica recogida por la superficie de falla es una variable igualmente susceptible que puede ser utilizada como elemento diferencial para el establecimiento de relaciones empíricas para zonas de estudio específicas afectadas por deslizamientos superficiales (típicamente detonados por lluvias) como los aquí estudiados.

Referencias

- [1] GEMMA, “Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las comunidades andinas,” *Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas*, vol. 4. pp. 1–431, 2007.
- [2] H. González Iregui, J. P. Rincón, J. Duque Pineda, and L. Tolosa Fernández, “PLANCHA 122-CHUCARIMA,” Medellín, Jun. 2015.
- [3] J. Walstra, J. H. Chandler, N. Dixon, and T. A. Dijkstra, “Aerial photography and digital photogrammetry for landslide monitoring,” *Geological Society, London, Special Publications*, vol. 283, no. 1, pp. 53–63, Jan. 2007, doi: 10.1144/SP283.5.
- [4] T. Peternel, Š. Kumelj, K. Oštir, and M. Komac, “Monitoring the Potoška planina landslide (NW Slovenia) using UAV photogrammetry and tachymetric measurements,” *Landslides* 2016 14:1, vol. 14, no. 1, pp. 395–406, Oct. 2016, doi: 10.1007/S10346-016-0759-6.
- [5] R. M. Iverson, “The physics of debris flows,” *Reviews of Geophysics*, vol. 35, no. 3, pp. 245–296, 1997, doi: 10.1029/97RG00426.
- [6] J. Corominas, “The angle of reach as a mobility index for small and large landslides,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, pp. 260–271, 1996.
- [7] O. Hungr, J. Corominas, and E. Eberhardt, “Estimating landslide motion mechanism, travel distance and velocity,” in *Landslide risk management*, 2005, pp. 99–128.
- [8] G. Hunter and R. Fell, “Travel distance angle for ‘rapid’ landslides in constructed and natural soil slopes,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, no. 6, pp. 1123–1141, 2003, doi: 10.1139/t03-061.

Aplicación del enfoque sistémico en la selección de obras de mitigación ante flujo de detritos

Weimar García-Melo^{1*}, Carlos Román Reina-Leal¹, Camilo Jiménez-Linares¹,
Manuel García-López¹

¹ Ingeniería y Geotecnia S.A.S, Colombia

Los flujos de detritos son procesos de remoción en masa con velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas, que afectan materiales no plásticos saturados en la parte alta de las cuencas hidrográficas y que transcurren principalmente confinados a lo largo de un canal o un cauce con pendiente pronunciada [1]. El material transportado se deposita formando conos o abanicos en zonas de la ladera de menor pendiente. Estos flujos son el resultado de una serie de pulsos, separados por flujos de creciente que alcanzan velocidades en el rango de 1.0 m/s a 1.2 km/min, lo cual los hace muy peligrosos [2].

Una visión complementaria de estos procesos, basada en la concepción de que nuestro planeta es un supersistema dinámico complejo, conformado por múltiples elementos o sistemas, los cuales interactúan entre sí y evolucionan logrando un equilibrio inestable¹ o metaestable², ayuda en el estudio y entendimiento de los procesos geomorfológicos que se desarrollan en la actualidad. Este supersistema está compuesto por sistemas, los cuales a su vez están conformados por subsistemas más pequeños y simples; todos estos elementos funcionan a escalas diferentes e interactúan entre sí para producir un todo complejo [4], el cual no se puede explicar como la suma de las partes [5]. Las cuencas hidrográficas que producen flujos de detritos pueden estudiarse como un sistema abierto, en el cual existen entradas y salidas de materia, energía e información. Este sistema natural funciona gracias a fuentes de energía (luz solar y gravedad) que desplazan la materia o la energía de un lugar a otro [4].

En este artículo se muestra un caso de estudio en el cual se realizó un análisis sistémico conceptual de la cuenca hidrográfica de la quebrada Estaquecá, afectada por flujo de detritos y avenidas torrenciales, con el fin de identificar los factores principales que afectan la respuesta geomorfológica y valorar la influencia de obras de mitigación. La cuenca se localiza en terrenos montañosos de la vertiente oriental de la cordillera oriental colombiana y recoge las aguas de la quebrada Las Lajas y varios afluentes menores hasta desembocar en el río Negro.

En la cuenca se registra una precipitación total promedio multianual de 2352 mm, con valores mensuales promedio entre 40.9 mm (enero) y 360.8 mm (julio). Se evidencia que el régimen de lluvias es monomodal, con periodos altos entre junio y agosto. La temperatura máxima promedio multianual es de 24 °C y la mínima promedio es de 14 °C. La quebrada se encuentra sobre las filitas y cuarcitas de Guayabetal, afectadas por la falla de Quetame la cual tiene una dirección predominante Norte-Sur, con una bifurcación en sentido SW-NE. La cuenca tiene un área de drenaje aproximada de 12 km², y la

¹ **Equilibrio inestable:** tendencia de la variable a responder a la perturbación del sistema mediante el ajuste a un nuevo valor [3].

² **Equilibrio metaestable:** una combinación de equilibrio estable e inestable, excepto que la variable se asienta en un nuevo valor solo después de haber cruzado algún valor umbral; de lo contrario, vuelve al valor original [3].

* Correspondencia: wgarciam@ingenieriaygeotecnia.com

quebrada principal tiene una longitud total de 6 km y una pendiente media del cauce de alrededor del 31 % con un alineamiento casi recto controlado por una falla de cabalgamiento [6].

El sistema en estudio se analizó dividiendo la cuenca en tres subsistemas naturales: Subsistema 1- Ladera rocosa, corresponde a la parte alta de la cuenca donde aflora el macizo rocoso y priman las pendientes altas y la cobertura de bosque. Subsistema 2- Ladera de media, corresponde a las partes de la cuenca donde existen depósitos coluviales y suelos residuales, las pendientes topográficas son menores que las de la parte alta y predominan los pastos, los cultivos y en general vegetación de baja altura. Subsistema 3- Cauce activo de la quebrada Estaquecá hasta la desembocadura en el río Negro. Es importante recordar que el comportamiento de cada subsistema, y del sistema en general, es función de sus características intrínsecas y de la interacción con los demás subsistemas y con otros sistemas externos como lo son el climático, el antrópico y el geodinámico.

El análisis permitió identificar que las principales zonas de aporte de sedimentos se encuentran en la cabecera y en la parte media de la cuenca (Subsistemas 1 y 2), aunque también se identificó un aporte importante del lecho de la quebrada (Subsistema 3). Un análisis multitemporal permitió identificar que los deslizamientos de las márgenes ocurren en pulsos, permitiendo así la regeneración momentánea de la cobertura vegetal.

Para controlar el riesgo por flujo de detritos de la quebrada Estaquecá, las empresas encargadas de obras existentes en la zona, como un gasoducto y la vía, han construido obras locales de mitigación como presas cerradas y pontones, las cuales se enfocan en el cauce activo de la quebrada (Subsistema 3), sin realizar mayores intervenciones en el macizo o en la ladera media. Este tipo de obra, aumenta la capacidad de almacenamiento de material granular del cauce y el lapso entre eventos que llegan a la desembocadura de la quebrada. Estas obras pueden, o bien, ayudar a estabilizar las laderas (subsistema 2) por la disminución de la altura de las márgenes y el aumento en el confinamiento lateral, o aumentar la socavación lateral debido a la modificación del comportamiento de la quebrada.

Las obras de control del subsistema 3, al igual que los bloques rocosos métricos que se encuentran a lo largo del cauce de la quebrada, fijan el fondo y retienen gran cantidad de material granular grueso que modifica la pendiente del cauce de forma local, esto sin alterar su carácter torrencial y sin evitar la llegada de nuevos eventos hasta el río Negro. Si bien se altera el comportamiento al interior de los subsistemas, el comportamiento del sistema, a largo plazo, no se ve alterado debido a que las fuentes de material persisten y a que el material acumulado tras las presas mantiene su erodabilidad.

Referencias

- [1] Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. & Hutchinson, J. N. (2001). *Review of the classification of landslides of the flow type*. Environmental and Engineering Geoscience, 7: 221-238.
- [2] Montero, J. (2017). *Clasificación de Movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Bogotá.
- [3] Chorley, R. J. and Kennedy, B. A. (1971). *Physical Geography: A Systems approach*. Prentice-Hall, London.
- [4] Popolizio, E. (1987). *El enfoque sistémico en la enseñanza de la Geografía*. Boletín de la Sociedad Argentina de Estudios Geográficos GÆA N°106. Buenos Aires.
- [5] Alberto, J. A. (2011). *Teoría General de Sistemas Aplicada al Estudio de la Geomorfología Terrestre*. Argentina.
- [6] Estupiñán, H.A. & Triana, V.H. (2006). Estudio de avalanchas en la quebrada Estaquecá (Quetame – Cundinamarca). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

Efectos de sitio en estudios de riesgo sísmico en Colombia

Grupo Evaluación Amenaza y Riesgo Sísmico*, Servicio Geológico Colombiano

Colombia, como cualquier país situado en una zona con actividad sísmica de cierta importancia, requiere disponer de modelos de amenaza y riesgo sísmico que determine la posibilidad de ocurrencia de eventos con capacidad de generar daños a las personas y el capital expuesto. El Servicio Geológico Colombiano –SGC–, a través del Grupo de Evaluación de amenaza y riesgo sísmico de la Dirección de Geoamenazas, investiga los procesos generadores de la amenaza y desencadenadores del riesgo sísmico para el país.

El SGC, bajo un enfoque de colaboración técnica y científica con universidades y centros de investigación nacionales, representados en la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería –ACOFI–, y con la colaboración de entidades técnicas del gobierno, y otros actores privados, se encuentra desarrollando un modelo nacional de riesgo sísmico (MNRS) para la población y edificaciones de uso residencial en el territorio colombiano. El MNRS conjuga el conocimiento, experiencias y experticia de los diferentes actores para la caracterización del entorno construido y la modelación de su comportamiento ante sismos, con el conocimiento del SGC en la modelación y análisis de la amenaza sísmica, para evaluar el riesgo de manera homogénea para todos los municipios del país, con insumos y resultados que estarán abiertos a todos los potenciales usuarios.

El MNRS se compone del modelo de amenaza sísmica en roca desarrollado previamente por el SGC (Arcila, et al., 2020), un modelo de efectos de sitio, un modelo de exposición de población y edificaciones residenciales, y un modelo de vulnerabilidad física para dichas edificaciones. Aunque se reconoce que los efectos de sitio son un componente determinante en la estimación de riesgo, dada la escala de análisis, se deberá recurrir a algunos proxys tales como el valor de velocidad de onda cortante (V_{s30}) derivada de análisis regionales del gradiente topográfico, la geología, geomorfología. El uso de factores de amplificación se ha considerado para las ciudades que cuentan con estudios de zonificación de respuesta sísmica, para los cuales el SGC viene formulando una serie de recomendaciones y consideraciones para modelar la respuesta sísmica del terreno (Díaz et al., 2022), que también se presentan en este Congreso.

Por las razones anteriores, la fase actual del proyecto se centra en el desarrollo de los modelos de exposición y fragilidad para lo cual se viene siguiendo el marco general de actividades mostrado en la figura abajo. En esta ponencia se resumen los avances en la conformación de dichos modelos y se exponen las consideraciones y limitaciones para el análisis de la amenaza sísmica y la evaluación de efectos de sitio.

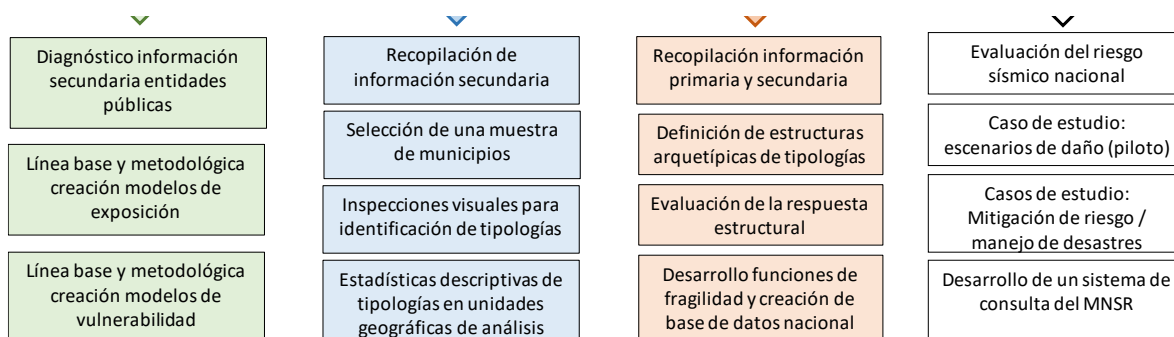


Figura 1. Marco general de actividades para el desarrollo del MNRS

Fuente: Autores

* Correspondencia: marcila@sgc.gov.co

Los resultados del modelo nacional de riesgo sísmico, tales como escenarios de daño y pérdidas económicas, son aplicables entre otros a los propósitos de la gestión del riesgo de desastres (diseño de estrategias para concientización del riesgo sísmico, identificación y priorización de infraestructura crítica evaluación y reforzamiento, diseño de estrategias de protección financiera, evaluación y mejora de los servicios básicos de respuesta que deben garantizarse luego de un desastre), y para el ordenamiento territorial y planificación urbana de las poblaciones.

Referencias

- [1] Arcila, M., García, J., Montejó, J., Eraso, J., Valcárcel, J., Mora, M., Viganò, D., Pagani, M. y Díaz, P. (2020). Modelo nacional de amenaza sísmica para Colombia. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano y Fundación Global Earthquake Model. ISBN-13 (15): 978-958-52794-6-9.
- [2] Díaz-Parra, F. J., Montejó, J., Perico, N., Mateus, L. Posada, G. (2022) Recomendaciones y consideraciones para modelar la respuesta sísmica del terreno

Propuesta metodológica para la estimación de la amplificación sísmica debida a la topografía

Leonardo Mateus*¹, Fernando Díaz-Parra¹, Nelson Perico¹, Julián Montejo¹

¹Servicio Geológico Colombiano (SGC), Grupo Evaluación Amenaza y Riesgo Sísmico, Colombia

A partir de mediciones instrumentales y observaciones de daños presentados después de un sismo en zonas de topografía montañosa, se ha observado que la topografía juega un papel importante en la amplificación de las ondas sísmicas. Sin embargo, este factor no ha sido incorporado de manera rigurosa en las normas sismo resistentes vigentes, principalmente porque no se han realizado muchos estudios al respecto y en consecuencia no existen metodologías claras para su determinación.

Aun cuando existen estudios pioneros de hace varias décadas [1, 2], y estudios recientes [3, 4, 5] que sugieren relaciones para la determinación del efecto topográfico, no se ha llegado a un consenso metodológico para su determinación. Por tal razón, el objetivo del presente trabajo es proponer un marco metodológico para la estimación de la amplificación de las ondas sísmicas debida a la topografía superficial del terreno, cuyas etapas son presentadas en la figura 1 y son desarrolladas en seis etapas que se describen a continuación.

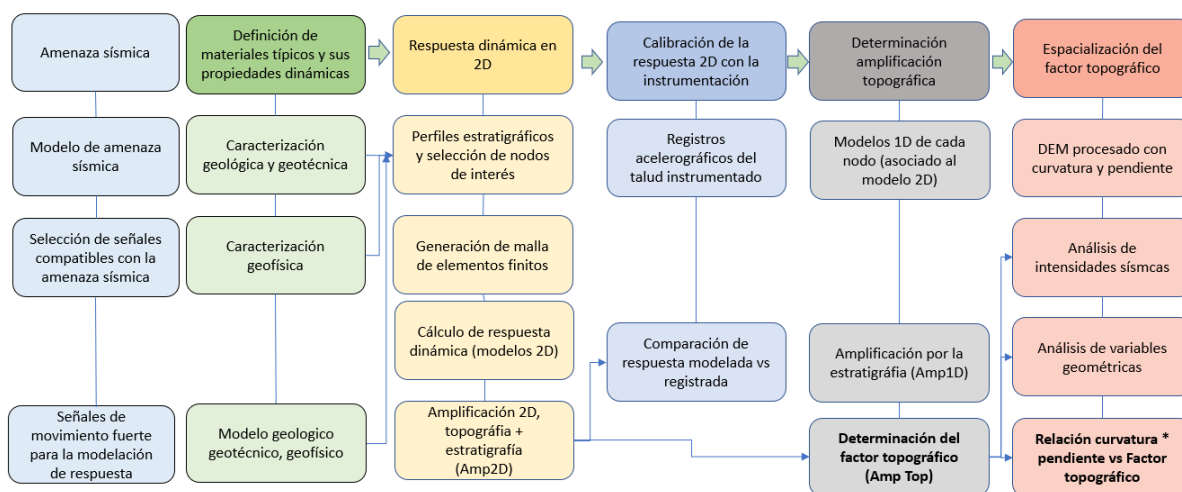


Figura 1. Esquema metodológico para la estimación de la amplificación sísmica debida a la topografía

Etapa 1: A partir del modelo de amenaza sísmica disponible se definen los ambientes tectónicos que contribuyen a la amenaza del sitio de estudio, así como su desagregación por magnitud y distancia; se seleccionan señales compatibles con la amenaza de las bases de datos a nivel mundial que sean de similares ambientes tectónicos, distancias hipocentrales, magnitudes, duración y contenido energético.

Etapa 2: Una vez definidas las señales compatibles con la amenaza es necesario reconocer los materiales típicos que se encuentran en el lugar, buscando recrear el modelo geológico, geofísico y geotécnico de la zona de estudio. Por un lado, la geología sugiere origen, distribución y disposición de los materiales. La geofísica, por su parte, sugiere espesores en función de la velocidad de onda de corte (V_s) a partir de ensayos como MASW, SPAC, REMI (ondas superficiales), Down hole, reflexión o refracción sísmica (ondas de cuerpo), sin embargo, es importante mencionar que la selección de los ensayos geofísicos a realizar depende del alcance en profundidad, para el desarrollo de esta metodología se sugieren profundidades que alcancen V_s cercanas a 760 m/s. Por último, la geotecnia aporta el modelo de comportamiento del material representado por propiedades índice del suelo W_n, γ_t y por sus propiedades dinámicas ante deformaciones cortantes (Y), amortiguamiento (D) y degradación del módulo de corte (G/G_{max}).

Etapa 3: Teniendo un modelo geológico (distribución, espesores, etc), geotécnico (W_n, γ_t, D vs $Y, G/G_{max}$ vs Y, etc) y geofísico (V_s vs profundidad) se establecen perfiles estratigráficos representativos sobre los cuales se construyen modelos en dos dimensiones (modelos 2D) usados para estimar amplificaciones en superficie. Para estimar la

* Correspondencia: lmateus@sgc.gov.co

amplificación en superficie (Amp_{2D}) se propagan ondas SH sobre una malla de elementos finitos con condiciones de borde establecidas, sometida a una señal de entrada en la base (basamento sísmico con $V_s > 760$ m/s). Se seleccionan los nodos (círculos en la figura 2) de la malla sobre los cuales hay interés de conocer aceleraciones en superficie y se determinan las aceleraciones espectrales de estos nodos.

Etapa 4: En el caso de contar con acelerómetros (triángulos en la figura 2) se validan las aceleraciones modeladas con las registradas comparando su respuesta espectral y parámetros de movimiento fuerte relacionados con la energía de la señal. Esta etapa sirve para calibrar algunos de los parámetros del modelo numérico, como el ejemplo amortiguamiento mínimo, curvas de degradación y amortiguamiento o el perfil de velocidad cortante.

Etapa 5: Una vez validadas las aceleraciones modeladas, asumiendo que la amplificación presentada en superficie (Amp_{2D}) está dada por el producto entre la amplificación atribuida a la topografía (Amp_{top}) y la amplificación atribuida a la estratigrafía (Amp_{1D}) (ver figura 2), la amplificación topográfica se determina como $Amp_{top} = Amp_{2D} / Amp_{1D}$. En consecuencia, es necesario construir modelos que reproduzcan solo el efecto de la estratigrafía (modelos 1D) construidos a partir de los modelos en dos dimensiones (modelos 2D) como se observa en la figura 2.

Etapa 6: Con base en otros estudios que han realizado modelaciones en varios lugares, sugieren que existen relaciones entre la forma de la topografía (pendiente, curvatura) y la amplificación topográfica [6, 7], para definir esta relación es necesario contar con un modelo de elevación de alta calidad para determinar las pendientes y las curvaturas con las Ec. 2 y 3. Finalmente, se procede a establecer relaciones entre la amplificación topográfica obtenida en función de la curvatura y pendiente (Ec. 4), estas correlaciones se establecen para varias ordenadas espectrales, por ejemplo para PGA o para S_a de 0.2 segundos y S_a de 1.0 segundos.

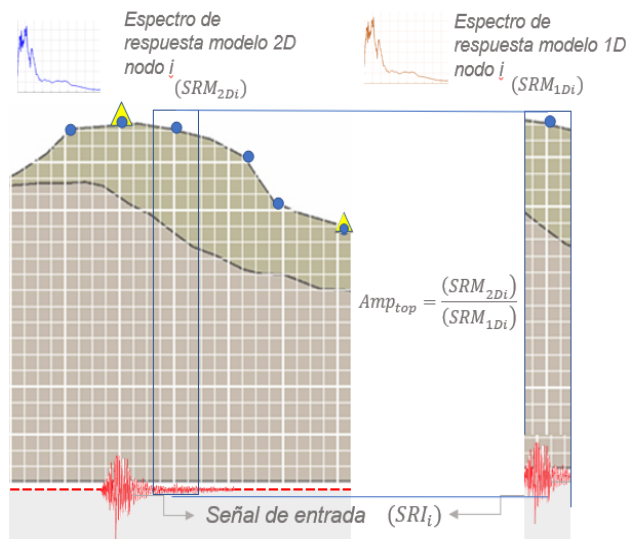


Figura 2. Determinación de la amplificación topográfica

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2) \quad \kappa = \frac{ly''l}{(1 + y'^2)^{3/2}} \quad (3) \quad FT = f(m, k, \dots, l) \quad (4)$$

Esta metodología permitió estimar funciones de amplificación topográfica para varias ordenadas espectrales en el estudio de zonificación de respuesta sísmica de la ciudad de Pereira [8], en donde fue posible validar exitosamente las aceleraciones modeladas con las registradas y en consecuencia especializar el efecto topográfico en la ciudad.

Bibliografía

- [1] Boore, D. M. (1972). A note on the effect of simple topography on seismic SH waves. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 62, Issue 1).
- [2] Aki, & Larner. (1970). Surface motion of a layered medium having an irregular interface due to incident plane SH waves. *J Geophys Res*, 75(5), 933–954. <https://doi.org/10.1029/jb075i005p00933>
- [3] Bouckovalas, G. D., & Papadimitriou, A. G. (2005). Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(7–10), 547–558. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.11.008>
- [4] Wald, D. J., & Allen, T. I. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site conditions and amplification. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 97, Issue 5, pp. 1379–1395). <https://doi.org/10.1785/0120060267>
- [5] Molina, S., Lang, D. H., Singh, Y., & Meslem, A. (2019). A period-dependent topographic amplification model for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(7), 3709–3725. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00608-1>
- [6] Maufroy, E., Cruz-Atienza, V. M., Cotton, F., & Gaffet, S. (2015). Frequency-scaled curvature as a proxy for topographic site-effect amplification and ground-motion variability. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 354–367. <https://doi.org/10.1785/0120140089>
- [7] Kim, B., Park, K., & Baek, H. (2018). Topographic Amplification Factors for Japan Using 2D Finite Element Analysis.
- [8] Díaz, F., Montejo, J., Perico, N., Mateus L., Posada G., López M., Barbosa D., Mora, M., Arcila, M., Valcárcel, J., Pérez, H., Perez L., (2021). Zonificación de Respuesta Sísmica de Pereira. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Deslizamientos submarinos en el Caribe colombiano

Darwin Mateus Tarazona¹, Jorge Alonso Prieto^{2*}, Anderson Mora Mora³, Daniel Andres Rincon¹, Julian Francisco Naranjo¹, Carlos Hernandez³, Erik Villamizar³, Hernan Madero³

¹ Centro de Innovación y Tecnología, Ecopetrol, Colombia

² Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia

³ Cooperativa de Tecnólogos e Ingenieros de la industria del petróleo y Afines. T.I.P. Colombia

Los deslizamientos submarinos son una amenaza para la infraestructura submarina y costera. En el Caribe colombiano confluyen grandes asentamientos costeros, tendidos de líneas de cables submarinos, importantes fuentes de hidrocarburos, así como un alto potencial para la generación de energía eólica. Es por esto por lo que el entendimiento de los fenómenos de remoción en masa se vuelve un ítem importante en el ordenamiento territorial marítimo.

Este estudio busca analizar las posibles relaciones entre los deslizamientos submarinos, la geomorfología del fondo marino y las características geológicas del subsuelo. Para ello se presenta el análisis de los deslizamientos submarinos hallados en el talud continental desde la alta Guajira, hasta el Golfo de Morrosquillo (Figura 1). Para la identificación de los deslizamientos en el fondo marino se utilizó información topográfica proveniente de cubos sísmicos y batimetría multihaz que cubren alrededor de 128,000 km², y con resoluciones espaciales que oscilan entre 10 m² y 100 m². También se utilizaron líneas sísmicas 2D disponibles para interpretar las deformaciones propias del material movilizado.

Los resultados de la investigación permitieron establecer que los deslizamientos submarinos están principalmente asociados a las paredes de cañones y canales submarinos, altos estructurales relacionados con la deformación tectónica y en áreas específicas, al quiebre de la plataforma continental. El trabajo permite identificar los contextos geomorfológicos más susceptibles de presentar eventos de deslizamientos submarinos y resalta la necesidad de realizar campañas de muestreo y caracterización geotécnica de los suelos marinos, para tener una estimación cuantitativa y grado de estabilidad del fondo marino.

* Correspondencia: jprieto7@eafit.edu.co

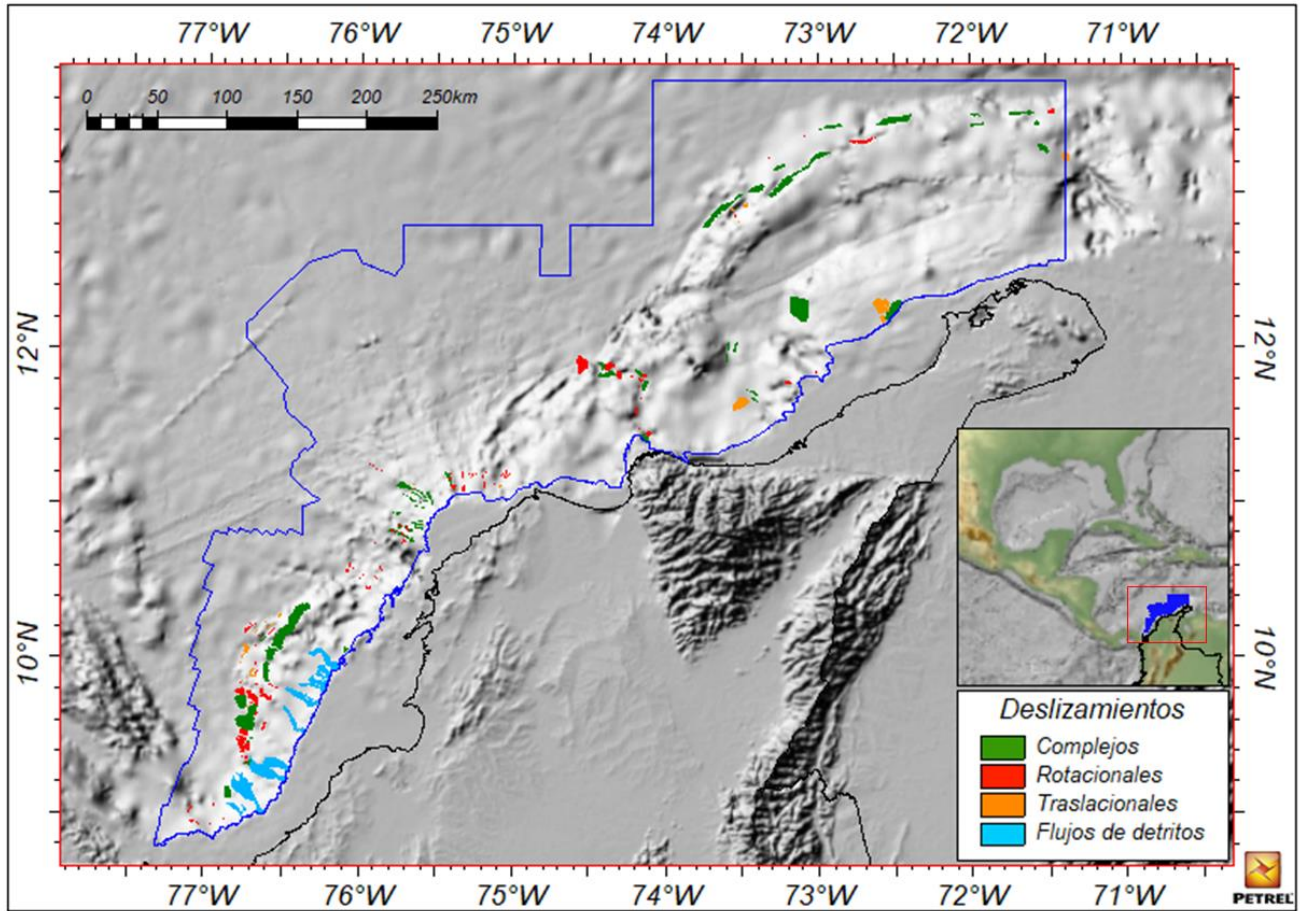


Figura 1. Deslizamientos en el talud continental del caribe colombiano.

3.3 Aplicaciones geológicas y geotécnicas de ingeniería: casos de estudio, obras, instrumentación, monitoreo y análisis

Diseño incremental de pavimentos asfálticos mediante herramientas de código abierto

Luis Ricardo Vásquez Varela^{1*}

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, Colombia

El diseño moderno de pavimentos asfálticos para calles y carreteras ha evolucionado desde prácticas empíricas hasta la metodología mecanicista empírica (ME) propuesta bajo diferentes enfoques desde mediados del siglo XX [1, 2]. Uno de los avances recientes en el área corresponde a la Guía Mecanicista-Empírica de Diseño de Pavimentos (MEPDG, por su sigla en inglés) desarrollada por la AASHTO en los EE.UU. [3, 4]. La MEPDG propone un enfoque de diseño que estima, a partir de funciones de transferencia calibradas en campo, el deterioro del pavimento en las condiciones prevalecientes de tráfico, clima, materiales y prácticas constructivas locales. La guía ha sido objeto de intensos trabajos de calibración en los EE.UU. y existe algún escepticismo sobre la posibilidad de adaptarla al medio colombiano [1]. El diseño incremental es computacionalmente exigente y, por ahora, se basa exclusivamente en el software comercial “AASHTOWare Pavement ME Design”.

Este trabajo presenta el desarrollo del programa de código abierto UNPAVE para diseño incremental de pavimentos asfálticos empleando las ecuaciones de la MEPDG e información disponible sobre clima y cargas de tránsito en Colombia. UNPAVE emplea el programa de capas elásticas UNLEA [5] para el análisis estructural del pavimento. Ambos códigos se desarrollaron en el lenguaje de programación Matlab, pero pueden traducirse a lenguajes de similares capacidades como Scilab, Octave o Python.

En su versión actual, UNPAVE considera pavimentos asfálticos compuestos de subbase y base granular no tratadas y una capa superficial de concreto asfáltico. El efecto del clima se representa mediante el análisis de periodos mensuales a lo largo de la vida de servicio del pavimento, los cuales definen propiedades mecánicas variables de los materiales del pavimento. Dentro de cada subperiodo mensual se consideran tres temperaturas del aire que representan la distribución diaria de esta variable. En cada subperiodo se evalúa el efecto de las cargas de los diferentes grupos de ejes que representan la flota vehicular estimada a partir del espectro asignado al pavimento.

UNPAVE estima el desarrollo del agrietamiento por fatiga, la profundidad del ahuellamiento, el aumento de la rugosidad (IRI) del pavimento, y los costos de operación vehicular acumulados de acuerdo con el IRI [6] durante el periodo de servicio del pavimento (ver Figura 1).

El trabajo realizado prueba la factibilidad de desarrollar una herramienta de código abierto en Colombia que permita la adopción de un procedimiento calibrado de diseño incremental de pavimentos para las condiciones de tráfico, clima, materiales y construcción del país. En desarrollos posteriores se pueden incluir materiales granulares tratados con diferentes aditivos (cal, cemento, escoria)

El autor enfatiza la necesidad de emplear herramientas de código abierto en la formación de los especialistas en el área con el fin de mitigar la tendencia a tomar como ciertos los resultados de las cajas negras producidas por empresas especializadas.

* Correspondencia: lvasquezv@unal.edu.co

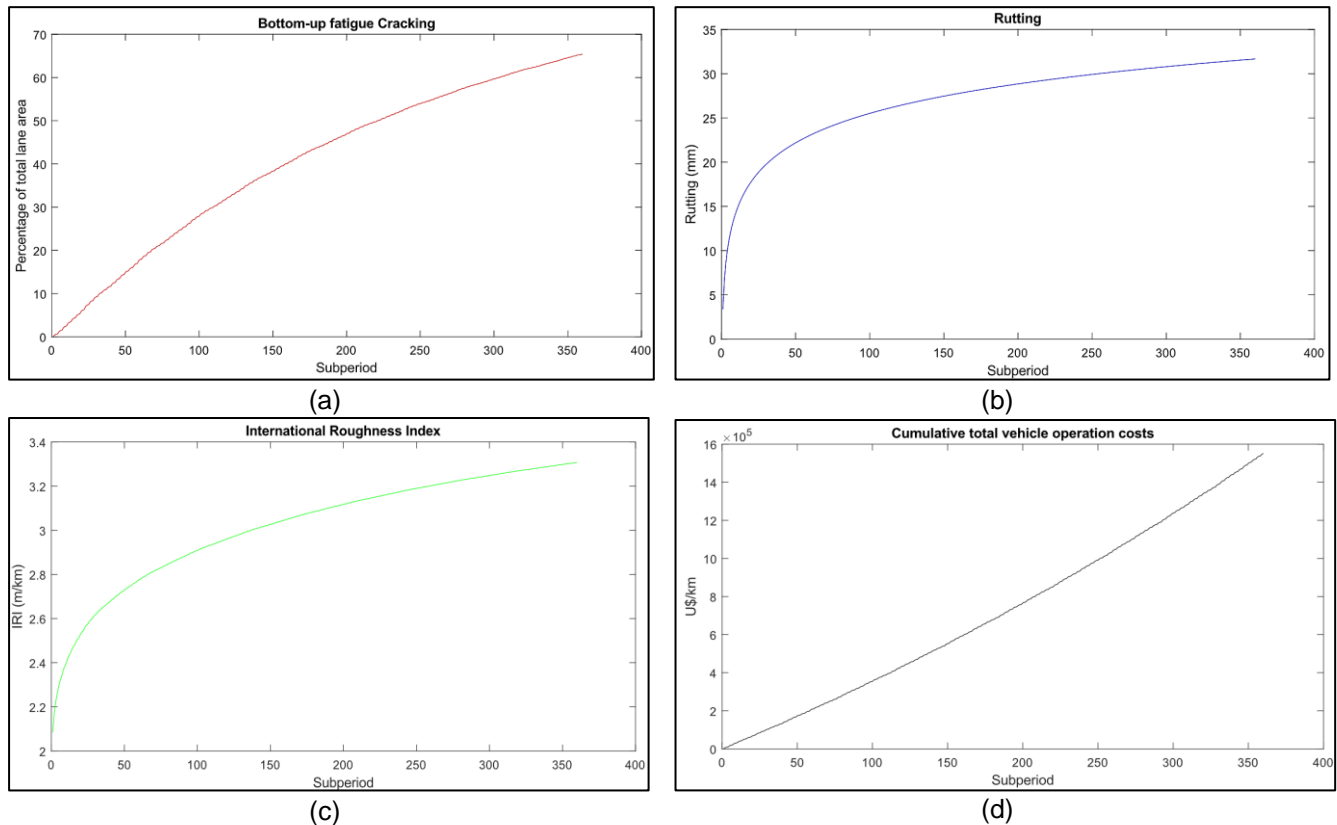


Figura 1. Incremento de: (a) agrietamiento por fatiga, (b) profundidad de ahuellamiento, (c) rugosidad, y (d) costos de operación vehicular de una sección de pavimento analizada con UNPAVE.

Referencias

- [1] L. R. Vásquez-Varela and F. J. García-Orozco, "An overview of asphalt pavement design for streets and roads," *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, no. 98, pp. 10-26, 2020.
- [2] F. Sánchez Sabogal, «Apuntes para una historia sobre los métodos utilizados en Colombia para el diseño de pavimentos de calles y carreteras,» 31 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/ingepav/escritos-de-fernando-s%C3%A1nchez-sabogal?authuser=0#h.wuksvpinkwho>. [Último acceso: 12 Agosto 2022].
- [3] AASHTO, *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. A Manual of Practice - Interim Edition*, Washington D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [4] NCHRP, "Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," National Research Council, Washington D.C., 2004.
- [5] L. R. Vásquez-Varela and F. J. García-Orozco, "UNLEA A Multilayer Elastic Program Script in Scilab," in *International Airfield and Highway Pavements Conference 2019*, Chicago, IL, 2019.
- [6] K. Chatti and I. Zaabar, "Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs NCHRP Report 720," Transportation Research Board, Washington, D.C., 2012.

Análisis de las deformaciones de las lutitas negras en el túnel Guillermo Gaviria Echeverri

Mateo Sanín^{1*}, Silvana Montoya¹

¹ Grupo de investigación en Mecánica Aplicada, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia

RESUMEN

Como parte de los proyectos viales 4G del gobierno nacional, el túnel Guillermo Gaviria Echeverri (GGE), localizado en la cordillera occidental colombiana, tendrá una longitud de 9,73 km y conectará los municipios de Giraldo y Cañasgordas del departamento de Antioquia. Será el túnel carretero más largo de Suramérica [1]. El túnel cuenta con una sección en herradura con hastiales semi curvos y un área de sección de aproximadamente 120 m², ancho de 11,5 m y 12,5 m de alto. Cuenta también con una galería de emergencia paralela al tubo principal con una longitud similar. Las rocas excavadas son dos unidades del grupo Cañasgordas, la formación Barroso desde portal entrada (Giraldo) y la formación Penderisco desde el portal salida (Cañasgordas). La formación Barroso es una secuencia de basaltos verdes, diabasas y otras rocas volcánicas. Mientras que, la formación Penderisco es una secuencia sedimentaria dominada por intercalaciones rítmicas de poco espesor de lodolitas grises y negras, novaculitas, liditas, y chert, principalmente. Durante las excavaciones desde el portal salida, se ha venido presentando un exceso de deformaciones que genera problemas de inestabilidades en tramos particulares, donde las rocas son de origen sedimentario principalmente.

Este trabajo busca evaluar las causas y consecuencias de las deformaciones presentadas en el tramo de estudio, PK36+080 – PK35+518, a partir del análisis de la geología local y estructural, datos del monitoreo geotécnico por medio de convergencias medidas en terreno [2], datos de caudales del túnel, ensayos de laboratorio incluida la evaluación de la fábrica de la roca por medio de microscopio petrográfico y de la modelación computacional de elementos finitos con las nuevas características recolectadas para la roca.

Las convergencias medidas por medio de cinta extensométrica de precisión en el TP 227 desde el momento de la excavación del túnel hasta marzo 2022 se presentan en la [Figura 1](#), de acuerdo con los análisis recolectados en los levantamientos geomecánicos [3]. Se observa alta tasa de deformaciones inmediatamente se excava la sección y luego de aplicar el sostenimiento, estabilizándose después de que se ejecutan los tratamientos especiales. En este tramo se han presentado averías en el sostenimiento a manera de grietas en el concreto, arcos deflactados, además de sendas sobre excavaciones principalmente en la clave y los hombros [4]. Esta situación se replica inclusive después de la instalación final del sostenimiento, haciendo que el soporte aplicado sea en algunos casos más robusto a lo estipulado por las clasificaciones geomecánicas realizadas en el proceso constructivo por los profesionales de obra. El exceso de las convergencias evidenciado en la [Figura 1](#) se contrasta con el análisis petrográfico y de infiltraciones para el tramo. Asimismo, se analizan los sostenimientos estructurales de acuerdo con los patrones de fracturamiento y la incidencia tectónica en las deformaciones estimadas por medio de modelos computacionales de elementos finitos.

* Correspondencia: msaninz@eafit.edu.co; smontoya@eafit.edu.co

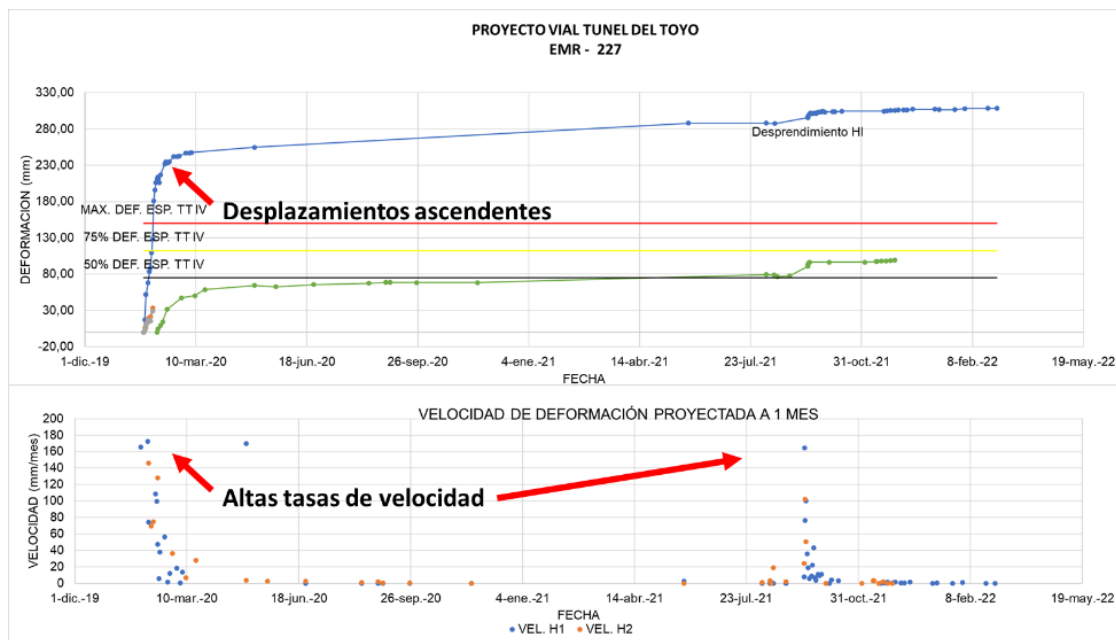


Figura 1. Historia de las deformaciones y las velocidades de deformación en el TP 227 PK 35+564. Tomado y modificado de [3].

Por otra parte, se realizaron ensayos de resistencia por compresión simple en 5 etapas, de fresca a sumergida por 2, 5, 10, 20 y 40 días. Estas condiciones alteran la contextura interna de la roca a nivel microscópico, empobreciendo su resistencia cuando entra en contacto con el agua, debido a la destrucción de la estructura cristalina de los minerales de las arcillas, principalmente aquellos que cuentan con una estructura planar como la moscovita y la clorita. Este comportamiento empobrece la calidad general del macizo rocoso.

Para garantizar la estabilidad y operatividad de la sección, se implementó una secuencia de preinyecciones y post inyecciones con microcemento, en conjunto con un sostenimiento tipo V a tipo V*, el cual contempla un invert curvo, enfilajes de micropilotes, arcos tipo HEB, y pernos anclados con lechada o resina. Esta alternativa mejora las prestaciones del macizo en forma de anillo en profundidad, y a su vez sirve de pre-sostenimiento para mitigar las deformaciones por el desconfinamiento de material. Luego del soporte que ha garantizado la estabilidad, el monitoreo geotécnico y los resultados del modelo evidencian un contraste en los desplazamientos, donde el radio plástico de la sección y la velocidad de las deformaciones es menor en comparación con el momento antes de la solución. Es de resaltar que la concentración de los desplazamientos se ubica uniformemente en la sección luego de los tratamientos especiales, comúnmente usados en los procesos constructivos de túneles.

REFERENCIAS

- [1] Consorcio Antioquia al Mar (2017). Capítulo 2. Estudio de Transito, Topografía y Diseño Geométrico Para Túnel del Toyo. Medellín.
- [2] AGS (2014). Geotechnical monitoring in conventional tunnelling. Salzburg: Austrian society of geomechanics.
- [3] Consorcio Antioquia al Mar (2022). Volumen 2 Monitoreo por convergencias del portal salida túnel GGE, fase constructiva. Cañasgordas, Antioquia.
- [4] Consorcio Antioquia al mar (2019). Registro geológico y geotécnico del macizo rocoso. Cañasgordas, Antioquia.

Sistema de contención y secuencia constructiva para la excavación de 3 niveles de sótanos del edificio calle 125 de la Pontificia Universidad Javeriana en la ciudad de Bogotá

Jimmy A. Alvarado¹, Edgar Navarro², Oscar Pulido³, Juan Paulin⁴

¹ Departamento Técnico, Soletanche Bachy Colombia-Geofundaciones, Colombia

² Departamento de Ingeniería, Cimesa, México

³ Departamento Técnico, Soletanche Bachy Colombia-Geofundaciones, Colombia

⁴ Director de ingeniería Zona Iberoamérica Soletanche Bachy, Iberoamérica

El proyecto Edificio Calle 125 PUJ consiste en la construcción de un conjunto corporativo de oficinas ubicado sobre la Cra.45 con calle 125, Bogotá, compuesto por una torre de 10 niveles y 3 sótanos.

En el presente artículo se aborda el análisis del muro pantalla que conforma el cajón de cimentación y que se construye para soportar las condiciones críticas de empujes que induce el terreno durante la excavación.

Para el proceso de excavación se utilizó la técnica “top-down”, la cual consistió en construir en una primera fase el muro pantalla, los barretes de cimentación y la losa de piso 1, para después ir excavando el núcleo del cajón al tiempo que se van construyendo las losas de los sótanos que restringen lateralmente al muro pantalla durante la excavación y en fase definitiva. Durante el proceso de excavación, las losas se apoyaron verticalmente en perfiles metálicos, los cuales a su vez están pre-cimentados en barretes de concreto. Estos perfiles metálicos hicieron parte de las columnas definitivas.

El proceso de excavación se diseñó masivo para los sótanos 1 y 2; mientras que para el sótano 3 se planteó un sistema particular de “franjas” que permitió aumentar el factor de seguridad “al pateo” del muro y reducir el rebote elástico del suelo, producto del alivio de esfuerzos que genera la excavación.

Tabla 1. Perfil estratigráfico y propiedades del suelo definido con base a los sondeos ejecutados en el sitio y la información geotécnica disponible de proyectos aledaños.

Unidad	Descripción	Prof. inicial (m)	Prof. final (m)	γ_{sat} (t/m ³)	C_u/c' (t/m ²)	ϕ °
U1	Rellenos heterogéneos	0.0	1.5	1.60	0.5	27
U2	Arcillas de consistencia blanda a muy blanda de alta plasticidad, color gris-habano (LL entre 30 y 50%, contenido de agua promedio de 120%, LP entre 140 y 170%)	1.5	8.0	1.50	2.5	0
U3		8.0	16.0	1.50	3.0	0
U4		16.0	23.0	1.50	3.5	0
U5		23.0	30.0	1.50	4.0	0
U6		>30.0	1.50	5.0	0	

Con el fin de verificar los desplazamientos y solicitaciones estructurales, así como revisar la estabilidad general del sistema de contención, se realizó un análisis mediante el método de Elementos Finitos, con ayuda del programa Midas GTS-NX® representando todas las etapas en un modelo 3D.

La secuencia constructiva analizada fue la siguiente:

jalvarado@geofundaciones.com

- Construcción del muro pantalla estructural de 50 cm de espesor, desplantado a 25 m de profundidad.
- Excavación hasta el nivel -0.90 y construcción de losa de piso 1. La losa de piso 1 se utiliza como plataforma de trabajo.
- Excavación hasta el nivel -4.00 sin restricciones y construcción de losa de sótano 1.
- Excavación hasta el nivel -6.90 sin restricciones y construcción de losa de sótano 2.
- Excavación hasta el nivel máximo de excavación -10.80 por franjas (ver secuencia en Figura 1). También se contempló el sector de excavación del dado del punto fijo (profundidad de excavación 11.80)
- Construcción de losa de sótano 3.

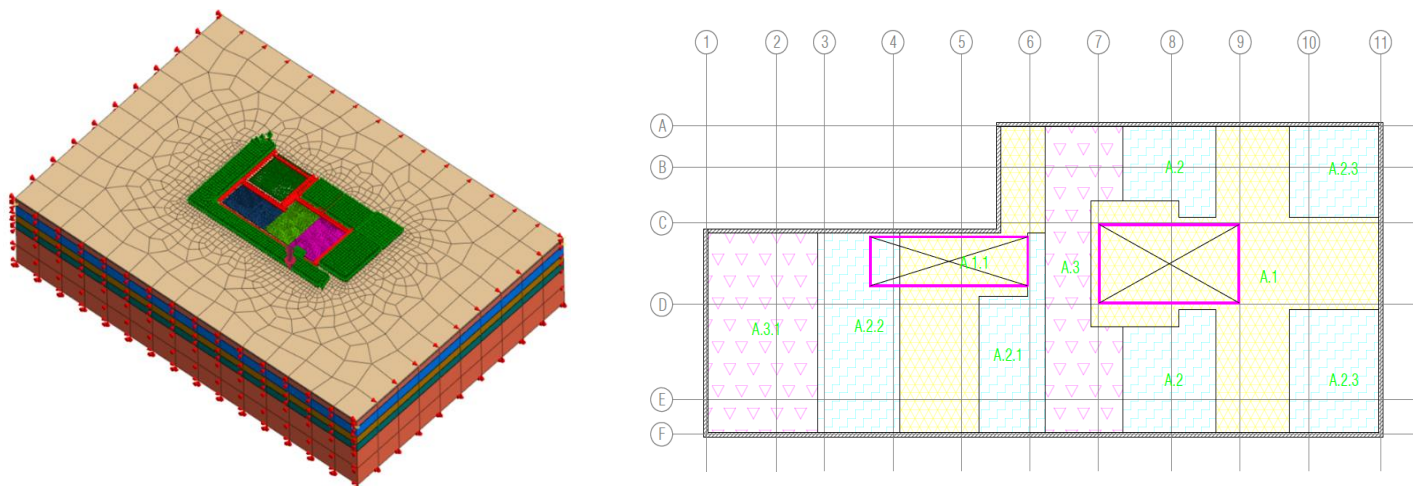


Figura 1. Esquema general del modelo de elemento finito en 3D, y esquema de secuencia de excavación mediante franjas a nivel del sótano 3.

El modelo numérico registró magnitudes de expansiones de 13 cm al interior de la excavación y 2.3 cm de asentamientos en las áreas adyacentes al proyecto, de igual forma los desplazamientos horizontales máximos esperados fueron de 7 cm. Por otra parte, el factor de seguridad por estabilidad general que se obtuvo para el proceso constructivo descrito fue de 2.5.

Los datos obtenidos en el modelo fueron corroborados con instrumentación geotécnica durante el desarrollo del proceso. Al final de la excavación y la construcción de los sótanos se llega a desplazamientos horizontales máximos de 8 cm y asentamientos en el perímetro del proyecto de 2 cm.

La estructura de contención fue instrumentada con 10 inclinómetros, 4 piezómetros y puntos de control de topografía, lo cual nos permitió evaluar el comportamiento de la estructura de contención durante la fase de excavación. Al finalizar la excavación se registraron deformaciones en las pantallas muy similares a las determinadas en la modelación geotécnica 3D.

Referencias

- [1] Geofundaciones, Soletanche Bachy Colombia (2020). Revisión del Sistema de estabilización de la excavación y secuencia constructiva edificio calle 125 Pontificia Universidad Javeriana. Geofundaciones.
- [2] SRC Ingenieros Civiles S.A. (2016). Estudio geotécnico, recomendaciones de cimentación y sistema constructivo. Versión SRC 3896-B.
- [3] Jeoprobe, Geotecnia Especializada (2019). Informe de caracterización geotécnica. Versión 0.

Influencia del tamaño de bloques en la capacidad portante de cimientos superficiales apoyados en bimsoils

Luis Felipe Prada-Sarmiento^{1*}

¹ Profesor de cátedra, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.

Los Bimsoils son mezclas de grandes bloques, competentes geotécnicamente, incrustados en una matriz de suelo más débil [1]. Ejemplos de estos materiales son los depósitos coluviales, aluviales y till glacial. Los enfoques de diseño convencionales suelen tener en cuenta las características de resistencia de la matriz, mientras que los enfoques empíricos utilizan la proporción volumétrica de bloques (PVB) para modificar la resistencia de la matriz teniendo en cuenta la presencia de bloques [3]. Este resumen esboza un enfoque numérico para estudiar la capacidad portante 2D de los Bimsoils, considerando tamaños de bloques entre el 5% y el 75% del ancho de la zapata, proporciones areales de bloques de hasta el 70% del dominio del problema.

Para analizar la capacidad portante de un Bimsoil bajo la acción de un cimiento superficial se utilizó el método de análisis límite con elementos finitos (FELA) de acuerdo con los teoremas de límite inferior y superior de la plasticidad. Para obtener soluciones rigurosas de límite inferiores y superior, las simulaciones se realizaron junto con los tipos de elementos recomendados en el software OptumG2 [2] y se basaron en un campo de esfuerzos admisible estáticamente y un campo de velocidad admisible cinemáticamente, respectivamente, que requieren un material rígido-perfectamente plástico, así como una regla de flujo asociada.

En este trabajo se consideraron simultáneamente dos parámetros clave, la proporción del tamaño de los bloques ($BSR = d/B$) definido como la relación entre el diámetro de los bloques (d) y el ancho de las zapatas (B) y la proporción del área de los bloques ($ABP = \sum_i A_{Bloque\ i} / A_{dominio}$), calculado como la relación entre la suma de las áreas de los bloques y el área del dominio del problema (Figura 1).

Los distribución de los bloques se realizó de forma aleatoria con un código propio en *Python*, donde se consideraron las variables BSR , ABP , separación mínima entre bloques, y número máximo de iteraciones.

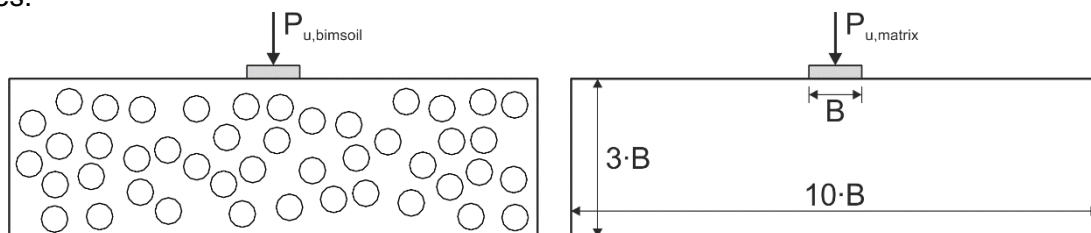


Figura 1. Configuración geométrica del dominio de análisis para el cálculo de la capacidad portante P_u

Diferentes combinaciones aleatorias de distribuciones de bloques variando su tamaño ($10\% < BSR < 75\%$), proporción volumétrica ($0\% < ABP < 40\%$), tipo de matriz (granular o fina), interfase bloque-matriz (100% o 67% de la resistencia de la matriz) fueron analizadas con el programa OptumG2. Para cada configuración se corrieron 30 modelos con diferente ubicación de los bloques en la matriz. Los resultados se presentan en la Figura 2 en función de la relación entre la carga última obtenida para las configuraciones de bimsoils comparadas con la carga última obtenida para un suelo sin bloques (solo matriz), como $\Phi = P_{u,bimsoil} / P_{u,matrix}$.

* Correspondencia: Lf.pradas@javeriana.edu.co

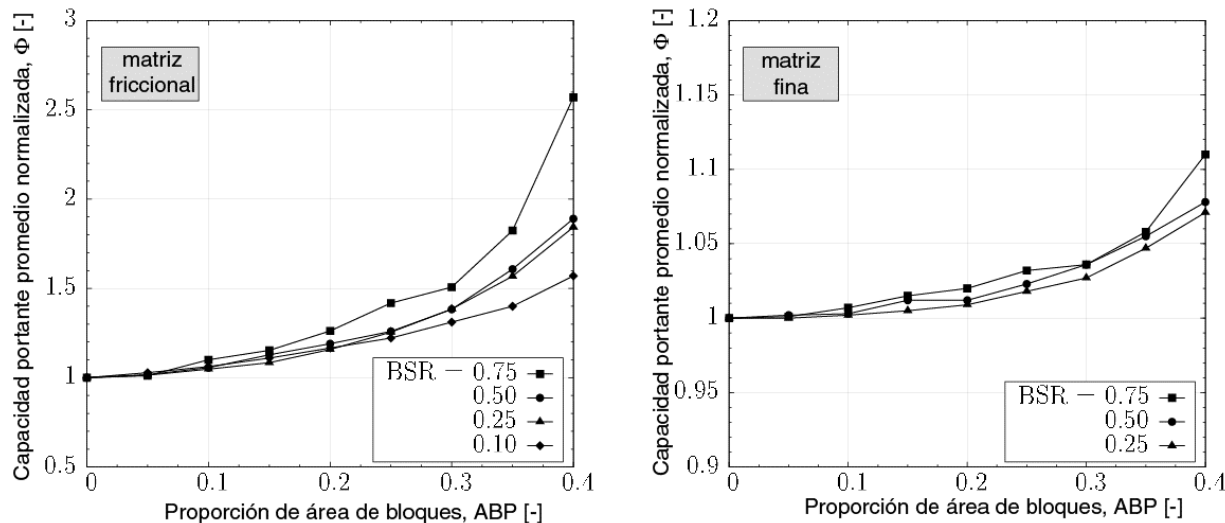


Figura 2. Factores de capacidad portante promedio de Bimsoils (valores medios entre las soluciones de límite superior y límite inferior) para una matriz granular (izquierda) y una matriz fina (derecha).

Los resultados mostraron que no sólo la proporción volumétrica de bloques, sino también el tamaño de los bloques, tienen una gran influencia en el aumento de la capacidad portante [4]. Una explicación de esta observación fue apoyada por la complejidad de la superficie de falla (Figura 3), cuya forma aumentó significativamente con el aumento de los tamaños de los bloques y las proporciones de los mismos. Además, las mayores resistencias al corte encontradas en la interfaz bloque-matriz debido a los contactos bloque-matriz soldados (100% resistencia de la matriz) condujeron a mayores capacidades portantes. Este efecto fue más dominante en una matriz de suelo friccional que en una fina.

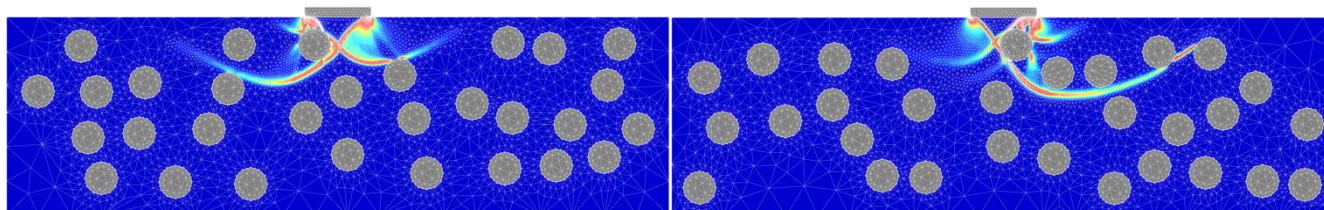


Figura 3. Variación de la superficie de falla (disipación de trabajo generado por esfuerzos de corte y deformaciones plásticas) debido al muestreo de bloques circulares embebidos en una matriz puramente friccional con $BSR = 0,50$ para tamaños $ABP = 0,40$.

Referencias

- [1] Medley, E. (1994). The engineering characterization of melanges and similar block-in-matrix rocks (bimrocks). Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.
- [2] OptumG2 (2019). Finite Element Program for Geotechnical Analysis, Optum Computational Engineering, www.optumce.com.
- [3] Kalender A., Sonmez H., Medley E., Tunusluoglu C., Kasapoglu K. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology* (183):65–79
- [4] Schmüdderich, C., Prada-Sarmiento, L.F., Wichtmann, T. (2021). Numerical analyses of the 2D bearing capacity of block-in-matrix soils (bimsoils) under shallow foundations. *Computers and Geotechnics*, (136), 104232.

Aplicaciones de monitoreo remoto para deslizamientos en proyectos de infraestructura en Colombia

Víctor Restrepo Botero^{1*}, Héctor Salazar Bonilla²

¹ Gerencia Técnica, Geoandina i SAS, Colombia

² Gerencia General, Geoandina i SAS, Colombia

En zonas con condiciones geológico-geotécnicas complejas, en donde las evidencias de potencial activación de procesos de remoción en masa o en sitios donde procesos antrópicos tienen incidencia directa en la estabilidad de las laderas, ha venido teniendo mayor relevancia el monitoreo de taludes para el seguimiento de tasas de deformación y potencial colapso de sectores en estas estructuras.

En los últimos años, los desarrollos tecnológicos para la medición de desplazamientos, presiones de agua, precipitaciones, aceleraciones, entre otras variables, toman mayor relevancia para brindar información detallada del comportamiento de estas en el tiempo y así, hacer seguimiento y poder evaluar tendencias que pueden manifestar consecuencias posteriores en usuarios y activos de infraestructura. La ponencia presentará tecnologías de teledetección con aplicaciones específicas en radar terrestre tipo Gb-InSAR, tecnologías láser tipo LiDAR y monitoreo de interferometría satelital (InSAR) en proyectos de infraestructura en Colombia.

La tecnología de radar terrestre GB-InSAR permite realizar mediciones bajo los mismos principios aplicados desde un satélite pero con un mayor grado de precisión en un rango mucho más limitado, debido a la proximidad con el objetivo de análisis desde cualquier punto en el terreno. Desde finales de 2018 se identificaron grietas en la ladera ubicada en el K58 Mesa Grande de la Vía al Llano, cerca del municipio de Guayabetal (Cundinamarca). El aumento de los vectores de desplazamiento de la ladera hacia la carretera en operación y las evidencias de movimiento y agrietamiento de un sector del túnel bajo dicha ladera, hizo necesaria la instalación de un radar terrestre interferométrico de apertura sintética (GB-InSAR) con monitoreo 24/7 para generación de alarmas según el tipo de tendencia identificada en los diferentes análisis. Con este sistema se ha podido monitorear la evolución de los desplazamientos, identificando áreas de mayor actividad (ver Fig. 1 (a)) y predecir colapsos de materiales (ver Fig. 1 (b)).

La aplicación de tecnología LiDAR, se llevó a cabo para un deslizamiento en el talud ubicado en cercanías al sector de Bellavista (K38+900) del proyecto Cruce Cordillera Central que se activó con las actividades de construcción que se estaban llevando a cabo en la zona. Para este caso, se definió implementar un sistema de monitoreo con diez prismas materializados en campo y diez puntos virtuales. Los puntos se distribuyeron en el escarpe principal y zonas de interés en el cuerpo del deslizamiento. A partir del monitoreo punto a punto automatizado 24/7 se obtuvo información respecto a los desplazamientos de la ladera y se analizaron patrones de falla respecto a las tendencias de deformación que presentaba el terreno (ver Fig. 1 (c)).

* Correspondencia: vrestrepo@geoandina.net; hsalazar@geoandina.net.

Finalmente, la tecnología InSAR, para la evaluación histórica y seguimiento del estado de desplazamientos sectorizados permite identificar tendencias y zonas de mayor interés. Esta tecnología se implementó en el corredor de una línea de transmisión eléctrica, en donde se analizaron imágenes de satélite Sentinel 1-A de la Agencia Espacial Europea (ESA). El área de interés consistió en una franja de quince torres de energía ubicadas en un área de alta actividad asociada a procesos geológicos/geotécnicos, que amenazan la estabilidad de algunas de estas torres de transmisión.

Para el análisis del corredor de las líneas eléctricas, se realizó un seguimiento del desplazamiento acumulado mediante el análisis de cambios de fase en imágenes satelitales sucesivas (ver Fig. 1 (d)) y el análisis mediante cambios de amplitud de señal debido a la reflectancia de esta. Con esta tecnología fue posible identificar cambios importantes en el proceso de erosión temporal, deslizamientos progresivos, deforestación y otros tipos de eventos para la evaluación de sus variaciones en el tiempo (ver Fig. 1 (e)).

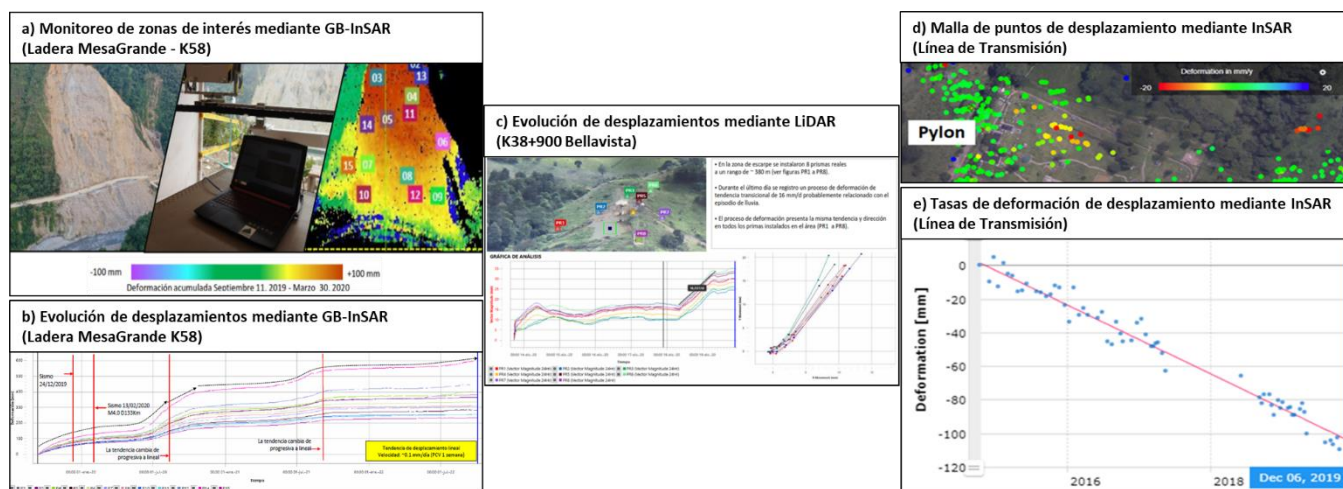


Figura 1. Monitoreo remoto del comportamiento geotécnico en laderas para proyectos de infraestructura en Colombia.

Los desarrollos tecnológicos en teledetección (GB-InSAR), láser (LiDAR) e interferometría satelital (InSAR), actualmente se han convertido en una herramienta indispensable en el campo de la infraestructura, ya que permiten realizar un seguimiento más preciso y eficaz de las variables que intervienen en la estabilidad de las laderas. Se pudo apreciar en los casos de aplicación descritos en el presente documento que la aplicación de estas tecnologías permitió monitorear el comportamiento de los desplazamientos y así evaluar patrones de falla en las zonas de análisis o interés.

Referencias

- [1] Antonello, G., et.al. (2004). *Ground-based SAR interferometry for monitoring mass movements*. Landslides 1:21-28. Springer-Verlag.
- [2] Fukuzono, T. (1985). *A Method to Predict the Time of Slope Failure Caused by Rainfall Using the Inverse Number of Velocity of Surface Displacement*. Journal of Japan Landslide Society. Vol 22. No.2.
- [3] Mazzanti, P. (2012). *Remote monitoring of deformation. An overview of the seven methods described in previous G/Ns*. Geotechnical News, 30 (4):24-29.
- [4] McHugh, E., et.al. (2006). *Applications of ground-based radar to mine slope monitoring*. Report of investigations 9666. NIOSH. Publication No.2006-116.

3.4 Comportamiento de suelos y rocas

Interpretación de ensayo de corte directo consolidado drenado

Jorge A. Rodríguez O¹ * Natalia Quintero¹
¹ Jeoprobe SAS, Colombia

La normativa de ensayos que rige a nivel nacional [1] e internacional [2] indican los procedimientos para la ejecución de ensayos de corte directo, cuyo objetivo es la determinación de la resistencia al corte de una muestra de suelo mediante la envolvente de esfuerzos en términos de la ecuación de Mohr-Coulomb, resultando en valores de cohesión y ángulo de fricción. Se considera que los ensayos se pueden hacer en condición drenada (CD) o no drenada (CU) en función de la velocidad de corte. Esta velocidad está limitada por la capacidad mecánica de los equipos. En algunos casos la velocidad del equipo aunque sea la más lenta posible, no se logra una condición drenada en el ensayo con lo que aunque se espera una envolvente CD en realidad se obtienen una condición CU, o una situación intermedia. Esto depende de las condiciones particulares del suelo en especial de su permeabilidad y estructura interna. En el análisis e interpretación normalmente se considera que el suelo está saturado y que los esfuerzos efectivos se pueden obtener de los datos medidos. Sin embargo, en caso de suelos parcialmente saturados este no es el caso y las envolventes que se obtienen son inciertas. Las directrices técnicas de las normativas de ensayo indican que la determinación de las envolventes de resistencia y el desarrollo de pautas para interpretar y evaluar los resultados del ensayo se dejan a criterio del profesional que solicita el ensayo, invitando al análisis detallado de los resultados de este tipo de ensayos.

Este artículo presenta una metodología para el análisis de resultados de ensayos de corte directo consolidado drenado en suelos finos (limosos y arcillosos), reevaluando la interpretación de las condiciones de saturación y drenaje que inciden de manera significativa en los parámetros de resistencia. Adicionalmente se considera el análisis del estado de esfuerzo de las muestras ensayadas, lo que lleva a una interpretación alternativa más confiable para el uso de los resultados como parámetros de diseño.

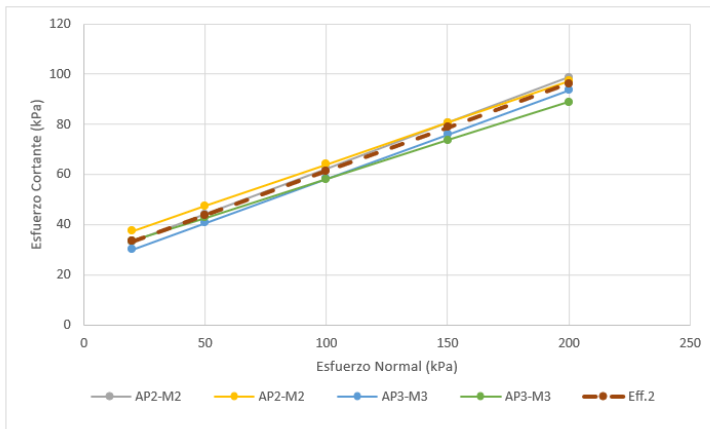
Uno de los aspectos que se asumen regularmente en la interpretación de un ensayo de corte directo es que la muestra se encuentra 100% saturada. Por esta razón, resulta relevante estudiar el posible comportamiento de las muestras como parcialmente saturadas, considerando un aporte de succión en el esfuerzo efectivo.

Por otra parte, se evalúan los resultados en relación con las condiciones de drenaje del ensayo, realizando un comparativo de resistencia al corte con mecánica de suelos de estado crítico (MSEC). La mecánica de suelos de estado crítico es un modelo de comportamiento del suelo en esfuerzos efectivos que describe la respuesta mecánica del suelo [3]. Esta metodología permite calcular el comportamiento de resistencia y compresibilidad del suelo en función de su estado de esfuerzos y de sobreconsolidación. La MSEC se utiliza para calcular la resistencia al corte en condición no drenada (S_u) basado en valores de RSC (relación de sobreconsolidación) y ángulo de fricción interna efectivo estimados, para compararla con los datos del ensayo. También se compara la resistencia en condición drenada con las

* jorge.rodriguez@jeoprobe.com

mediciones, de manera que se tienen las envolventes para los dos estados. De esta forma se puede verificar si los datos medidos corresponden a una condición drenada o no drenada, y si es relevante el efecto de la succión. También permite tener un estimativo de los datos de Relación de Sobreconsolidación (RSC), y ángulo efectivo de fricción, o confirmación de estos si se tienen ensayos adicionales de consolidación, triaxiales u otros como SPT o CPT a partir de los cuales se pueden también tener estimativos de estos parámetros. Esta estrategia de caracterización con verificaciones independientes a partir de diferentes ensayos permite aumentar la confiabilidad de la caracterización y mejora el entendimiento del estado y comportamiento del suelo para diseño.

A continuación se ilustra un ejemplo de ensayos de corte directo en suelos residuales compactados que dan resultados iguales con los dos métodos de ensayo (lento y rápido) y cuya interpretación muestra que son datos en condición no drenada en que el suelo tiene succión y corresponde a un suelo ligeramente sobre consolidado de acuerdo con la interpretación de MSEC cuya base se ilustra en la figura a la derecha.



Ensayos de corte directo					Parámetros en esfuerzos efectivos	
Envolventes de resistencia medidas					Eff.2	
Mohr	AP2-M2	AP2-M2	AP3-M3	AP3-M3	RSC	1.3
Coulomb	Rápido	Lento	Rápido	Lento	Cohesion por succion	75
c	25.93	30.7	23.13	27.34	Lambda Λ	0.76
ϕ	20	18.4	19.39	17.11	ϕ'	35

Resistencia No drenada
Mecánica de suelos de estado crítico

- Inicialmente : $s_u/\sigma_{vo}' = \text{constante}$ para suelos Normalmente Consolidados (NC)
- En compresión primaria : $\sigma_{vo}' = \sigma_e'$
- Entonces: $s_u/\sigma_e' = \text{constante}$ para todo suelo (NC & Sobre Consolidados, SC)
- Para corte simple : $s_u/\sigma_e' = \frac{1}{2} \sin \phi'$
- Esfuerzo equivalente: $\sigma_e' = \sigma_{vo}' RSC^{[1-C_s/C_c]}$

Resistencia No drenada Normalizada:

$$s_u/\sigma_{vo}' = \frac{1}{2} \text{sen}(\phi') RSC^\Lambda$$

donde $\Lambda = (1 - C_s/C_c)$

Mayne,
2005

Referencias

- [1] INVIAS (2013). Ensayo de Corte Directo en Condición Consolidada Drenada (CD). INVE-154-13. Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras. Instituto Nacional de Vías.
- [2] ASTM (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM D3080/D3080M – 11. 2011.
- [3] P.W. Mayne (2013). Geotechnical and Geophysical Site Characterisation5–Lehane, Acosta-Martínez & Kelly(Eds) © 2016 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, ISBN 978-0-9946261-1-0
- [4] Mayne, P.W. (2005). Invited Keynote: "Integrated Ground Behavior: In-Situ and Lab Tests", Deformation Characteristics of Geomaterials, Vol. 2 (Proc. IS Lyon'03), Taylor & Francis Group, London: 155-177.

Colapso de columna granular: influencia de la polidispersidad en la movilidad y velocidad

Oscar Polanía^{1,2*}, Nicolás Estrada², Miguel Cabrera^{2,3}, Mathieu Renouf¹, Emilien Azéma^{1,4}

¹ LMGC, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier, France

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá D.C., Colombia

³ Department of Geoscience & Engineering, TU Delft, 5048, Stevinweg 1, Delft, The Netherlands

⁴ Institut Universitaire de France (IUF), Paris

Los flujos granulares se encuentran en procesos geofísicos como deslizamientos de tierra o los flujos piroclásticos. Estos flujos pueden ser subaéreos o se pueden producir en un entorno de fluidos viscosos, pueden alcanzar grandes distancias y desarrollar una gran velocidad de propagación, provocando pérdidas económicas y humanas. Una característica entre los flujos es la presencia de partículas de diferentes tamaños, característica conocida como polidispersidad. En los flujos granulares, es importante comprender la cinemática de éstos y el papel que tiene en ellos una variable como la distribución granulométrica (GSD, en inglés *Grain Size Distribution*). Un experimento de referencia para estudiar flujos de manera simplificada es el colapso de una columna granular [1 - 4]. En esta configuración, el flujo es producido por el colapso de la columna por su propio peso y tiene una única dirección principal (ver Figura 1.). Entender el papel que tiene la polidispersidad en flujos sumergidos sigue siendo un gran reto porque las interacciones hidrodinámicas aumentan con el incremento de la polidispersidad [5]. Nuestra investigación se centra en explorar la influencia que tiene la polidispersidad en el colapso y en la movilidad de columnas granulares sumergidas. En un estudio previo con simulaciones bidimensionales, encontramos que la movilidad es proporcional a la energía cinética del frente de propagación, ponderada por la relación entre la densidad de las partículas y la diferencia entre la densidad de las partículas y el fluido [6]. Esta proporción evidencia el efecto de la polidispersidad en los flujos granulares y sugiere que la fracción de empaquetamiento, controlada por el nivel de polidispersidad, es un parámetro clave. En el presente estudio evaluamos experimentalmente si esta relación sigue siendo válida. Para ello, variamos el sistema granular de la columna con diferentes GSD, variando la relación entre la partícula más grande y la más pequeña entre 1 a 20. Además de la novedad del uso de diferentes GSD, nuestro montaje experimental está instrumentado con una red de sensores de presión de poros basales y laterales. Las observaciones combinadas de la secuencia de colapso y las variaciones de la presión de poro interna proporcionan una nueva visión de la cinemática de colapso de flujos sumergidos y establece un entorno ideal para probar el modelo antes mencionado.

Referencias

- [1] Lajeunesse, E., Monnier, J. B., & Homsy, G. M. (2005). Granular slumping on a horizontal surface. *Physics of fluids*, 17(10) 103302.
- [2] Pinzon, G., & Cabrera, M. (2019). Planar collapse of a submerged granular column. *Physics of Fluids*, 31(8), 086603.
- [3] Rondon, L., Pouliquen, O., & Aussillous, P. (2011). Granular collapse in a fluid: role of the initial volume fraction. *Physics of Fluids*, 23(7), 073301.
- [4] Bougouin, A., & Lacaze, L. (2018). Granular collapse in a fluid: Different flow regimes for an initially dense-packing. *Physical Review Fluids*, 3(6), 064305.

* Correspondencia: os.polaniao@uniandes.edu.co

- [5] Cabrera, M., & Estrada, N. (2021). Is the grain size distribution a key parameter for explaining the long runout of granular avalanches?. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(9), e2021JB022589.
- [6] Polania, O., Cabrera M, Renouf M., & Azéma E. (2022). Collapse of dry and immersed polydisperse granular columns: an unified runout description. *Physical Review Fluids*, Accepted.

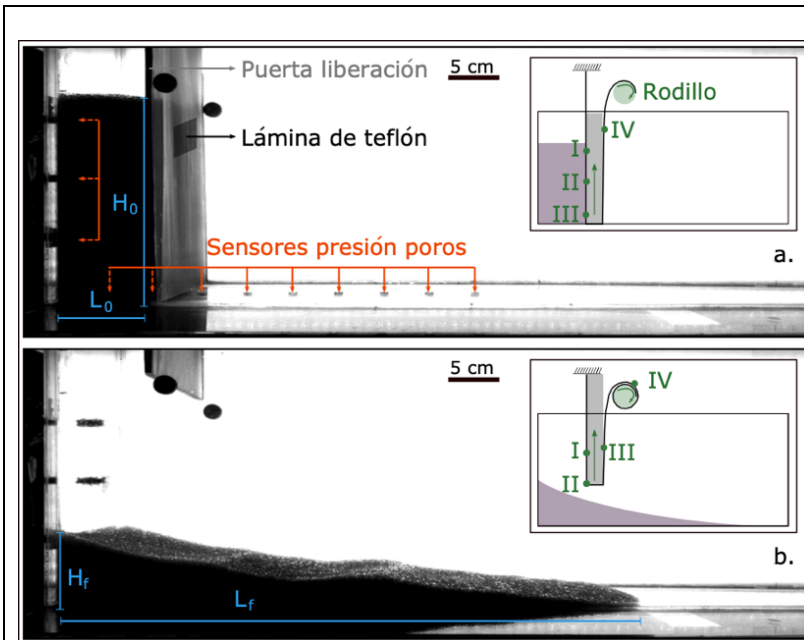


Figura 1. Columna granular con una longitud inicial $L_0 = 8,5$ cm y una altura inicial $H_0 = 25$ cm (a.), y después del colapso con una longitud final $L_f = 53$ cm y una altura final $H_f = 7,5$ cm (b.). Los recuadros internos muestran un esquema del mecanismo de liberación. La compuerta de liberación está cubierta con una fina lámina de teflón de bajo coeficiente de fricción que está fijada en un lado y unida a un rodillo en el otro. Sólo la lámina de teflón está en contacto con la columna granular (puntos I, II y III de la figura 1 (a.)). En esta configuración, mientras se tira de la compuerta no hay desplazamiento relativo entre la compuerta y las partículas.

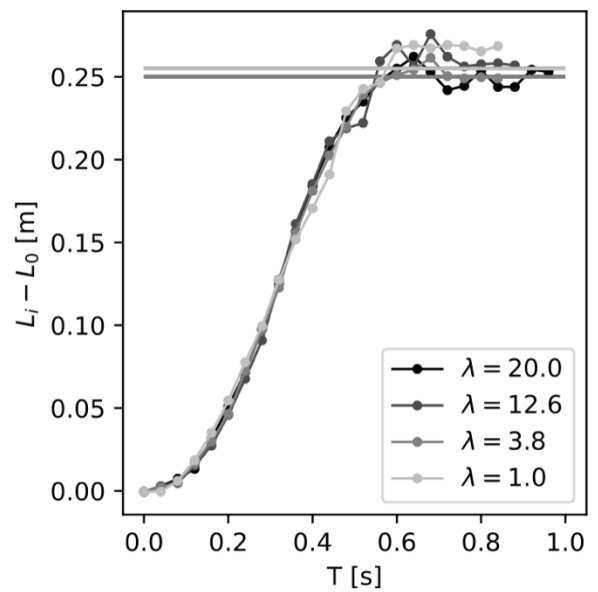


Figura 2. Evolución de la posición del frente del colapso en columnas secas con relación de aspecto $A = 1$, para cuatro niveles de polidispersidad. Resultado obtenido a partir del análisis digital de imágenes. Las líneas horizontales muestran la medida directa de L_f tomada en laboratorio.

Formación de grandes fisuras atribuibles al asentamiento de suelos finos ante la presencia de un montículo en la roca basal en experimentación con maquina centrifuga

Yeny Katherine Jiménez Beltrán^{1*}, Catalina Lozada López^{2*}

Departamento de ingeniería Civil y ambiental, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Universidad), Colombia.

En la literatura se han registrado diferentes mecanismos o modelos de propagación de grietas, ahora bien, debido a la complejidad del problema, en la actualidad no existe una metodología con la cual sea posible predecir con exactitud el lugar exacto donde va a surgir una grieta y la dirección de propagación. Aun así, existen factores geológicos que determinan la formación de grietas de gran longitud en suelos finos ante la presencia de montículos en la roca basal, las cuales están relacionadas con el asentamientos diferenciales en el suelo [1] [2].

Este trabajo estudia el proceso de formación de fisuras derivadas de la aparición de esfuerzos diferenciales en suelos finos ante la presencia de un montículo en la roca basal; esto se produce debido a que el proceso de consolidación sobre la cúspide del montículo (h_2) es mucho menor que en el fondo de la cuenca (h_1) (ver Figura 1- a).

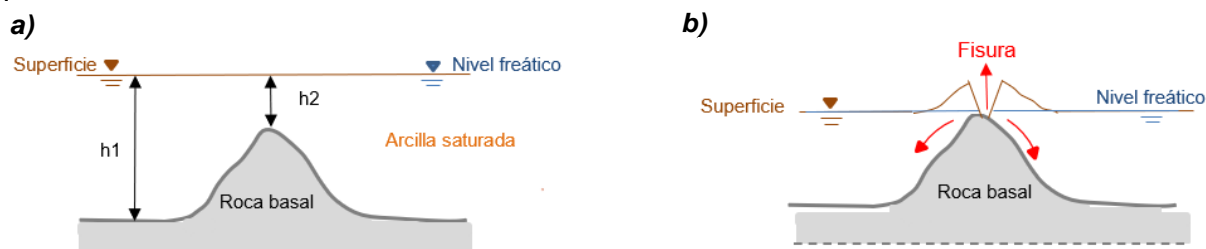


Figura 1- a) Agrietamiento asociado a la presencia de un montículo sepultado en el fondo de un estrato arcilloso b) Fisura vertical. Adaptado de [2].

De acuerdo con la teoría de la consolidación se tiene que:

$$\nabla H = H_0 \left(\frac{\nabla e}{1 + e_0} \right) \quad (1)$$

Donde:

∇H = Asentamiento debido a la consolidación.

H_0 = Espesor de la capa de arcilla que se consolida.

∇e = Cambio de los vacíos debido a la carga impuesta.

e_0 = Relación de vacíos inicial.

∇H depende del espesor de la arcilla que se está consolidando, en consecuencia, como se observa en la ecuación (1), entre mayor es el valor de H_0 el asentamiento aumenta. En consecuencia, cuando se disminuye el volumen de los poros, las alturas h_1 y h_2 reducen su tamaño, pero el lado donde esta h_1 se consolida más que donde esta h_2 , produciendo así esfuerzos horizontales de tensión hacia ambos lados de la cúspide y ligeros esfuerzos cortantes por la deformación diferencial sobre las laderas del montículo, por lo tanto, el suelo que se encuentra al pie del montículo arrastra el suelo ubicado en la cima originando esfuerzos de tensión que producen una fisura vertical como se puede observar en la Figura 1-b.

A partir de lo anteriormente mencionado surge el siguiente interrogante: ¿Cómo se correlaciona el origen de grandes fisuras atribuibles al asentamiento en suelo finos con la existencia de un montículo en la roca madre?; a fin de dar solución a esta pregunta se realizaron modelos físicos en la centrifuga geotécnica de la Escuela colombiana de Ingeniería Julio Garavito, con la siguiente metodología:

* Correspondencia: yeny.jimenez@mail.escuelaing.edu.co catalina.lozada@escuelaing.edu.co

Para realizar la simulación física se elaboraron modelos según la geometría indicada en la Figura 2-a, en los cuales la roca basal se elaboró en aluminio a diferentes alturas ($h_2 = 2.5, 3.5, 4$ y 4.5 cm) con perforaciones con el fin de permitir la consolidación del suelo fino, el cual correspondió a un diseño de mezcla de 100% caolín al cual se le adiciono agua hasta 1.5 veces el límite líquido, logrando una textura homogénea. Seguidamente se consolidaron las muestras en consolidómetros automáticos aplicándoles escalones de carga hasta llegar a un esfuerzo neto de 30 kPa.

Posterior a la consolidación se modeló el suelo a una altura de $h_1 = 5.5$ cm y finalmente se llevaron las muestras a la centrifuga geotécnica a 50 gravedades, con el montaje de una cámara y un deformímetro (ver Figura 2-b) a fin de analizar los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

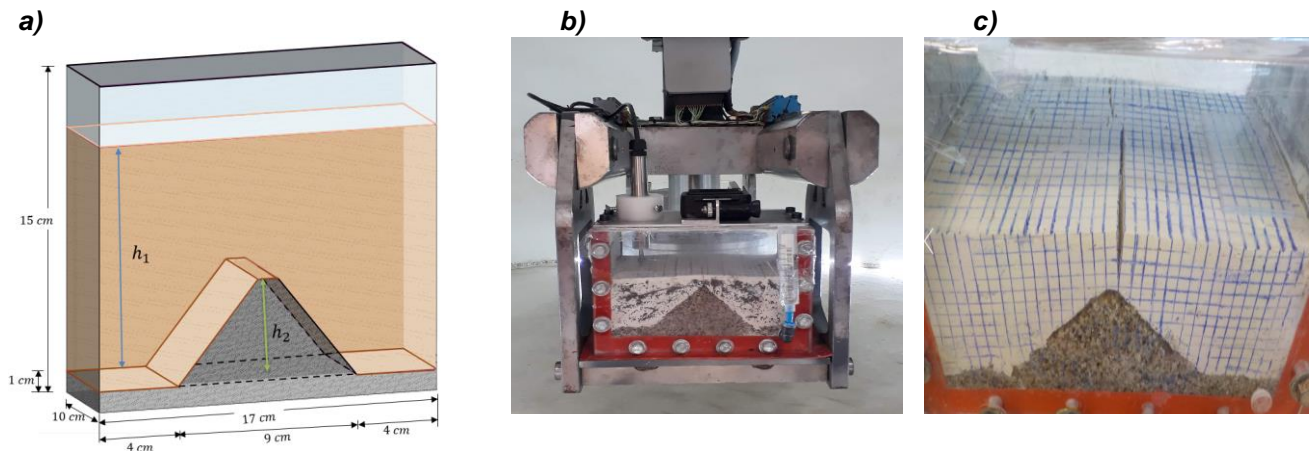


Figura 2- a) Variaciones del modelo a estudiar b) Ensayo en centrifuga Geotécnica c) Propagación de fisuras. Fuente propia.

A partir de las pruebas ya realizadas se puede inferir que las grietas en suelos finos se encuentran asociadas al asentamiento diferencial en zonas que se encuentran cerca de un montículo en el lecho rocoso, dando lugar a la propagación de fisuras de gran longitud.

La aparición de estas fisuras en la superficie terrestre generan un riesgo para los habitantes de las zonas afectadas, debido a que una vez ocurrida la grieta se inicia un proceso de meteorización y erosión, provocado por factores naturales y/o antrópicos detonantes de una multiplicidad de daños para la sociedad [3], por tanto es importante seguir estudiando el presente tema, en el cual se cambien factores como: la forma del montículo, el tipo de suelo, suelos heterogéneos, que fenómenos ocurren después de la formación de fisuras o el análisis ante la presencia de una edificación cercana a la propagación de la grieta.

Referencias

- [1] L. Vesga, L. Vallejo, and L. Guerrero, "DEM analysis of the crack propagation in brittle clays under uniaxial compression tests," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, no. octubre, pp. 1405–1415, 2008.
- [2] E. Barragán and J. Rodríguez, "Génesis y Mitigación del Agrietamiento del Subsuelo en el Suroriente del Valle de México," in *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica del 16 al 19 de marzo 2021*, 2021, p. 11.
- [3] E. Michelle, G. Auvinet, and U. Matus, "Caracterización de anomalías geotécnicas en las zonas lacustre y de transición de la ciudad de México," in *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, 2011, p. 8.

Evaluación de tiempos de equilibrado de la succión total en muestras compactadas de materiales granulares de subbase a partir de simulaciones numéricas

R. Utrera¹, V. Merchán^{2*} & A.E. Alvarez²

¹ Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia

² Grupo de Investigación en Materiales de Construcción y Estructuras (INME), Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander, Colombia

En este artículo se presentan los principales resultados relacionados con los tiempos de equilibrado de la succión total en probetas de material granular tipo subbase granular (SBG) compactadas en laboratorio. Estos tiempos de equilibrado son determinados a partir de simulaciones numéricas, que se llevan a cabo mediante el software Code_Bright [1] y la interfaz gráfica GID—utilizada para el preproceso y postproceso de los datos—. Este análisis es útil para estimar el tiempo requerido—con potenciales ahorros de tiempo en laboratorio respecto a los criterios habitualmente empleados, basados mayoritariamente en la evaluación de suelos arcillosos—para que un valor de succión total se establezca en todo el volumen de una probeta de SBG compactada por efectos de aplicación de trayectorias de humedecimiento o secado, para la evaluación posterior de rigidez mediante ensayo triaxial dinámico. De esta forma, se busca avanzar en la caracterización de materiales para estructuras de pavimento. En este trabajo, la preparación de los tres tipos de probetas evaluadas de SBG compactadas (20 cm de altura y 15 cm de diámetro) parte del desarrollo de curvas de compactación a partir de tres métodos: Proctor [2], giratorio [3], y por vibración [4]. En la Tabla 1, se presentan las principales propiedades índice del material de SBG, para el óptimo de compactación.

Tipo de probeta	Contenido de humedad (%)	Grado de saturación (%)	Porosidad	Índice de poros	Masa unitaria seca (g/cm ³)	Masa unitaria total (g/cm ³)	Succión total (KPa)
Proctor	8	75	0.22	0.28	2.02	2.18	563
Giratorio	8	69	0.23	0.30	1.98	2.14	320
Vibración	8	76	0.21	0.27	2.03	2.19	349

Tabla 1. Parámetros básicos de la curva de compactación utilizando diferentes métodos.

La medición de la succión total se realizó utilizando la técnica del papel filtro según el método de ensayo INV E 159-13 [2]. A partir de estos datos se ajustaron las curvas de retención del suelo, según la aproximación de Van Genuchten [5], para los tres tipos de probeta (ver ejemplo en la Figura 1 para probeta compactada aplicando el método Proctor). En relación con el modelo, los valores de permeabilidad requeridos se adoptaron entre 1E-04 cm/s y 1E-08 cm/s, para estudiar su influencia en el problema de flujo. Adicionalmente, los parámetros elásticos se incluyeron con base en los resultados de la medición de módulo resiliente sobre las probetas compactadas. Teniendo en cuenta que las probetas cilíndricas tienen un eje de axisimetría en dirección vertical, no es necesario simular todo su volumen, sino la mitad de una sección o corte vertical.

La Figura 2a presenta un ejemplo del modelo base para el análisis y en la Figura 2b se puede observar un ejemplo de la evolución del grado de saturación en una probeta que parte de un grado de saturación inicial de 97.4% (succión total S=100 kPa) y se somete a una trayectoria de secado lateral hasta alcanzar un grado de saturación de 76.4% (succión total=550 kPa) en un tiempo estimado de una hora. Los

* Correspondencia: vmerchan@uis.edu.co

resultados sugieren que los tiempos de equilibrado en probetas cilíndricas de material tipo SBG varían entre una hora y 24 horas dependiendo de la trayectoria seguida y de la conductividad hidráulica. Estos resultados sugieren que para materiales tipo SBG no se requieren tiempos de equilibrado importantes como en el caso de muestras arcillosas, que pueden tomar entre 7 y 15 días para equilibrar la succión total dentro del volumen de la probeta dependiendo de la conductividad hidráulica.

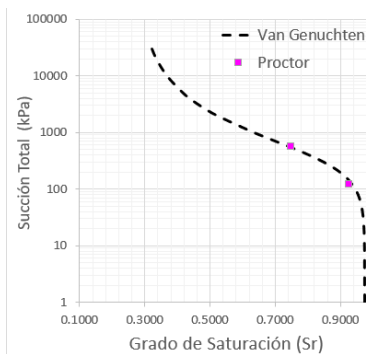


Figura 1. Determinación de la curva de retención con aproximación de Van Genuchten

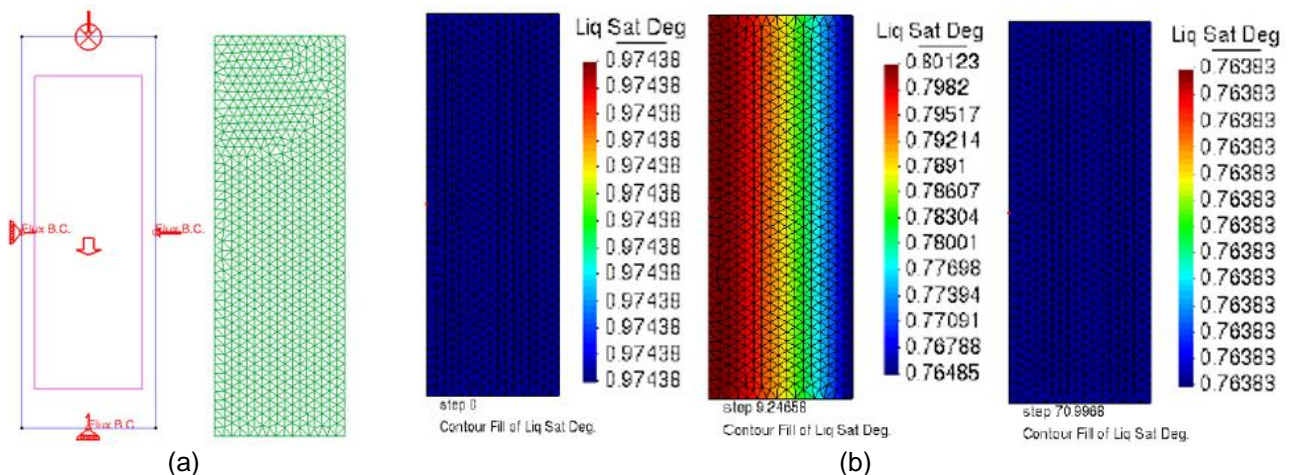


Figura 2. (a) modelo base de simulación y condiciones de frontera de desplazamiento y flujo, y (b) ejemplo de evolución del grado de saturación, en una probeta cilíndrica, en una trayectoria de secado, variando desde 100 kPa hasta 550 kPa de succión total en un tiempo estimado de 1 hora.

Referencias

- [1] Olivella, S., Gens, A., Carrera, J., & Alonso, E. (1996). Numerical Formulation for a Simulator (CODE_BRIGHT) for the Coupled Analysis of Saline Media. *Engineering computations*, 13(7), 87-112. doi:10.1108/02644409610151575
- [2] INVIAS. (2013). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Carreteras. Bogotá D.C.
- [3] Camacho Tauta, J. F., Reyes Ortiz, O. J., & Mendez Gonzales, D. F. (2007). Ensayo de Compactación Giratorio en Suelos como Alternativa al Ensayo de Compactación Proctor. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 67-81.
- [4] ASTM International. (2020). ASTM D7382-20: Standard Test Methods for Determination of Maximum Dry Unit Weight of Granular Soils Using a Vibrating Hammer. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [5] Van Genuchten, M. (1980). A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am.*, 44, 892-898.

Influencia de la distribución de carbonatos en el comportamiento mecánico de una arcilla cementada – Estudio experimental

Daniel F. Ruiz^{1*}, Jean Vaunat², Didier Virely³, Andry Razakamanantsoa³, Christophe Dano⁵

¹ Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia

² Departamento de Ingeniería del Terreno, Universitat Politècnica de Catalunya, España

³ Géotechnique et géomécanique, CEREMA, Francia

⁴ Département Géotechnique, environnement et risques naturels, Université Gustave Eiffel, Francia

⁵ 3SR Géomécanique Permanents, Université Grenoble Alpes, Francia

A través de este estudio experimental se abordan aspectos fundamentales del comportamiento mecánico de arcillas cementadas, centrándose en la cementación. Para abordar el efecto de la cementación, tanto en cantidad como distribución, se propone una metodología de generación de arcillas cementadas artificialmente.

En Colombia este tipo de formaciones predominantes en la cordillera oriental han sido el foco de investigación debido a numerosos procesos de inestabilidad. No existe un acuerdo total sobre la ubicación del límite entre suelos arcillosos duros y rocas arcillosas blandas, sin embargo, el comportamiento mecánico de estos materiales es el resultado de la combinación de la sedimentación, consolidación, procesos de carga/descarga y cementación [1]. El estudio sistemático del efecto de la cantidad y distribución de los agentes cementantes es de gran complejidad en formaciones naturales, ya que la precipitación y depositación de los de los carbonatos de calcio obedece a procesos geológicos. En formaciones naturales se ha establecido una relación directa entre la cantidad de cementante y la resistencia pico, sin embargo, la influencia de la distribución de estos minerales en la matriz arcillosa solo ha podido ser descrita cualitativamente [2,3].

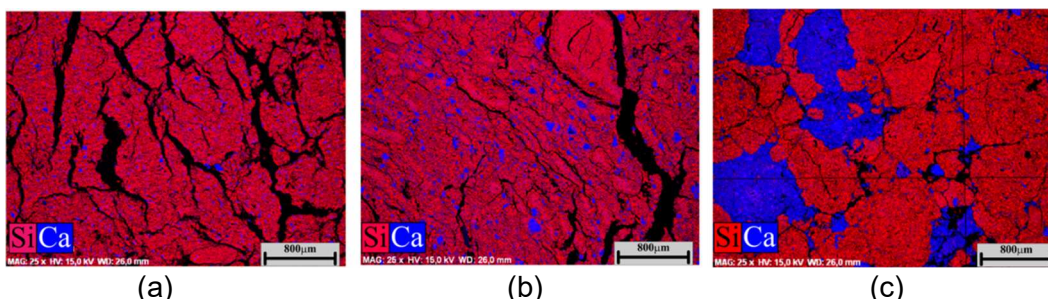


Figura 1. Microscopía electrónica de barrido (SEM) sobre arcilla no cementada (a), arcilla con distribución de carbonatos uniforme (b) y arcilla con distribución de carbonatos nodular (c).

Este estudio experimental consiste en la creación de diferentes distribuciones de cementación en muestras compactadas. Para este fin se ha utilizado como material base la arcilla de Merville, ubicada al norte de Francia, ya que cuenta con un porcentaje bajo de cementantes en estado natural (<3%). Tras el secado y triturado de la arcilla se desarrolló una metodología de generación de muestras con distribución uniforme y distribución nodular de cemento. La micro-visualización estructural, compuesta por micro-tomografías, μ XFR, SEM y MIP, permitió establecer la consistencia en la metodología de generación de muestras. En la **Figura 1** se muestra la microestructura de las arcillas ensayadas, teniendo el mismo contenido de cemento (10%) y una clara diferencia en su distribución.

* Correspondencia: dfruizr@eafit.edu.co

Los ensayos mecánicos consistieron en compresiones confinadas, compresión 1D y compresión triaxial. Algunos resultados demuestran que los módulos de elasticidad dependen directamente de la distribución de cementantes y que distribuciones uniformes de cementantes generan un comportamiento frágil (ver **Figura 2**). Las curvas de descarga en los ensayos edométricos indican que la degradación mecánica esta influenciada por el tamaño de los cementantes (ver **Figura 3**).

La modelación constitutiva de estos materiales deberá contemplar aspectos básicos como la cantidad de cementante y características microestructurales asociadas a su distribución.

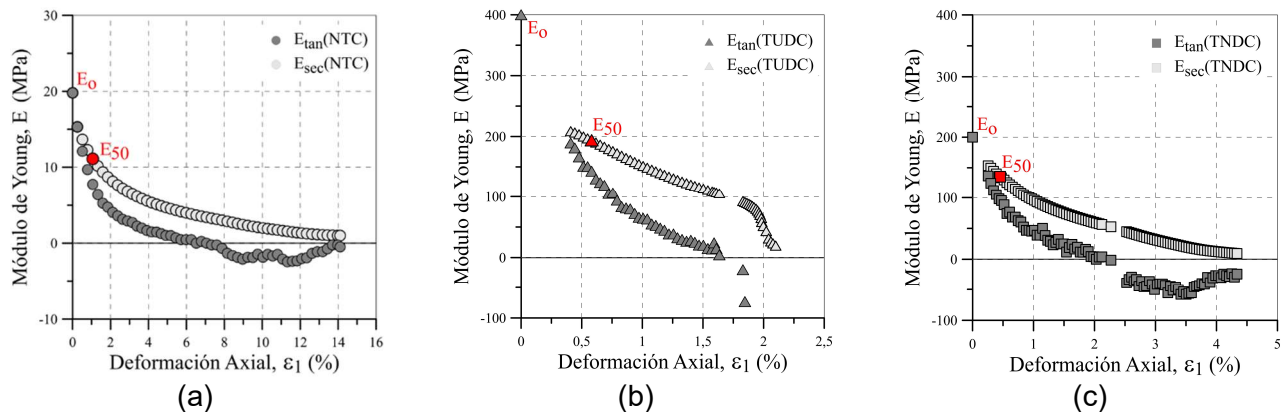


Figura 2. Módulos de elasticidad sobre arcilla no cementada (a), arcilla con distribución de carbonatos uniforme (b) y arcilla con distribución de carbonatos nodular (c).

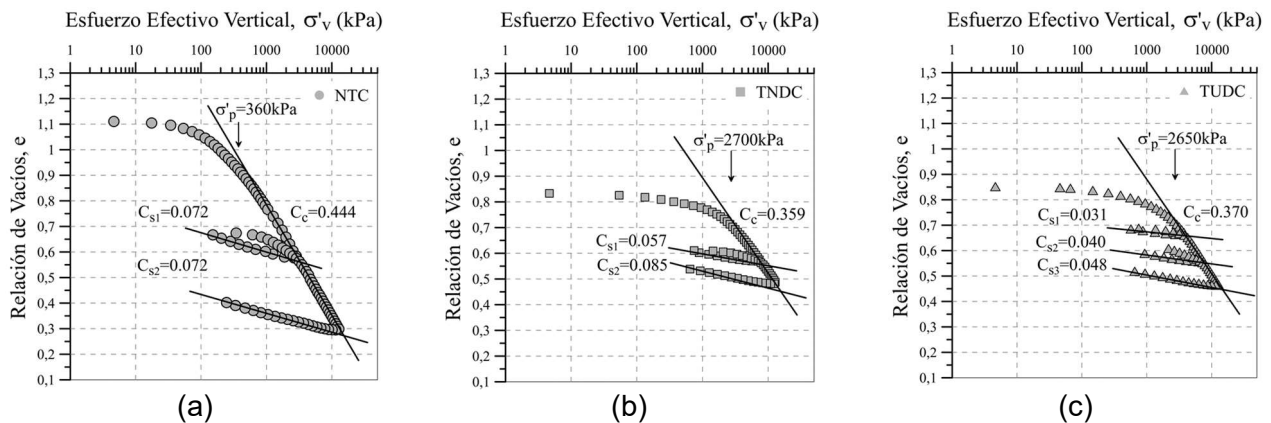


Figura 3. Curvas de compresibilidad sobre arcilla no cementada (a), arcilla con distribución de carbonatos uniforme (b) y arcilla con distribución de carbonatos nodular (c).

Referencias

- [1] Gens, A. (2011). *On the hydromechanical behaviour of argillaceous hard soils-weak rocks*. Keynote Lecture - 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: geotechnics of hard soils - weak rocks, 71-118.
- [2] Klinkenberg, M., Kaufhold, S., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2009). Influence of carbonate microfabrics on the failure strength of claystones, *Engineering Geology*, Volume 107(1-2), 42-54.
- [3] Kaufhold, S., Gräsele, W., Plischke, I., Dohrmann, R., & Siegesmund, S. (2013). Influence of carbonate content and micro fabrics on the failure strength of the sandy facies of the Opalinus Clay from Mont Terri (Underground Rock Laboratory), *Engineering Geology*, Volume 156(1), 111-118.

Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa utilizando el método de elementos Discretos

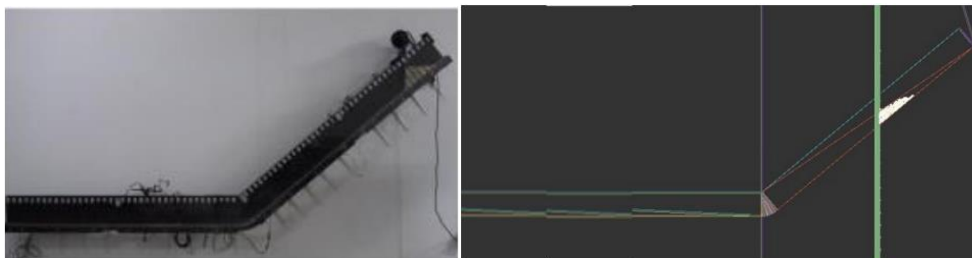
Nicolás Cifuentes Cruz¹, Mauricio Alberto Tapias Camacho², Daniel Román Quintero³
^{1,2,3} Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

La investigación actual se basa en la aplicación del método de los elementos discretos (DEM, por sus siglas en inglés *Distinct Element Method*), el cual es una herramienta de modelación numérica que describe el comportamiento de materiales a partir del análisis de partículas individuales que interactúan entre sí [1]. Con la utilización de este método se busca analizar la influencia que tiene la variación en la morfología del talud en las distancias longitudinales de viaje de los movimientos en masa. El método numérico fue calibrado a partir de resultados obtenidos de un montaje de experimental realizado por Román (2017) [2], donde se analiza la distancia de viaje de materiales granulares a través de un canal.

El trabajo realizado es la presentación como trabajo final de grado en ingeniería civil [3] y está enmarcada bajo la *convocatoria 852 de 2019 del Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Geociencias*, MinCiencias, Colombia. La herramienta computacional utilizada es el software open source YADE DEM, el cual es empleado en el sistema operativo Ubuntu. El método de elementos discretos ha cobrado fuerza en la rama geotécnica desde finales de la década de 1970, donde hasta hoy en día se ha tenido en cuenta en diversas investigaciones del comportamiento de materiales granulares como arenas, gravas y escolleras [4].

El montaje experimental con que se calibró los resultados de la investigación fueron obtenidos de la tesis de maestría *"Modelamiento del fenómeno de remoción de masas mediante la implementación de un modelo de deslizamiento en bloque"* [2]. El material del montaje experimental generado en acrílico son esferas de polietileno con diámetro de 6 mm. Este trabajo se enfoca en la solución de 2 objetivos principales, el primero es determinar los parámetros óptimos para la calibración de métodos discretos en estimación de distancias de viaje; el segundo es analizar por medio de métodos discretos cómo las variaciones de diferentes parámetros geométricos del talud influyen la distancia de viaje en los deslizamientos.

En cuanto a la metodología del trabajo, se empleó una adaptación del montaje experimental en el software de elementos discretos como se puede ver en la Figura 1. Luego se realizó un análisis de sensibilidad al método numérico, haciendo una variación de los parámetros: radio, módulo de elasticidad, ángulo de fricción y amortiguamiento. Finalmente se escogió la simulación con los parámetros que mejor se ajustaron a los resultados experimentales, y se realizaron las diferentes pruebas de variación de la morfología del talud y se analizó la distancia de viaje para cada caso.



* Correspondencia: ncifuentesc@unal.edu.co - matapiasc@unal.edu.co

Figura 1. Comparación entre el montaje experimental [2] y la simulación numérica DEM usando el software YADE. En el modelo, la sección de rampa tiene una altura de caída de 1 m con una inclinación de 40° y una sección de reposo de 2m.

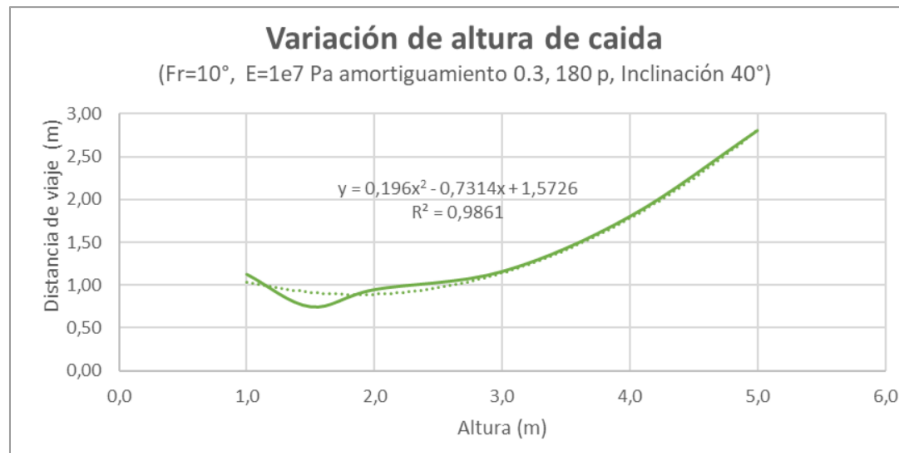


Figura 2. Resultados en la variación de la distancia de viaje con respecto a la altura de caída para el caso de la muestra calibrada (Número de partículas = 180).

Los resultados obtenidos muestran una calibración satisfactoria del método numérico frente a los resultados del montaje experimental. En el análisis de las distancias de viaje con variaciones de parámetros morfométricos se brindan respuestas coherentes. Las conclusiones muestran una relación parabólica a medida que aumenta la altura del talud (Figura 2). Con respecto a la inclinación del talud, la distancia de viaje es máxima alrededor de los 45°.

Con este trabajo se espera promover la investigación de la aplicación del método de elementos discretos en investigaciones de geotecnia en Colombia, con leyes físicas más completas en casos más retadores. Y en cuanto al ámbito técnico se espera que los resultados brinden más esclarecimiento al análisis de distancias de viaje en movimientos de masa.

Referencias

- [1] Cundall, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, 47- 65.
- [2] Román, D. C. (2017). Análisis experimental del movimiento del fenómeno de remoción de masas en materiales granulares. Bucaramanga. Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- [3] Cifuentes, N.D. (2022). Evaluación de la distancia de viaje de movimientos en masa para materiales granulares utilizando DEM (Método de Elementos Discretos). Trabajo Final de Grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [4] Tapias, M., Alonso, E.E., Gili, J. (2015). A particle model for rockfill behaviour. *Geotechnique* 65 (12), 975–994.

Interacción entre el sismómetro SEIS de la misión InSight y un análogo de regolito marciano

Juan-Pablo Castillo Betancourt^{1*}, Bernardo Caicedo Hormaza², Pierre Delage³

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ML753), Universidad de los Andes (Bogotá), Colombia

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (ML775), Universidad de los Andes (Bogotá), Colombia

³ Laboratoire Navier, CERMES (B115), École des Ponts ParisTech (Champs-sur-Marne), Francia

En este trabajo experimental de alta precisión se estudió desde la perspectiva de la mecánica de suelos la interacción entre el pie del instrumento SEIS (Seismic Experiment for interior Structure) y la superficie de Marte. SEIS es uno de los tres principales instrumentos desplegados por la misión Mars InSight en Elysium Planitia, para estudiar la estructura interior y comprender mejor la historia de formación del planeta rojo. El instrumento es el primero de su tipo en ser desplegado directamente en contacto con el suelo de superficie o regolito marciano (ver figura 1), y es extremadamente preciso como resultado de desarrollo durante dos décadas por múltiples instituciones incluyendo al CNES (Centre National d'Études Spatiales) y al IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris) [1]. El problema es abordado desde una perspectiva experimental, empleando como material un suelo similar (simulante o análogo) en varios aspectos al material existente en la superficie de marte (regolito marciano).



Figura 1. El instrumento SEIS durante su despliegue en la superficie de Marte, Sol 22. (Image Credit: NASA/JPL-Caltech)

SEIS se soporta en la estructura de nivelación conocida como LVL, que es capaz de nivelarle en pendientes de hasta 15°, y que se apoya sobre el regolito marciano en un sistema de tres pies. Estos pies consisten en un disco de 60 mm de diámetro con un cono de 20 mm de altura en su centro, y fueron diseñados por el grupo CERMES del Laboratoire Navier en la École des Ponts ParisTech [2]. En este trabajo se utiliza un material seleccionado como una mejor versión de regolito marciano en base a medidas del regolito en el sitio del aterrizaje como la Inercia Térmica, realizadas desde órbita y recientemente confirmadas in-situ; actualizaciones de la historia de formación del material del sitio determinada por los geólogos de la misión también apoyan la selección de este material. El suelo empleado como análogo es la arena de Fontainebleau en su granulometría NE34, y fue empleado en un dispositivo experimental similar al empleado durante la fase de diseño de los pies del instrumento. Este montaje fue mejorado con instrumentación de alta precisión para determinar adecuadamente la constante elástica de esta interacción, información de relevancia para el equipo de la misión en la

* Correspondencia: jp.castillo11@uniandes.edu.co

interpretación de las señales captadas. Además del sistema original del pie de SEIS, disponible en la ENPC, una serie de numerosos ensayos con un disco del mismo diámetro fueron realizados para apoyar la interpretación y repetibilidad. Las medidas de módulo se obtuvieron en ciclos de descarga-recarga realizados a valores de esfuerzo de interés, interpretados en base a teorías basadas en la elasticidad. La amplitud en desplazamiento de estos ciclos es reducida para aproximar estos ciclos como un proceso elástico; la indentación máxima del ensayo es comparable a tres diámetros del grano de material, y la amplitud de los ciclos realizados es cercana a $2 \mu\text{m}$. (ver figura 2). La interpretación de resultados se apoya en algunas herramientas de la elasticidad, además de en verificaciones con Elementos Finitos y otras herramientas numéricas [3].

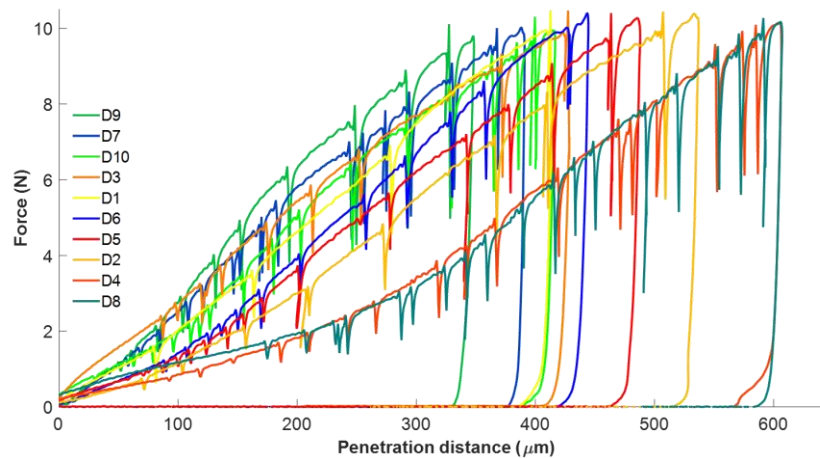


Figura 2. Procedimiento de carga/descarga realizado en los diferentes ensayos de la actividad experimental.

El rango de esfuerzos y deformaciones bajos abordado durante este trabajo constituye también un área poco explorada, de forma que los resultados obtenidos (principalmente en términos de la evolución del módulo en función del esfuerzo) son de interés no solo para el caso de los 20 MPa obtenidos como valor de resultado para el caso de Mars InSight, sino para la mecánica de suelos en cualquier problema que pueda involucrar estos esfuerzos tan pequeños (menores incluso a 5 kPa).

Referencias

- [1] Lognonné, P., Banerdt, W. B., Giardini, D., Pike, et al. (2019). SEIS: insight's seismic experiment for internal structure of Mars. *Space Sci. Rev.* 215, No. 1, 12–182, <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0574-6>.
- [2] Karakostas, F., Delage, P., De Laure, E., Dhemaied, A., Dupla, J. C., Tang, A. M. & Cui, Y. J. (2013). The geotechnical properties of some Mars regolith simulants and their interaction with the SEIS foot. In-house research report prepared for Institut de Physique du Globe de Paris. Paris, France: Ecole des Ponts ParisTech.
- [3] Sneddon, I. N. (1946). Boussinesq's problem for a flat-ended cylinder. *Math. Proc. Cambridge Phil. Soc.* 42, No. 1, 29–39, <https://doi.org/10.1017/S0305004100022702>.

Comportamiento de acantilados blandos tropicales ante sollicitaciones cíclicas de las olas

S. Montoya-Noguera^{1*}, A. Amaya-Saldarriaga¹, J.-F. Paniagua-Arroyave¹, W. Valles-Bedoya¹
¹ Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Colombia

El ensayo triaxial cíclico permite determinar las curvas de degradación del módulo de corte para cuarenta ciclos de distintos niveles de deformación de corte. Estas curvas son luego utilizadas en la ingeniería geotécnica sísmica para evaluar el efecto del suelo sobre la propagación de una onda sísmica con modelos lineal-equivalentes del suelo [1]. Sin embargo, estos modelos asumen un comportamiento histerético, es decir que, para cada ciclo a una misma deformación de corte, el suelo seguirá la misma relación esfuerzo-deformación, sin importar el número de ciclos. Por el contrario, en los suelos se genera una acumulación de deformaciones plásticas a medida que aumentan los ciclos, fenómeno que se conoce como fatiga [2]. Los niveles de esfuerzos desviadores, q , impuestos sobre los acantilados debido al oleaje del mar son bajos (~15 a 25 kPa, según la altura de la ola), con esfuerzos de confinamientos bajos (~20 kPa, según la altura del acantilado). Sin embargo, el número de olas se traduce a un número considerable de ciclos, e.g., para olas típicas del Caribe colombiano de 8 segundos de periodo (i.e. $f = 0.125$ Hz) se tendrían 10,800 ciclos por día o 3'942,000 por año. La dinámica de erosión cercana a la costa a lo largo de acantilados costeros está relacionada con el comportamiento mecánico de los suelos que los conforman [3]. Realizamos unas campañas de exploración de campo en las lutitas grises de los acantilados tropicales blandos de Arboletes (ver Figura 1), en la Costa Caribe colombiana, para profundizar nuestra comprensión de los mecanismos de retroceso.



Figura 1. Bahía de Arboletes en Antioquia, Colombia: (a) Extracción de muestras de cajón sobre los acantilados, (b) fotografía Norte a Sur de los acantilados, y (c) Mapa de la bahía y ubicación de los sitios A y B. Mapa tomado de Google.

* Correspondencia: smontoyan@eafit.edu.co

Se tomaron muestras de cajón en dos lugares que denominamos Sitio A y Sitio B. El sitio A se clasifica como CH y el sitio B como CL según la tabla de plasticidad de Casagrande (Figura 2a). Aunque, el contenido de limos en el sitio A es de 77%, mayor que el contenido de arcillas, de 22% (Figura 2b). Aunque los sitios costeros son cercanos, los límites de Atterberg y la clasificación son diferentes. Estas diferencias afectan el comportamiento de corte a grandes deformaciones en ensayos triaxiales monotónicos (Figura 2c). En cuanto al comportamiento ante sollicitaciones cíclicas, las curvas de reducción del módulo de corte obtenidas en ensayos triaxiales cíclicos para los dos sitios son similares (Figura 2d). Sin embargo, a frecuencias y amplitudes bajas ($f=0.125\text{Hz}$ y $q=20\text{kPa}$), a medida que aumenta el número de ciclos se presenta un aumento en el módulo de corte (Figura 2e) y una reducción en la tasa de deformación plástica acumulada en condiciones no saturadas.

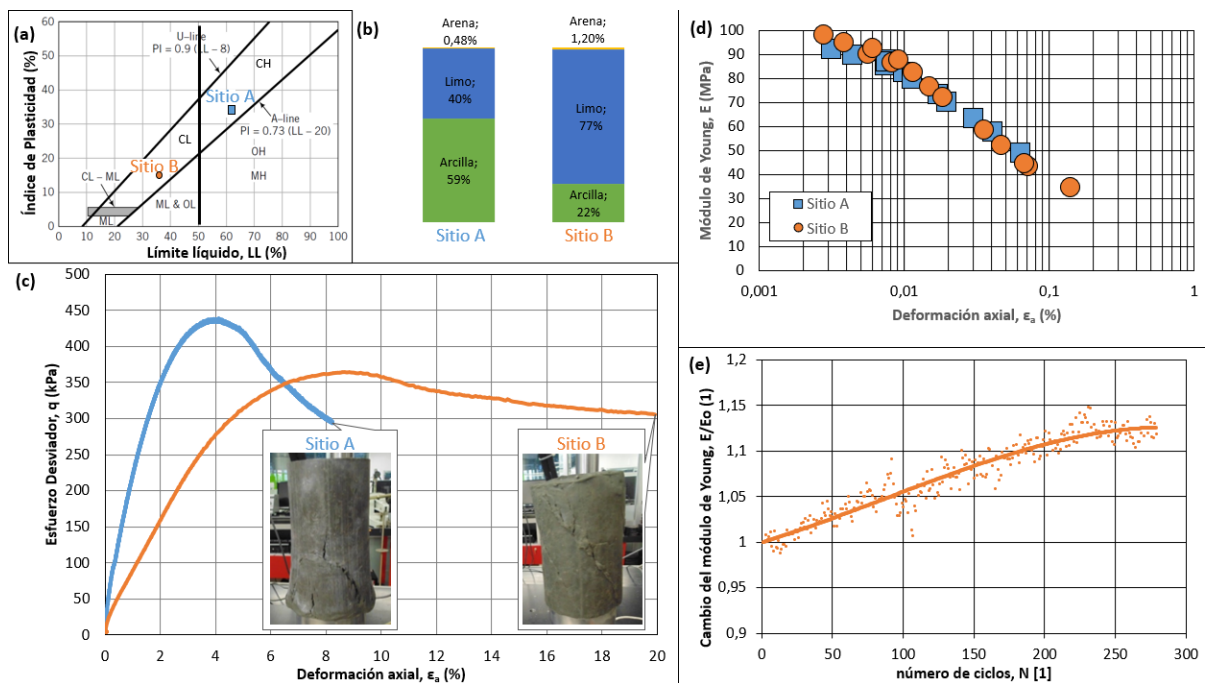


Figura 2. Ensayos en el Sitio A y Sitio B: (a) Carta de plasticidad, (b) distribución granulométrica, y ensayo triaxial CU (c) monotónico, (d) cíclico a 40 ciclos, y (e) cíclico a 270 ciclos, a humedad natural y esfuerzo de confinamiento de 20 kPa.

Estos resultados sugieren que los acantilados de Arboletes se rigidizan por el efecto de las olas. Esto podría llevar a la formación de grietas en la estructura macroscópica del acantilado, lo que contribuiría a los procesos de erosión costera. En el futuro, se pretende incluir el efecto del humedecimiento y secado. Asimismo, se propone realizar más campañas de exploración de campo y de laboratorio para incluir más sitios y más ensayos a lo largo de los acantilados.

Referencias

- [1] Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer. DOI: [10.1007/978-3-540-35783-4](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35783-4)
- [2] Ahnberg, H. y Larsson, R. (2012), 'Strength degradation of clay due to cyclic loadings and enforced deformation', Report No. 75, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, 142 p.
- [3] Paniagua-Arroyave, J. F., Correa, I. D., Anfuso, G., & Adams, P. N. (2018). Soft-cliff retreat in a tropical coast: the Minuto de Dios sector, Caribbean Coast of Colombia. *Journal of Coastal Research*, (81 (10081)), 40-49. DOI: [10.2112/SI81-006.1](https://doi.org/10.2112/SI81-006.1)

3.5 Confiabilidad en geotecnia

Entendiendo la variabilidad de las propiedades geotécnicas a través de los procesos de formación geológica y sus implicaciones en los diseños probabilísticos

Juan C Viviescas^{1,2*}

¹ Coordinador de diseño geotécnico, Concreto, Colombia

² Profesor de cátedra para la especialización en geotecnia y estabilidad de taludes, Universidad de Medellín, Colombia

RESUMEN

El suelo es uno de los materiales más variables de la naturaleza, lo que explica las importantes incertidumbres entre los diseños geotécnicos y el comportamiento real de las estructuras [1]. En los últimos años se ha evidenciado un gran interés en la evaluación de la variabilidad de las propiedades geotécnicas y su influencia en los diseños probabilísticos[2]. Las características estadísticas (e. g. desviación estándar y coeficiente de variación) de las propiedades geotécnicas ha sido comúnmente estudiada para suelos con condiciones granulométricas similares [3]. Sin embargo, la variabilidad de los suelos va más allá de determinar la media y desviación estándar, sino en definir el modelo probabilístico que mejor represente la variabilidad de la propiedad geotécnica por medio de las funciones de densidad de probabilidad, análisis de tendencia y variabilidad espacial (Elementos finitos aleatorios)[4]–[6] (Ver figura 1). La definición acertada de los modelos estadísticos de variabilidad no solo representará adecuadamente el comportamiento de los materiales, sino que permitirá definir de una manera más realista la probabilidad de falla en los modelos basados en confiabilidad. Este trabajo explicará como los procesos de formación geológica de depósitos tipo flujo de lodos, suelos residuales y suelos sedimentarios influye en la variabilidad y en la definición del modelo estadístico de las propiedades geotécnicas por medio de una búsqueda bibliográfica de las propiedades de estas geologías. Con esta información se evaluará, en términos de los modelos probabilísticos de las propiedades, cual es el modelo más adecuado a trabajar de acuerdo con manto geológico y la implicación de esta elección en los diseños probabilísticos. La metodología de elección del modelo se basa en una clasificación de los aspectos más relevantes de la geología como son si es clasto o matriz soportado, es cohesivo o granular, y características principales del origen (origen dinámico o estacionario), y así poder relacionarlo con el modelo estadístico más afín. Se evidencia que los depósitos tipo flujo de lodos deben ser analizadas por medio de los elementos finitos aleatorios principalmente debido a la alta variabilidad espacial [7]. En cambio, los suelos residuales son altamente homogéneos en el espacio horizontal, pero presentan una marcada tendencia con profundidad de la resistencia debido a los cambios del estado meteorización que torna al suelo más rígido a medida que se acerca a la roca [8]. Por lo tanto, este trabajo permitirá evidenciar la importancia de la identificación geológica como un insumo fundamental para la caracterización estadística de las propiedades geotécnicas. Finalmente, esta evaluación dará pautas que permitirán hacer un uso adecuado de los recursos de exploración geotecnia para los diseños basados en confiabilidad, lo cual es uno de los aspectos que dificultan en gran medida el uso de la modelación estadística en la práctica geotécnica [9]–[11].

* Correspondencia: jviviescasr@concreto.com

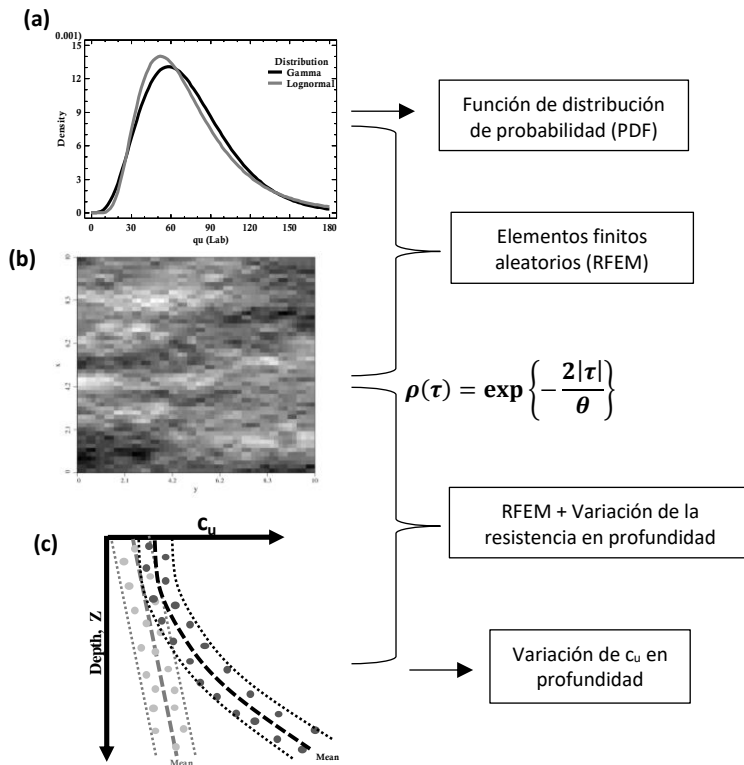


Figura 1. Modelos estadísticos de las propiedades comúnmente implementados en los diseños probabilísticos en ingeniería geotécnica. (a) Función de densidad de probabilidad, (b) campo aleatorio (variabilidad espacial) y (c) Función de variación de c_u en profundidad. Adaptado de [12].

Referencias

- [1] D. V. Griffiths and G. A. Fenton, "Seepage beneath water retaining structures founded on spatially random soil," *Géotechnique*, vol. 43, no. 4, pp. 577–587, 1993, doi: 10.1680/geot.1993.43.4.577.
- [2] K. K. Phoon, "The story of statistics in geotechnical engineering," *Georisk*, vol. 14, no. 1, pp. 3–25, 2020, doi: 10.1080/17499518.2019.1700423.
- [3] Kok-Kwang Phoon and Fred H Kulhawy. "Characterization of geotechnical variability". *Canadian Geotechnical Journal*. 36(4): 612-624, 1999. <https://doi.org/10.1139/t99-038>
- [4] M. A. Hicks and K. Samy, "Influence of heterogeneity on undrained clay slope stability," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 35, no. 1, pp. 41–49, 2002.
- [5] M. Lloret-Cabot, G. a. Fenton, and M. a. Hicks, "On the estimation of scale of fluctuation in geostatistics," *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 8, no. 2, 2014, doi: 10.1080/17499518.2013.871189.
- [6] J. C. Viviescas, J. P. Osorio, and C. Pastén, "Geological influence in the index properties variability and shear strength probability density functions.," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, pp. qjehg2020-093, May 2021, doi: 10.1144/qjehg2020-093.
- [7] J. C. Viviescas, D. v Griffiths, and J. P. Osorio, "Geological influence on the spatial variability of soils," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 00, no. 00, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1080/19386362.2021.1888509.
- [8] J. C. Viviescas, J. P. Osorio, and D. v. Griffiths, "Cluster analysis for the determination of the undrained strength tendency from SPT in mudflows and residual soils," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 78, no. 7, pp. 5039–5054, 2019, doi: 10.1007/s10064-019-01472-8.
- [9] S. Lacasse and F. Nadim, "Risk and Reliability in Geotechnical Engineering," in *Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1998, pp. 1172–1192.
- [10] K.-K. Phoon, *Reliability-Based Design In Geotechnical Engineering*, 1st. New York, EE.UU: Taylor & Francis Group, 2008.
- [11] G. B. Baecher and J. T. Christian, *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, vol. 1. 2003.
- [12] J. C. Viviescas & J. P. Osorio. *Geological origin as an input variable in reliability-based designs: for an accurate exploration in geotechnical engineering*. In: 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. 26 – 29 September 2021. Budapest, Hungary. Hungarian Geotechnical Society. 2021. DOI: 10.21427/A65N-T048

Un caso de análisis de confiabilidad en pilotes en suelos blandos.

Marlín C Acosta ^{1*}, Cesar A Hidalgo ²

¹ Facultad de ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

² Facultad de ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia

En este estudio se realizó un análisis de confiabilidad basado en métodos probabilísticos al comparar los resultados obtenidos del diseño de cimentaciones por la metodología de esfuerzos admisibles (ASD) y la metodología de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) con resultados de ensayos de carga dinámica en pilotes o pruebas PDA con el fin de saber cuál metodología ofrece más confiabilidad. El estudio realizado está enmarcado en la actual ubicación de la Sede Académico-Administrativa de la Universidad de Antioquia, la cual está localizada en la zona del Urabá a la entrada suroccidental del municipio Apartadó, Departamento de Antioquia, Colombia, al margen derecho sobre la vía a Carepa y en el cruce con la vía que conduce al Churidó [1].

El suelo de la zona de estudio se caracterizó de acuerdo con los resultados de ensayos geotécnicos de 6 perforaciones profundas realizadas plasmados en el estudio geotécnico realizado por la Universidad de Antioquia [1]. En las 6 perforaciones, se presentan datos de número de golpes para cada muestra recuperada. Fueron considerados tres casos con diferentes perfiles de suelo. Caso 1 con arcilla blanda en condiciones drenada, caso 2 con suelo granular en condición drenada y el caso 3 con suelo granular en condición drenada excluyendo los primeros 5.00 m del perfil debido a un posible fenómeno de licuefacción. Las variables tenidas en cuenta para los cálculos de capacidad de carga por los diferentes métodos de diseño fueron la cohesión no drenada S_u , ángulo de fricción remoldeado ϕ'_R y equivalente ϕ' , carga de la estructura Q y peso específico del suelo γ ; El valor de la media μ y la desviación estándar σ de las variables S_u , ϕ' y γ fueron calculados a partir de los resultados de campo; ϕ'_R fue definido a partir de referencias bibliográficas; y el valor de Q en la media es presentado a consideración del autor de este informe para efectuar los cálculos posteriores.

El principal objetivo del presente trabajo es evaluar la confiabilidad de cimentaciones profundas tipo pilotes considerando dos metodologías, diseño por esfuerzos admisibles (ASD) y de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD), Como hipótesis, se propone que la metodología LRFD ofrece mayor confiabilidad que la metodología de esfuerzos admisibles en el diseño de cimentaciones en suelos blandos.

Para el desarrollo de este trabajo primero se documenta el caso de estudio a través de la caracterización de los ensayos realizados y la delimitación de la zona de estudio. El caso de estudio se documentó a partir de la información base obtenida en la realización del estudio "Verificación de capacidad de carga de pilotes hincados en suelos blandos." De los ingenieros Hincapie et al [2]. En un aparte del estudio "Verificación de capacidad de carga de pilotes hincados en suelos blandos." se presentan resultados del proceso de hinca y de los ensayos dinámicos PDA de 365 pilotes (con sección hexagonal, 15.00 m de longitud y 0.40 m de diámetro) en suelos blandos característicos del Urabá Antioqueño. Tales ensayos dinámicos tipo PDA fueron suministrados para la realización este estudio. Se hizo una revisión de los ensayos de carga dinámica PDA y se tabuló la información pertinente. Luego se determinó la capacidad de carga Q_a usando los métodos deterministas: De Meyerhof, Vesic y Janbu para hallar capacidad de carga por punta del pilote; α y β para hallar capacidad de carga por fricción del pilote. Y usando los factores de seguridad/resistencia estipulados de acuerdo con las metodologías ASD y LRFD.

* Correspondencia: macosta673@soyudemedellin.edu.co

Posteriormente se modela el comportamiento de las estructuras de cimentación usando métodos probabilísticos para análisis de confiabilidad. La confiabilidad se evaluó a través de la comparación de probabilidades de falla utilizando los métodos First Order Second Moment (FOSM), Point Estimation (MEP) y Monte Carlo. En consecuencia, se realizarán los cálculos de los índices de confiabilidad por los diferentes métodos. A partir del cálculo de los valores de confiabilidad obtenidos por los diferentes métodos, se procede a analizar e interpretar los resultados obtenidos, tabularlos y realizar las comparaciones pertinentes, esto se hizo a partir de un procesamiento de datos estadístico en el cual se comparan los resultados obtenidos teniendo en cuenta los diferentes métodos de confiabilidad utilizados, las metodologías de diseño de cimentaciones LRFD y ASD y los ensayos de carga dinámica tipo PDA.

Los resultados de los factores de resistencia promedio obtenidos en este estudio, son presentados en la Tabla 1 junto con los factores de resistencia utilizados en la metodología LRFD y con el factor de seguridad de 3.00 manejado en la metodología ASD en Colombia, convertido a factor de resistencia con la relación inversa (1/3.00).

Factores de Resistencia FR						
Metodología	ASD Q-su	LRFD Q-su	FR promedio Q-su	ASD Q-pu	LRFD Q-pu	FR promedio Q-pu
Caso 1	0.33	0.35	0.44	0.33	0.30	7.16
Caso 2	0.33	0.25	0.39	0.33	0.30	0.72
Caso 3	0.33	0.25	0.57	0.33	0.30	0.72

Tabla 1 Tabla resumen de factor de resistencia FR.

Como se observa en los resultados de la Tabla 1 se aprecia que los FR promedio son en su totalidad valores superiores a los consolidados en la Norma Sismorresistente del 2010 NSR10 (vinculada a la metodología ASD) y en la norma de puentes del 2014 CCP14 (vinculada a la metodología LRFD), esto indica que las resistencias admisibles por fricción y por punta por ambas metodologías podrían estar subestimadas y podrían ser reducidas por un mayor factor de resistencia, es decir, podría aplicarse un menor factor de seguridad. Por otro lado también se obtuvo que los factores de resistencia obtenidos por la metodología ASD son en su mayoría más cercanos a los FR promedio (los factores de resistencia obtenidos a partir de las capacidades de carga evaluada en la media de las variables y de las capacidades de carga obtenidas en las pruebas PDA), bajo esta premisa, la metodología LRFD no necesariamente ofrece mayor confiabilidad que la metodología de ASD en el diseño de cimentaciones en suelos blandos.

Con respecto a posteriores investigaciones se sugiere abordar la metodología de estudio enfocada en otra zona para comparar los comportamientos de los factores de resistencia; también sería interesante realizar los cálculos de confiabilidad sustentando el comportamiento de las variables diferente a los comportamientos asumidos en este estudio.

Referencias

- [1] Universidad de Antioquia, «Informe de Suelos y Cimentaciones para la Sede Académico-Administrativa de la Universidad de Antioquia en el Municipio de Apartadó,» Medellín, 2013.
- [2] C. Hidalgo, W. Hincapié y E. Niño, «Verificación de capacidad de carga de pilotes hincados en suelos blandos,» Bogotá, 2014.

3.6 Exploración directa e indirecta del subsuelo

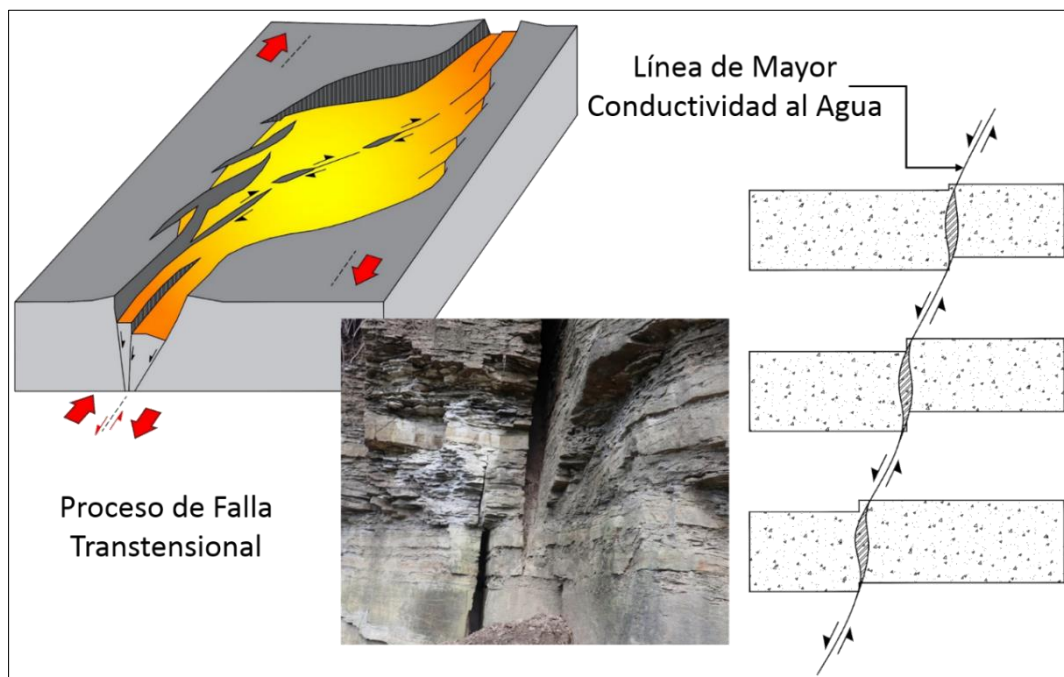
Efectos geotécnicos y caracterización mediante geofísica de las fallas geológicas jóvenes o secundarias

Jaime Suárez Díaz
Geotecnología SAS, Colombia

Es de común ocurrencia en Colombia la presencia de fallas geológicas jóvenes o secundarias, las cuales son difíciles de identificar y caracterizar en estudios geotécnicos y geológicos. La formación de estas fallas secundarias es común en procesos de levantamiento por subducción, donde se generan fallas principales, generalmente de tipo inverso por compresión, y fallas secundarias sin generar escarpes o cambios geomorfológicos significativos.

Las fallas secundarias son fallas locales, generalmente de pequeña escala, las cuales con frecuencia no se caracterizan en los estudios geológicos para obras de ingeniería, debido a que sus evidencias geomorfológicas son menores. Son fallas jóvenes, difíciles de identificar mediante fotogrametría y se requiere acudir a estudios de micro-tectónica, midiendo la densidad de los patrones de fracturación y/o utilizando ensayos geofísicos. Típicamente se mapean como “alineamientos geológicos”.

Proceso y línea preferencial de conductividad al agua subterránea en fallas transtensionales.



Fuente: Geotecnología.

* Correspondencia: jaimesuarezdiaz@gmail.com

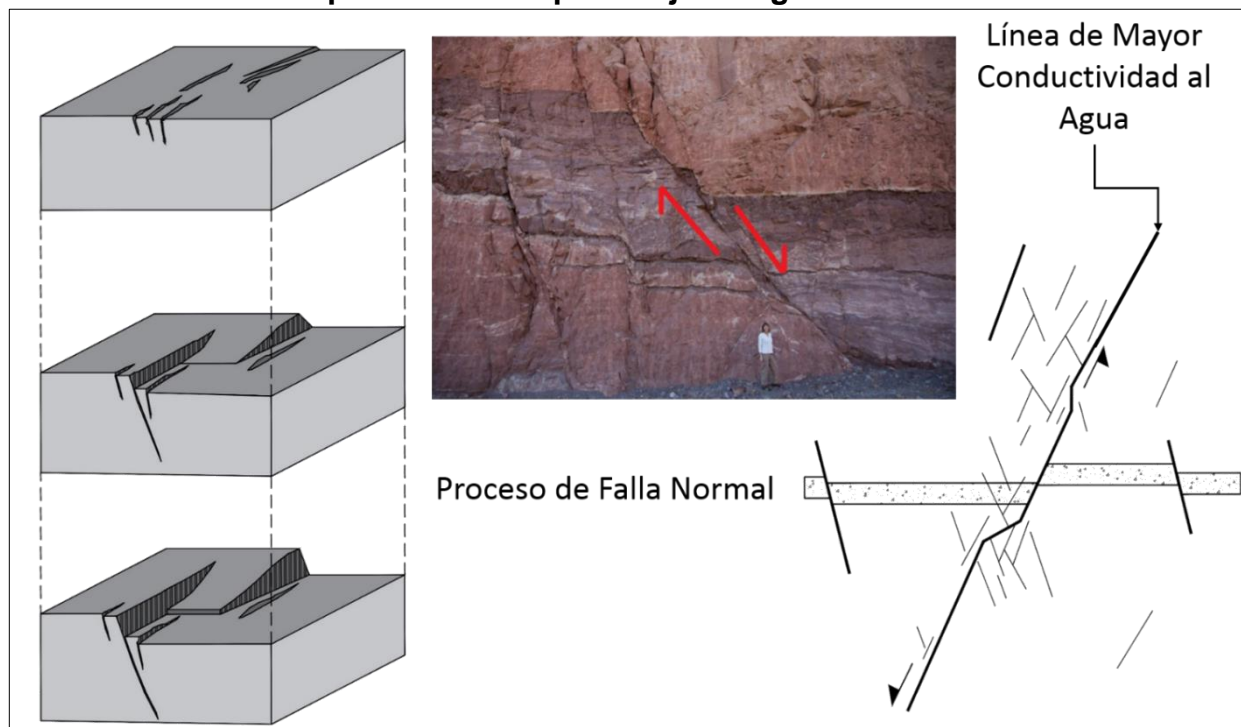
Entre las fallas secundarias se encuentran las fallas de rasgado o trans-tensionales, trans-presionales y familias de fallas normales. Las fallas trans-tensionales o de rasgado (“tear faults”) son fallas de tracción con componente de rumbo, las cuales se asocian con los cinturones de empuje y los ejes de pliegues (Twiss y otros, 1992); estas fallas son típicamente perpendiculares al frente de empuje y los ejes de pliegues.

A medida que avanza el frente de compresión se van formando fallas de rasgado, las cuales van segmentando las unidades de empuje. Las fallas de rasgado pueden ser el resultado de cambios laterales en el desplazamiento a medida que avanza el proceso de empuje. Las fallas de rasgado al cambiar de rumbo forman fallas trans-tensionales y de trans-presión.

Las fallas normales secundarias son el sub-producto de procesos geológicos de levantamiento regional o local; son familias de fallas semi-paralelas con desplazamientos verticales y de tensión, basculamiento y cambios en el tren estructural.

Las fallas secundarias generan zonas de mayor conductividad a corrientes de agua en el macizo rocoso, lo cual facilita la ocurrencia de concentraciones de corrientes de agua subterránea. Como resultado se pueden producir deslizamientos de tierra y formación de depósitos coluviales relacionados. La presencia de agua subterránea conjuntamente con la fracturación y deterioro de la roca relacionada con la presencia de la falla facilita la activación de deslizamientos.

Esquema del desarrollo de fallas normales jóvenes o secundarias y la formación de líneas preferenciales para flujo de agua subterránea.



Fuente: Geotecnología.

Efectos geotécnicos de las fallas secundarias

Ejemplo 1: Deslizamientos en las laderas nor-occidentales de Barranquilla.

En las laderas nor-occidentales de Barranquilla, Ingeominas (2001) identificó la presencia de un sistema de alineamientos de fallas geológicas normales, asociados al levantamiento tectónico de la terraza de Barranquilla. De gran importancia por sus efectos geotécnicos la falla denominada “Alineamiento de El Mirador”; Asociados a estas fallas se generan corrientes subterráneas y niveles freáticos colgados en las arcillas laminadas de la formación Perdices. A las corrientes de agua relacionadas con el Alineamiento de El Mirador se atribuyen los deslizamientos de gran magnitud en el barrio Campoalegre.

Ejemplo 2: Coluviones y deslizamientos en la vía Bucaramanga – Barrancabermeja.

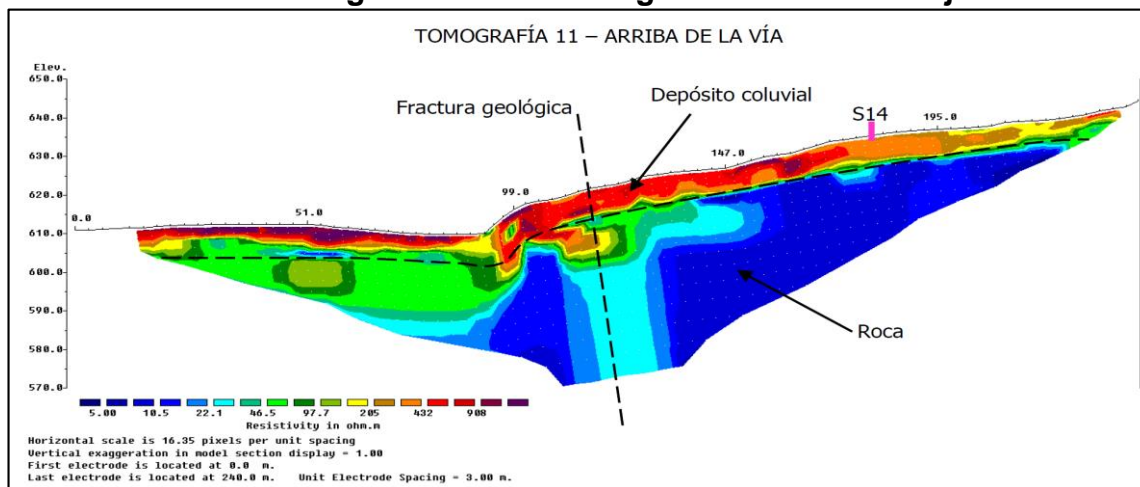
En la vía Bucaramanga – Barrancabermeja se identificó un sistema de fallas trans-tensionales relacionados con el avance no homogéneo de la Indentación de Panamá y la formación del nido sísmico de Bucaramanga. El sistema de fallas denominado como “fallas de La Leona” actúa como un concentrador de corrientes subterráneas de agua a las cuales se les atribuye la formación de un complejo de grandes depósitos coluviales inestables (Sociedad Santandereana de Ingenieros, 2016) El sistema de fallas facilitó además, la generación de cavernas a lo largo de las fallas en la Formación Tablazo, la cual posee un potencial alto de carsticidad, y la consecuente activación de deslizamientos de gran magnitud (Geotecnología, 2022).

Identificación de fallas geológicas secundarias utilizando técnicas geofísicas.

Gracias a su comportamiento hidrogeológico las fallas geológicas jóvenes o secundarias se pueden identificar utilizando tomografías geo-eléctricas; igualmente se han identificado fallas secundarias mediante líneas sísmicas tipo MASW.

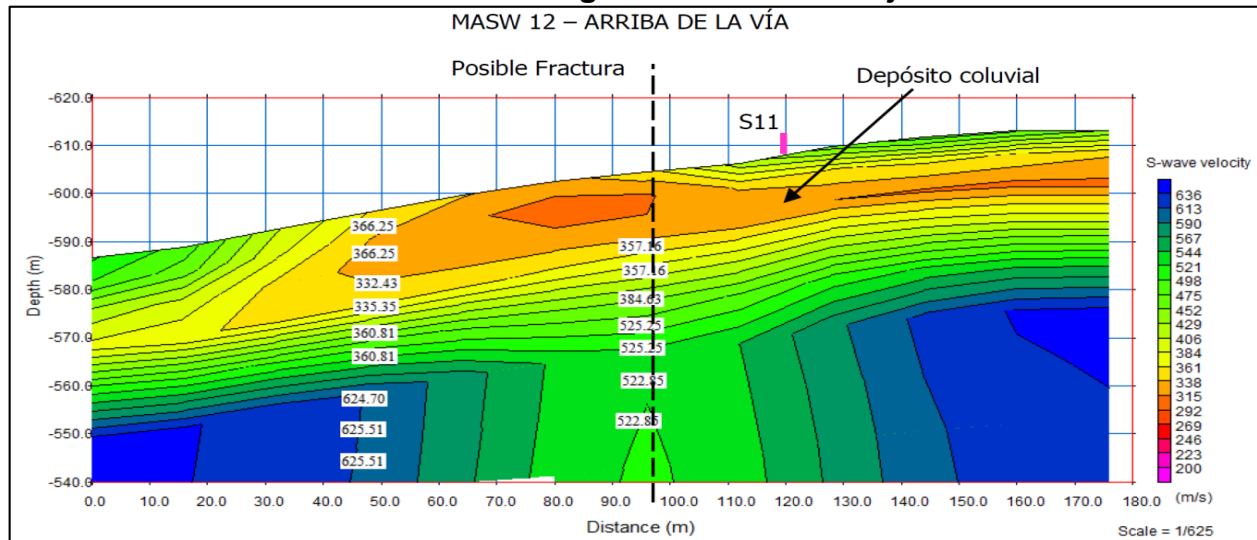
La identificación de las fallas jóvenes o secundarias requiere de arreglos geofísicos de alta precisión con distancias pequeñas entre electrodos o geófonos.

Identificación de una falla geológica trans-tensional mediante tomografía geo-eléctrica Schlumberger Vía Bucaramanga – Barrancabermeja.



Fuente: Geotecnología.

Identificación de una falla geológica trans-tensional utilizando ensayo geofísico MASW Vía Bucaramanga – Barrancabermeja.



La experiencia colombiana en la caracterización de las fallas secundarias o jóvenes ha permitido mejorar los diseños geotécnicos de proyectos viales y los estudios de amenaza y riesgo geotécnico. Es de gran importancia la realización de campañas extensivas de geofísica, las cuales son una herramienta muy eficiente para identificar y caracterizar sitios geotécnicamente críticos en proyectos de ingeniería.

Referencias

- Geotecnología. Diagnóstico geológico geotécnico de la unidad funcional 8. Ruta del Cacao. 2022, 84 pg.
- Ingeominas. Zonificación de amenaza por movimientos en masa de las laderas occidentales de Barranquilla. Informe final Alcaldía de Barranquilla, 2011. 400 pg.
- Sociedad Santandereana de Ingenieros. Concepto sobre la vía sustitutiva construida por Isagen para el proyecto Hidrosogamoso. Concesionaria Ruta Del Cacao, 2019. 205 pg.
- Twiss, Robert J. and Moores, Eldridge M. Structural Geology. W. H. Freeman and company, 1992, pp 103 and 113.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CALIBRACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR BAJO LAS CONDICIONES DE APLICACIÓN EN COLOMBIA

Rodriguez Ramirez, Daniel Felipe^{1*}, Colmenares Montañez, Julio Esteban¹, Gil Rodriguez, David Esteban¹

¹ Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia

La exploración del subsuelo requerida para el diseño de los diferentes proyectos de infraestructura comúnmente se apoya en la ejecución de pruebas de campo para la estimación de las propiedades ingenieriles de los materiales. La campaña de exploración de cada proyecto es única, y se diseña y planea teniendo en cuenta principalmente: las características geológicas del sitio del proyecto a construir, las condiciones topográficas, el tipo de material esperado y las características del proyecto a construir. En algunos casos, los métodos de exploración disponibles no permiten la recuperación de muestras inalteradas para la ejecución de ensayos de laboratorio o se requiere información del comportamiento del suelo en el sitio. Uno de los ensayos más utilizados en la práctica colombiana, es el ensayo de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), el cual da una medida indirecta de la resistencia del suelo a través de correlaciones con el número de golpes requeridos para hincar 30 cm de un muestreador, de dimensiones estándar, dentro de una perforación. Si bien el procedimiento de ejecución del ensayo se encuentra estandarizado a nivel internacional, distintas prácticas locales pueden generar variaciones en los resultados finales de los ensayos. Dichas variaciones afectan la energía impartida por el muestreador al suelo, a medida que se aumenta la profundidad. En algunos países se asume que la energía real transmitida corresponde con el 45, 60 o 72 % de eficiencia de la energía teórica, dependiendo de las prácticas locales y de las pérdidas de energía debidas al sistema de aplicación de las cargas. En nuestro país, la práctica tradicional de la ingeniería, de manera conservadora, asume el 45% de eficiencia. Con el fin de evaluar la eficiencia real de nuestra práctica ingenieril, se desarrolló un sistema de calibración que permite calcular las pérdidas de energía en el equipo SPT. Se identificaron los equipos y procedimientos necesarios para adecuar el equipo SPT, de manera que se pueda medir la energía real para ensayos en sitio. El sistema comprende el uso de una varilla instrumentada con galgas extensiométricas y acelerómetros. Con los anteriores elementos se determina la energía transferida a la varilla durante el impacto del martillo por medio del método velocidad-fuerza (EFV, por sus siglas en inglés). La funcionalidad del sistema fue validada con la ejecución de pruebas en campo.

* Correspondencia: dafrodriguezram@unal.edu.co

3.7 Geosintéticos

Aspectos y Detalles Fundamentales sobre el Diseño y Construcción de Muros de Contención en Suelo Reforzado

Carlos E. Espinosa Pineda¹, Omar L. Torres Parada²

¹ Ingeniero Asesor Consultor Geotecnia e Infraestructura, Colombia

² Director Técnico, Geomatrix SA, Colombia

En los proyectos de ingeniería los diseñadores de muros de contención en suelo mecánicamente estabilizado SME también conocido como suelo reforzado con geosintéticos se enfrentan a particularidades que pueden abordarse al considerar ciertos **aspectos y detalles fundamentales** durante la fase de diseño y la construcción. Mientras que los *detalles de diseño principales* como el tipo de refuerzo, longitud, resistencia a la tensión, cuantía y separación de los elementos de refuerzo son posibles de calcular, existen muchos más aspectos y detalles por considerar e incluir en los planos de construcción. Si bien estos aspectos y detalles por si solos no garantizan éxito del proyecto, su omisión parcial o total puede causar grandes problemas en sus estructuras durante la construcción y servicio, en cuanto al comportamiento, aspecto, costo y estabilidad. Según las metodologías de *diseño por esfuerzos permisibles, en inglés ASD*, y *diseño por factor de carga y resistencia, en inglés AASHTO LRFD*, de acuerdo con [5,7] se presentan 10 pasos básicos para el diseño de estos muros.

En este documento se identifican y discuten ocho de estos **“aspectos y detalles”** con base en la revisión y experiencia que a continuación se enumeran:

1. Suelos del sitio y parámetros de resistencia.
2. Estabilidad interna, externa, global y combinada.
3. Resistencia disponible del geosintético según el tipo de polímero.
4. Reforzar con geotextiles o geomallas? Interacción suelo geosintético.
5. Topografía y niveles del muro.
6. Determinación del tipo de fachada.
7. Sobrecargas temporales.
8. Tratamiento del agua superficial drenajes, cunetas y descoles.

El objetivo de este documento es resaltar varios de los **“aspectos y detalles”** que pueden definir si un diseño es adecuado o no. El suelo mecánicamente estabilizado SME o suelo reforzado es un relleno de suelo conformado por material granular seleccionado al cual se le incluyen elementos geosintéticos de refuerzo. En la figura 1 se muestran los elementos principales de un muro SME. En el diseño de muros SME se tienen tres tipos de zonas de suelo. a) suelo reforzado (suelo mecánicamente estabilizado), b) suelo retenido y c) suelo de fundación. La zona de suelo mecánicamente estabilizado es la única en donde se puede controlar el peso unitario del suelo γ y los parámetros de resistencia del suelo como el ángulo de fricción interna ϕ , y la cohesión c . Por otro lado, en el suelo retenido y suelo de fundación las propiedades y condiciones de los materiales del sitio determinan los valores de γ , ϕ y c .

* Correspondencia: carlosgeomecanica@gmail.com

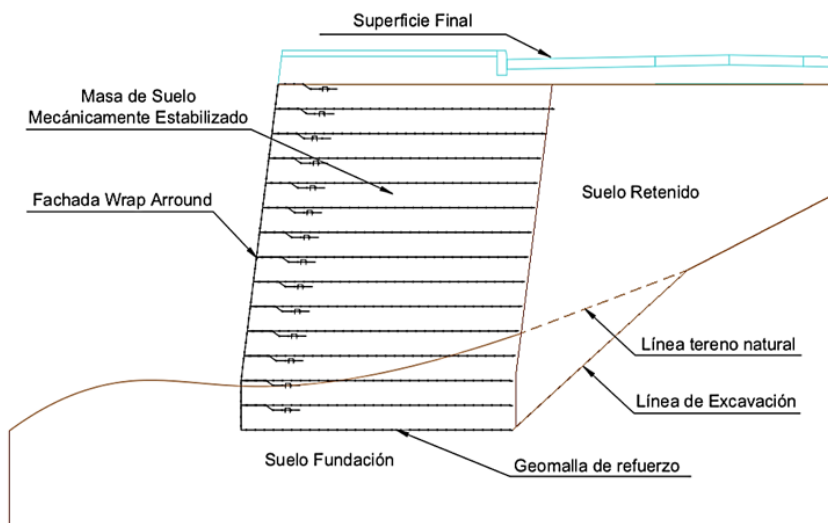


Figura 1. Elementos Principales de un Muro de Contención en Suelo Reforzado

Este artículo logra integrar fundamentos a manera de detalles que se requieren considerar en la planeación de los proyectos de estructuras en suelo reforzado con geosintéticos y resalta aspectos claves para adelantar de manera adecuada el diseño de este tipo de estructuras.

El campo de la ingeniería con geosintéticos crece en el mundo y Colombia es referente Latinoamericano por su trayectoria con el uso de estos materiales. El futuro para avanzar en el conocimiento y mejorar en el diseño y las prácticas de construcción de estructuras reforzadas con geosintéticos dependerá de la interacción entre las empresas de ingeniería de consultoría, construcción, los fabricantes de geosintéticos, las agremiaciones, sociedades profesionales y las universidades para avanzar en la tecnología e investigación, así como de las entidades gubernamentales de seguimiento y control para generar códigos, manuales, especificaciones de diseño y construcción acordes al avance y conocimiento de este campo de la ingeniería geotécnica.

Referencias

- [1] AASHTO. Designation M 288. Geotextile Specification for Highway Applications
- [2] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition 2007.
- [3] ALLEN, T., Christopher, B.R., Elias, V.E. and DiMaggio, J. (2001) Development of the Simplified Method for Internal Stability Design of Mechanically Stabilized Earth (MSE) Walls, Washington State Department of Transportation Research Report WARD 513.1, 108p.
- [4] BRAJA M. Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 4 ed. California State University, Sacramento. International Thompson Editores, 2001.
- [5] ELIAS, V., Christopher, B. R., and Berg, R.R., Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines. NHI Course 132042, FHWA NHI-00- 043. 2001. 394 pp.
- [6] ESPINOSA P., Carlos, y Torres Omar L. El Secreto está en los Detalles – Muros de Contención en Suelo Mecánicamente Estabilizado SME. Jornadas XXI Estructurales y XVIII Geotécnicas Universidad Industrial de Santander, 2019.
- [7] FHWA-NHI-10-024, Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume I. 2009

- [8] FHWA-NHI-10-025, Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes – Volume II. 2009.
- [9] HOTLZ R.; Christopher B., Berg R. Geosynthetic Engineering, BiTech Publishers. 1995.
- [10] KOERNER, R.M., Designing With Geosynthetics. Prentice Hall, 1990.
- [11] KOERNER, R.M. Designing With Geosynthetics Pearson Prentice Hall 5. 2005.
- [12] LESHCHINSKY D.; Leshchinsky O. MSEW 2.0-3.0". ADAMA Engineering Inc. 2004.
- [13] Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP-14.
- [14] OMAR, M.T., Das, B.M., Yen, S.C., Puri, V.K., and Cook, E.E., Ultimate Bearing Capacity of Rectangular Foundations on Geogrid-Reinforced Sand. ASTM Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 2 1993 p. 246–252.
- [15] PAULSON J. N., The Devil is in the Details – Segmental Retaining Wall Design Minutear?, REDI Engineering. GRI-22. 2009.
- [16] TRI/Environmental, Inc. "Creep and Creep Rupture Behavior of Fortgrid BX 65". 2003.
- [17] TRI/Environmental, Inc. Pull-Out of Fortgrid BX 65 in silty sand. 2003.
- [18] US Army Corps of Engineers. Use of Geogrids in Pavement Construction. 2001.
- [19] WU, JONATHAN T. H. et al. Design and construction guidelines for geosynthetic-reinforced soil bridge abutments with a flexible facing NCHRP. Report 556. 2006.

3.8 Normatividad

Caracterización de enfoques de estado límite para diseño de muros embebidos

Álvaro J. Mattos^{1*}, Edwin F. García¹, Bernardo Caicedo²

¹Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia

²Dpto. de Ing. Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Colombia

Contexto

Los códigos geotécnicos se basan en el enfoque de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) y el enfoque de factor parcial. La aplicación de ambos enfoques ha sido poco satisfactoria para diseño de muros embebidos porque conlleva a una dualidad carga-resistencia que viola el principio de fuente única [1,2] y no garantiza un nivel de confiabilidad uniforme en varias situaciones de diseño [3,4]. Para superar estas limitaciones el código Canadiense CSA-S6-19 [5] incorpora en sus lineamientos un factor de carga para presión pasiva del suelo y conceptos de diseños basados en la confiabilidad. Por su parte, el Eurocódigo EN 1997-1:2004 [6] atiende la dualidad carga-resistencia mediante el enfoque DA1 pero no la segunda limitación. En contraste, el código CCP-2014 [7] no atiende ninguna de las limitaciones. Por consiguiente, evaluar la practicidad y eficiencia de los códigos para diseño de muros embebidos es relevante porque permitiría examinar los lineamientos del CCP-2014 frente a códigos que han superado, aunque parcialmente, las limitaciones asociadas al diseño de muros embebidos. En adición, análisis comparativos entre enfoques de estado límite del CCP-2014, CSA-S6-19 y EN 1997-1:2004 permanecen inexplorados en la literatura.

Alcance

En este estudio se caracterizan los enfoques de estado límite de los códigos CCP-2014, EN 1997-1:2004 y CSA-S6-19 para diseño de muros embebidos. Además, se describen las potencialidades y limitaciones de los enfoques LRFD y de factor parcial para falla rotacional y levantamiento hidráulico. También se desarrollan análisis comparativos entre los enfoques de estado límite para diseño de un muro embebido anclado. Finalmente, se evalúa la eficiencia de los códigos en alcanzar su propia confiabilidad objetivo prescrita (β_T) para el muro analizado.

Resultados

Los resultados principales se dividen en tres partes: (I) caracterización de los enfoques de estado límite con base a la revisión de los códigos; (II) análisis comparativos de las profundidades de diseño para un muro embebido anclado; y (III) evaluación de la eficiencia de los códigos en alcanzar su probabilidad objetivo. La primera parte de los resultados se muestra en las Tablas 1 y 2. En ellas se evidencia que el código CSA-S6-19 incorpora un enfoque de diseño basado en el riesgo que involucra el uso de factores de resistencia (ϕ) que capturan la incertidumbre del suelo y factores de consecuencia (ψ) que ajustan la confiabilidad objetivo dependiendo de la importancia de la estructura. Los factores de resistencia son seleccionados con base al *grado de entendimiento* del sitio. El enfoque de diseño basado en el riesgo también es implementado en el nuevo Eurocódigo [8]; esto demuestra que los códigos están modificando su naturaleza semi-probabilística.

Una característica que comparten los códigos CSA-S6-19 y EN 1997-1:2004 es que emplean el método del soporte libre (free earth support) para análisis de muros embebidos anclados, incorporando la seguridad al diseño mediante los enfoques LRFD y de factor parcial, respectivamente. En cambio, el CCP-2014 emplea diagramas de presión aparente de tierra concatenados con los métodos de Broms y Wang-Reese para determinar la resistencia pasiva. El Artículo 11.9.4.3 del CCP-2014 especifica que los métodos de Broms y Wang-Reese no están calibrados para aplicación por LRFD. La seguridad es incorporada al diseño mediante un factor de seguridad $FS=1.5$, que actúa como factor global para el método de Wang-Reese y como factor parcial (reduce el coeficiente de presión pasiva de tierra) para el método de Broms y para análisis de muros de tablestacas continuas [9]. Esta es una característica heredada del código AASHTO LRFD BDS.

* Correspondencia: alvaro.mattos@udea.edu.co

Tabla 1. Enfoques de estado límite para diseño de muros embebidos.

Código	Teoría de presión		Factores de carga y resistencia	Fricción interfaz arena/acero	Confiabilidad objetivo ELU
	Activa (K_a)	Pasiva (K_p)			
EN 1997-1:2004 Estado límite GEO	Analítica EN 1997-1:2004 Anexo C	Analítica EN 1997-1:2004 Anexo C	Factores parciales (ver Tabla 2)	$\delta'_d=2/3\phi'_d$ $\tan \phi'_d=(\tan \phi'_k)/\gamma_\psi$	$\beta_T=3.8$ Clase de confiabilidad 2
CSA-S6-19 ELU: Combinación 1	Coulomb	NAVFAC [10]	$\gamma_{EH}=0.8-1.25$ $\gamma_{ES}=0.8-1.25$ $\gamma_{WA}=0.9-1.1$ $\gamma_{Pasivo}=0.5-1.25$ $\phi=0.45, 0.5, 0.55$ $\psi=0.9, 1.0, 1.15$	$\delta'_k=2/3\phi'_k$	$\beta_T=3.1$ Nivel de consecuencia bajo $\beta_T=3.5$ Nivel de consecuencia típico $\beta_T=3.7$ Nivel de consecuencia alto
CCP-2014 Combinación de carga: Resistencia I	Rankine o Coulomb	NAVFAC [10]	$\gamma_{EH}=0.9-1.5$ $\gamma_{ES}=0.75-1.5$ $\gamma_{AEP}=1.35$ $\gamma_{WA}=1.0$ $\phi=0.75$ $FS=1.5$	$\delta'_k=17^\circ-22^\circ$ Arena limpia, mezclas de gravas y arena	$\beta_T=2.0$ Basado en el código AASHTO LRFD BDS

ELU: estado límite último; ϕ : factor de resistencia según grado de entendimiento; ψ : factor de consecuencia

Tabla 2. Factores parciales para diseño de muros embebidos.

Factor parcial para	DA1		DA2	DA3
	C1	C2	-	-
Acciones permanentes no favorables, $\gamma_{G,unfav}$	1.35	1.0	1.35	1.0
Acciones variables no favorables, $\gamma_{Q,unfav}$	1.5	1.3	1.5	1.3
Ángulo de fricción efectivo, $\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25	1.0	1.25
Resistencia de la tierra, γ_R	1.0	1.0	1.4	1.0

Referencias

- [1] B. K. Low and R. J. Bathurst, "Load-resistance duality and case-specific sensitivity in reliability-based design," *Acta Geotech.*, vol. 17, no. 7, 2022.
- [2] B.-K. Low, "Insights from Reliability-Based Design to Complement Load and Resistance Factor Design Approach," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 143, no. 11, 2017.
- [3] Á. J. Mattos, J. C. Viviescas, and J. P. Osorio, "Reliability Comparative Analysis of Codes for the Design of Cantilever Sheet Pile Walls: Basis for Studying the Principles of International Standards," *Int. J. Geomech.*, vol. 21, no. 5, 2021.
- [4] Á. J. Mattos, "Reliability Analysis of Modern Geotechnical Codes for the Limit State Design of Sheet Pile Structures Considering Parameter Uncertainties," *Int. J. Geomech.*, vol. 22, no. 3, 2022.
- [5] CSA (Canadian Standards Association), *Canadian Highway Bridge Design Code (CSA S6:19)*. Toronto: CSA, 2019.
- [6] CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. EN 1997-1:2004*. Brussels: CEN, 2004.
- [7] AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica), *Norma Colombiana de Diseño de Puentes - LRFD - CCP*. Bogotá: INVIAS, 2014.
- [8] CEN (European Committee for Standardization), *Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. prEN 1997-1:2022*. Brussels: CEN, 2022.
- [9] P. J. Sabatini, D. G. Pass, and R. C. Bachus, "Geotechnical engineering circular No. 4—Ground anchors and anchored systems," Federal Highway Administration (FHWA), Springfield, VA, 1999.
- [10] U.S. Department of Navy, *Soil mechanics (Technical Report NAVFAC DM-7.1)*. Alexandria, VA: Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC)/U.S. Department of Defense, 1982.

Implicación de la Normativa Colombiana para Diseño de Relaves Mineros - Comparativa con principales Normativas Latinoamericanas

Laura Moreno López¹, Alejandro Calvo², Jaime Castro Agudelo³, Diego Cobos Roa⁴
^{1,2,3,4} SRK Consulting, Colombia

Teniendo en cuenta los cambios que se han venido generando a nivel global frente a la progresiva migración a energías verdes, el crecimiento de la explotación minera es inevitable debido a alta demanda de estos productos o “commodities”. Esto genera de forma directa el aumento de los residuos producto de la actividad minera. Es imperativo que las legislaciones nacionales sean consistentes, claras y que se enmarquen bajo un marco técnico con el objetivo de estandarizar las pautas para diseños de depósitos de relaves o *TSFs*, por sus siglas en inglés (*Tailings Storage Facilities*), en el que se definan condiciones regulatorias asociadas a análisis y clasificaciones asociadas a niveles de riesgo.

El presente trabajo muestra una comparación entre las normativas nacionales para el manejo de relaves de los principales países mineros de América Latina con las que se aplican actualmente en Colombia. Este análisis incluye el Estándar Global De Gestión De Relaves Para La Industria Minera o *GISTM* por sus siglas en inglés (*Global Industry Standard on Tailings Management*), enfocándose en una discusión sobre el uso de factores de seguridad y su relación con las probabilidades de falla y periodos de retorno asociados.

En América Latina tenemos al menos 1500 depósitos de relaves. La calidad de estudios, información disponible y registro del desempeño de cada uno de estos es muy variable debido a las diversas épocas en los que estos fueron diseñados, construidos, operados o cerrados, y a la variedad de estándares aplicables (o falta de estos) para cada caso. Este valor es estimado y recopilado de diversas fuentes, pues incluso a nivel mundial, la construcción, operaciones y cierre de los depósitos de relaves ha sido históricamente vagamente documentado por lo que se encuentran grandes diferencias entre los rangos de la cantidad de depósitos activos e inactivos [1].

En general, existen normativas globales como legislaciones específicas nacionales, las cuales presentan metodologías para la gestión de depósitos de relaves. En el caso de Colombia se estiman al menos cuatro depósitos de relaves activos los cuales han estado regidos por la legislación colombiana para operaciones mineras y en específico desde la última década han quedado bajo los *términos de referencia para proyectos mineros* de la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) [2]. Sin embargo, dichos términos de referencia presentan ambigüedades frente a los criterios de análisis y diseño en especial de los depósitos de relaves y de los botaderos.

Una de las diferencias más significativas encontrada entre el *GISTM* y los estándares nacionales en los países estudiados es que muchos no cuentan con decretos nacionales que establezcan una normativa estandarizada clara que pueda ser aplicada a la gestión de relaves asociada a niveles de riesgo para las comunidades [3].

La discusión que se elabora en el presente trabajo se refiere no solo a los requerimientos que estipulan los estándares globales con respecto a las normativas nacionales, sino también a discusiones en lo referente al uso de factores de seguridad y su relación con las probabilidades de falla y periodos de retorno con los cuales se diseñan las estructuras de relaves asumiendo cierto nivel de riesgo.

* Correspondencia: lmoreno@srk.com; acalvo@srk.com; jjcastro@srk.com.

País	Norma Vigente	Año
Global	ESTÁNDAR GLOBAL DE GESTIÓN DE RELAVES PARA LA INDUSTRIA MINERA (GISTM)	2020
Colombia	Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental -EIA. Proyectos de exploración minera. ANLA-TDR-13	2016
Perú	Decreto supremo 057-2004-PCM Guía ambiental para el manejo de relaves mineros. Ministerio de energía y minas	2004
Chile	Cierre de minas: Ley 28.090 de 2003 y DS 33-2005 EM REGLAMENTO PARA LA APROBACIÓN DE PROYECTOS, DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE DEPÓSITOS DE RELAVES. Decreto Supremo 248	2007
México	Norma Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003	2003
Brasil	Ordenanza N°70.389 de 2017 del Departamento Nacional de Producción Mineral, del Ministerio de Minas y Energía (O-Br 70.389)	2017
Argentina	Ley N°24.585 de 1995, "Ley de Protección Ambiental para la Actividad Minera" (Ley-Ar 24.585)	1995
Bolivia	DS 24.782 de 1997. Reglamento ambiental para actividades mineras	1997

Tabla 1. Normativa de Países latinoamericanos referente a la gestión de relaves.

Cabe destacar que los estándares difieren de un país a otro: las responsabilidades de los actores involucrados en los diseños no están bien definidas y se presentan en muchas ocasiones conceptos técnicos poco estructurados. En el caso específico de Colombia, además de lo descrito anteriormente, al ser términos de referencia, implica necesariamente depender del criterio de los ingenieros involucrados en los proyectos y el de la autoridad ambiental y su facultad para interpretar los términos de referencia. Debido a esto, se hace necesario el desarrollo de una regulación específica aplicable a los TSFs considerando los requerimientos del GISTM, en especial lo referente a los criterios de diseño y los roles y responsabilidades de los actores principales como: Ingenieros de registro (EOR), Ingenieros responsables de depósitos de relaves (RTFE) y Ejecutivos responsables (AE).

Considerando el crecimiento minero que se proyecta a nivel mundial y nacional, es evidente que la normativa colombiana debe evolucionar a una más estructurada, que involucre los diferentes criterios de diseño lógico y acorde al estado de la práctica, asumiendo cierto nivel de riesgo aceptable bajo el principio ALARP por sus siglas en inglés (*as low as reasonably practicable*).

Referencias

- [1] D. Louise Spencer, Christopher A. Bareither, Joseph Scalia IV, Christopher N. Hatton and Kelly J. Ward (2022). *Characterizing tailings professional labor demand*. Mining Engineering Magazine.
- [2] Autoridad Nacional de Liciencias Ambientales (2016). *Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental - EIA. Proyectos de exploración minera*. Ministerio de medio ambiente.
- [3] Francisco Silva, T. William Lambe, W. Allen Marr (2008). *Probability and Risk of Slope Failure*. Journal Of Geotechnical And Geoenvironmental Engineering © Asce.
- [4] The International Council on Mining and Metals (ICMM), United Nations Environment Programme (UNEP) and Principles for Responsible Investment (PRI). (2020). *Estándar Global De Gestión De Relaves Para La Industria Minera*. Global Tailings Review.

Estimación de Desplazamientos Admisibles para Determinar el Coeficiente k, en Análisis Pseudoestático de Estabilidad de Taludes

Lorena Niño^{1*}, Carlos Eduardo Rodríguez^{2*}

¹ 1 Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Esp. Magister en Geotecnia, ingnino93@gmail.com

² 2 Pontificia Universidad Javeriana, PhD, Msc en Ingeniería, crodriguezp@javeriana.edu.co

Se aplican procedimientos simplificados que estiman valores de desplazamientos sísmicos admisibles, involucrando la variación geométrica, aceleración crítica k_y y parámetros de resistencia para diferentes taludes teóricos de corte así como la influencia del entorno sismogénico y espectro sísmico para las diferentes zonas de amenaza sísmica de acuerdo con el Mapa de Zonificación de Amenaza Sísmica del Servicio Geológico Colombiano 2020, para determinar el coeficiente de aceleración horizontal k de un análisis de estabilidad pseudoestático alcanzando factores de seguridad $FS \geq 1,0$. La estimación de desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño se realiza según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray y Macedo, 2019 y se aplica como ejemplo a algunas ciudades de Colombia que cuentan con estudios de microzonificación sísmica tales como, Manizales, Cali, Medellín y Bogotá.

Con la implementación de este procedimiento se logra generar un soporte técnico para la escogencia del coeficiente de aceleración horizontal k a emplear en un análisis de estabilidad pseudoestático dado que, al involucrar los desplazamientos admisibles en el cálculo se reduce $A_{máx}$ o PGA de manera óptima tal que aún se garantizan los factores de seguridad mínimos y envuelve el entorno sísmológico en el cual está inmerso el talud de análisis.

Se resalta que, los valores obtenidos como desplazamientos sísmicos admisibles deben tomarse como índices del comportamiento del talud posterior a la ocurrencia de un sismo y no son estimaciones precisas; sin embargo, al tener una idea del rango esperado el procedimiento propuesto es útil y también puede proporcionar estimaciones razonables para casos en los que no se justifiquen análisis avanzados.

Se aplicó el procedimiento para estimar desplazamientos sísmicos admisibles originados en zonas de fuentes sismogénicas corticales y de subducción para Tr 475 años y se evidencia que los desplazamientos sísmicos están estrictamente ligados a k_y , para taludes con bajas características de resistencia e inclinaciones de 27° y con k_y máximo de 0, 25; pero, cuando se tienen inclinaciones mayores los desplazamientos sísmicos son directamente proporcionales alcanzando valores hasta de 345 cm, infiriendo que el talud tiene un comportamiento flexible y permite tales desplazamientos, sin embargo, en taludes con inclinación de 45° y altura mayor a 10,0 m en razón que el $k_y = 0$, no se presentan desplazamientos por que los materiales con bajas características sísmicas fallan. Es importante indicar que, aunque numéricamente se estimen desplazamientos grandes se debe tener en cuenta la afectación que generaría en los materiales, tal como fisuras, grietas y posibles fallas por desprendimientos o movimiento de la masa inestable ladera abajo.

Con los análisis y resultados obtenidos se presentan a continuación las siguientes conclusiones:

* Correspondencia: ingnino93@gmail.com

- Aceleración crítica (k_y) para modelos teóricos de taludes de corte en suelo. Se identificó que los materiales involucrados presentan aceleración crítica entre $k_y = 0$ y $k_y = 0,85$ identificando que k_y depende, además de la configuración geometría del talud (altura e inclinación de corte), de los parámetros de resistencia al corte. Sin embargo, para ser completamente estrictos en el análisis pseudoestático se debería contar con parámetros dinámicos de resistencia no drenados del perfil de suelo del talud.

- Desplazamientos sísmicos admisibles para diferentes escenarios de diseño según lo propuesto en Bray et al, 2018 y Bray et al, 2019. Según los resultados, los depósitos con bajos parámetros de resistencia permiten que se genere un amplio rango de desplazamientos, contrario al talud con parámetros más altos en los cuales se generan máximo desplazamientos 15,0 cm. Los desplazamientos que se generan son distantes variando desde 0,5 cm hasta máximo 100 cm con valores atípicos hasta 450 cm.

Con la diferenciación de análisis de desplazamientos teniendo en cuenta la fuente sismogénica de origen cortical o de subducción, los valores que se obtienen son menores para la primera, máximo 100 cm y para la segunda máximo de 350 cm, la principal variable que determinan estos valores es la magnitud del sismo que se podría llegar a generar y aceleración espectral (S_a , contenido frecuencial). Es importante indicar que, aunque numéricamente se estimen desplazamientos grandes, se debe tener en cuenta la afectación que generaría en los materiales, tal como fisuras, grietas y posibles fallas por desprendimientos o movimiento alterar la estabilidad global de talud.

Por otra parte, con la aplicación del análisis de Bloque deslizante de Newmark para todos los 13 depósitos arroja valores de desplazamiento sísmico grandes hasta 300 cm para taludes con alturas mayores a 20,0 m e inclinación de 37° ; y para taludes con inclinaciones $< 37^\circ$ y alturas menores que 20,0 m no genera desplazamientos o si es el caso son inferiores a 10,0 cm.

- Determinación del coeficiente k para análisis pseudoestático en estabilidad de taludes de corte. Se calculan los coeficientes de aceleración horizontal, k con los que se alcanzan $\geq FS 1,0$ teniendo en cuenta los desplazamientos sísmicos admisibles, características geométricas, entorno sismogénicos y espectro sísmico, sin embargo para algunos taludes los desplazamientos sísmicos son grandes y en ese punto rigen dos criterios (1) que bajo D_a (cm) altos los materiales comienzan agrietarse y pueden generar falla y (2) las consecuencias que producen en el desempeño los valores escogidos de D_a (cm).

Con la implementación de este procedimiento se logra generar un soporte técnico para la escogencia de un coeficiente de aceleración horizontal k , con el cual se reduce el A_m para emplear en un análisis de estabilidad pseudoestático según lo establecido en la AIS, 2010, por lo que, al involucrar los desplazamientos admisibles en el cálculo del k , este se reduce de manera óptima tal que aún se garantizan los factores de seguridad mínimos y envuelve el entorno sismológico en él está inmerso el talud de análisis, además de proporcionar un soporte técnico si se quiere reducir el A_m .



Bogotá D.C., 13 de febrero de 2023

CITACIÓN A ASAMBLEA ORDINARIA DE LA SCG AÑO 2023

La Junta Directiva de la Sociedad Colombiana de Geotecnia convoca a todos sus asociados a la Asamblea Ordinaria correspondiente al año 2023, que se celebrará en Bogotá D.C., el día **jueves 23 de Marzo de 2023** a partir de las **5:30 p.m.** en la Sede de la Sociedad Colombiana de Geotecnia (Transversal 28B No. 37-47).

El orden del día propuesto, el cual será sometido a aprobación al inicio de la Asamblea, es el siguiente:

1. Verificación del quórum.
2. Designación del Presidente y Secretario de la Asamblea.
3. Aprobación del Orden del Día.
4. Lectura y aprobación del Acta de la Asamblea Ordinaria del 17 de marzo de 2022.
5. Nombramiento de la Comisión para la Revisión y Aprobación del Acta de la Asamblea Ordinaria del 23 de marzo de 2023.
6. Presentación y aprobación del Informe de Gestión de la Junta Directiva.
7. Informe del Procurador.
8. Presentación y aprobación de los Estados Financieros a 31 de diciembre de 2022.
9. Informe del Revisor Fiscal.
10. Consideración y aprobación del Presupuesto para el año 2023.
11. Presentación y aprobación de la propuesta para la inversión de los excedentes.
12. Autorización al representante legal para todos los trámites ante la DIAN para seguir perteneciendo al régimen tributario especial.
13. Propositiones y Varios.
14. Clausura de la Asamblea Ordinaria.

Se solicita confirmar la asistencia a más tardar el día 21 de marzo de 2023. La confirmación se podrá hacer por escrito enviando una comunicación a la sede de la Sociedad, mediante correo electrónico (sociedadcolombianadageotecnia@scg.org.co; scgeotecnia1@gmail.com). Quienes no puedan asistir, pueden otorgar poder por escrito a otro miembro activo de la SCG, quien actuará en su nombre durante la reunión (máximo tres poderes por representante); el poder se debe enviar antes del 21 de marzo de 2023.

Las personas que físicamente no puedan asistir en forma presencial y lo desean hacer de forma virtual por favor informar para enviar el enlace respectivo con antelación. No se enviará enlace solicitado el mismo día de la Asamblea.

Para tener voz y voto en la Asamblea se debe estar a paz y salvo por todo concepto con la Sociedad antes del inicio de la Asamblea, incluyendo el pago de las afiliaciones a Sociedades Internacionales. El pago respectivo se puede hacer previo o el día de la Asamblea, mediante consignación, pago en efectivo o transferencia bancaria con descuento del 20%.

Cordialmente,

MARIO CAMILO TORRES SUÁREZ
Presidente Junta Directiva
Sociedad Colombiana de Geotecnia

Dirección: Transversal 28B No.37-47 Tel: 2694260 - 2442073 • Fax: 2694260
e-mail: sociedadcolombianadageotecnia@scg.org.co; scgeotecnia1@gmail.com;
<http://www.scg.org.co> - Bogotá, D.C.- Colombia

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES DEL BCG - SCG

El BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA –BCG– es el Órgano de Divulgación de la Sociedad Colombiana de Geotecnia –SCG–, el cual se caracteriza por informar a la Comunidad Geotécnica local, nacional y regional diferentes avances y trabajos técnico–científicos realizados en nuestro ámbito y fuera del país.

Actualmente este instrumento se perfila como el órgano de divulgación de mayor importancia nacional y de trascendencia internacional, que con respecto a los conocimientos y la práctica de la geotecnia, cuenta Colombia y por ende ha decidido entrar en la tónica de su indexación con miras a proyectarse como el principal medio local en el tema. Debido a esto solicitamos a nuestros usuarios cumplir cabalmente con los requisitos que el Comité Editorial ha decidido estipular y sugerirnos acciones que promuevan la excelencia en los trabajos presentados y una edición impecable de nuestro BCG, en sus sucesivas ediciones. Las Instrucciones para los autores interesados en publicar sus contribuciones en el BCG son:

1. El autor o autores asumen la responsabilidad jurídica por el contenido de sus artículos. Bajo ninguna circunstancia la SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA asumirá todo o parte de esta responsabilidad, a menos que lo manifieste explícitamente en el texto del artículo.
2. Los textos propuestos para ser publicados en el BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA deben ser inéditos.
3. Cuando se realice la entrega de artículos al Comité Editorial del BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA, el autor(es) se abstendrá(n) de presentarlo en forma simultánea a otra publicación, por un tiempo mínimo de 12 meses, a no ser que sea rechazado.
4. Cada autor deberá entregar el material en el formato establecido para el efecto por el Comité Editorial y que se puede bajar del sitio www.scg.org.co, en el enlace respectivo
5. Los artículos que se presenten al Comité Editorial deberán observar, en general, los siguientes aspectos:
 - (a) Estructurales
 - Título, que especifique con claridad el tema tratado.
 - Subtítulo o epígrafe, si se requiere.
 - Información del autor (iniciales de nombres, primer y segundo apellidos, formación académica, dirección electrónica, campo de desempeño profesional, filiación, nacionalidad).
 - Resumen y palabras clave en español.
 - Resumen y palabras clave en inglés.
 - Notas al pie, sólo para aclaraciones o comentarios adicionales.
 - (b) Gramaticales
 - La redacción será en tercera persona del impersonal.
 - Se sugieren oraciones coordinadas en lugar de subordinadas.

- Todo documento estará estructurado así: estructura inicial, introducción, desarrollo, conclusiones, agradecimientos y referencias.
- La extensión estimada de los textos es de 15 a 20 páginas, sin detrimento de que en casos especiales se autorice una mayor extensión.

(c) Presentación

- Los artículos deben ser enviados al Editor del Boletín en la siguiente dirección electrónica: camilogeotecnia@gmail.com (c.c scg1@etb.net.co) elaborados en Word.
- Las fotografías, imágenes, mapas y figuras incluidas en el texto se deben enviar por separado en formatos BMP o EPS con alta resolución (mínimo 300 dpi). Su impresión será en tonos de grises.

(d) Referencias

- Libros: nombre y apellidos del autor, título y subtítulo, ciudad, editorial, ISBN, año de publicación.
- Revistas: nombre y apellidos del autor, título de la revista, número, ISSN, año de publicación.
- Páginas de Internet: nombre y apellidos, título, dirección de la página Web, fecha de la consulta.

6. El Comité Editorial decidirá cuales artículos son pertinentes para publicación y los someterá a la revisión de dos expertos en el área.
7. El Comité Editorial informará del resultado de la revisión en un lapso máximo de tres meses, contados a partir de la fecha de recibo.
8. En caso de que un artículo publicable no pueda ser publicado en alguno de los tres números siguientes, el Comité Editorial informará al autor(es) para que decida(n) si lo retira(n) o no.
9. En próximas ediciones, el BOLETÍN COLOMBIANO DE GEOTECNIA buscará tramitar su indexación por entidades técnico-científicas, lo cual implica la alta calidad que en adelante se exigirá a los artículos y ponencias que se deseen publicar en este medio, relacionados con el avance y la práctica de la geotecnia nacional e internacional.

En ediciones especiales o extraordinarias del Boletín, el Comité Editorial decidirá los términos y formatos que se pueden utilizar para dicha edición.

COMENTARIOS GENERALES SOBRE EL FORMATO PARA ELABORACIÓN DE LOS ARTÍCULOS PARA EVENTOS DE LA SCG (SEMINARIO Y CONGRESO COLOMBIANOS DE GEOTECNIA)

- Todos los documentos deben ser preparados con el mismo formato y siguiendo en forma precisa las instrucciones que allí aparecen, con el propósito de lograr una uniformidad en las memorias de los eventos.
- El Editor de las memorias reducirá los documentos a un 75% del tamaño original y en caso de que se decidan imprimir los volúmenes, ésta impresión será a blanco y negro.
- Los artículos tendrán un título en Times New Roman 18 minúsculas, autores en 14 comenzando por las iniciales de los nombres y sus apellidos, según la afiliación de cada uno la cual irá en 12 itálica.
- Deberán llevar un RESUMEN en español seguido de su correspondiente traducción al inglés – ABSTRACT, en donde se describa los aspectos más relevantes que se incluyen en el artículo, en tamaño 12.
- La idea es copiar de un archivo de Word® anterior en el que se haya escrito el artículo al formato suministrado a los autores de los artículos.
- Considérense las instrucciones y formatos especiales para las tablas, figuras, referencias, notas y conclusiones, de conformidad con lo expuesto en el formato adjunto.
- Las fotografías y figuras deben ser en blanco y negro (no use escala de grises ni color, a menos que sea absolutamente indispensable).
- Las ecuaciones deben ir enumeradas consecutivamente entre paréntesis a la derecha, y deben ser escritas con el editor de ecuaciones de Word®.
- Preferiblemente se deben utilizar unidades del sistema internacional (SI) con abreviaturas y notaciones como está descrito en el formato adjunto.
- El documento se escribirá a dos columnas de conformidad con las dimensiones que tiene el formato adjunto, sin necesidad de cambiarlas ni ajustarlas de ninguna manera.
- La longitud máxima de los artículos será de ocho (8) páginas y debe contener en forma general los siguientes puntos: Introducción, Antecedentes, Metodología, Desarrollos, Resultados y Análisis, Conclusiones y Comentarios, Referencias.
- Se debe respetar la fecha de entrega establecida por el Comité Técnico so pena de rechazar el trabajo, debido a que hay gran cantidad de artículos propuestos para estos eventos y los tiempos son muy ajustados.



Los recordaremos por siempre. Gracias por su entrega y aportes durante toda una vida a la Sociedad Colombiana de Geotecnia en sus 52 años de fundación.

In Memoriam:

Álvaro Jaime González García†
Profesor Emérito UNal.
Expresidente SCG
ExVicepresidente ISRM – Sudamérica
Socio Activo SCI

Juan María Montero Olarte†
Profesor Asociado UNal.
Socio Fundador SCG
Expresidente SCG
Presidente CSAMM