

GEOTECHNICAL MAPPING OF THE ROCK FORMATION FROM THE EASTERN MOUNTAINS OF THE BOGOTÁ SAVANNAH AND PRACTICES FOR HAZARDS MITIGATION AND CONTROL OF ROCK FAILURE MECHANISMS

Zonificación Geotécnica del Macizo Rocoso en un Tramo de los Cerros Orientales de la Sabana de Bogotá y Prácticas Locales de Mitigación y Control

José Manuel Naranjo Pacheco, Andrés León & Daniel Zúñiga

Geological and Geotechnical Engineer – Independent Consultant and Advisor – Colombia, jmnaranjop@unal.edu.co

Senior Consultant, AXIOS ENGINEERING SPA, Santiago, Chile, andres.leon@axiosingenieria.cl

Geotechnical Engineer, AXIOS ENGINEERING SPA, Santiago, Chile, daniel.zuniga@axiosingenieria.cl

ABSTRACT: Numerous studies and projects have been carried out in the Eastern Mountains of the Bogotá Savannah; however, there is still no consensus within the geoscientific community regarding the origin and even the cartography of many of the geological structures affecting this area. The results of this paper aim to contribute to the understanding of key factors involved in slope instability issues and their relationship with the overall conditions of the rock mass. This understanding is intended to be useful for several development and territorial planning projects. The research is based on the analysis and mapping of lithological, structural, geomorphological, and geotechnical characteristics of the existing ground. This is achieved through comprehensive fieldwork combined with laboratories testing. The adopted mapping methodology enables the identification and evaluation of geotechnically homogeneous areas for slope instability. Within this context, local experiences of stabilization and control methods are also presented, highlighting solutions applied to address critical issues related to rock failure mechanisms. This contributes to improved practices and comprehensive solutions. The study was conducted in the early years of the century, and through updated mapping of morphodynamical processes, the indeed effectiveness of the applied mapping methodology will be confirmed. This will enhance the understanding of geological threats in an increasingly expansive urban location. Moreover, it is evident that such studies are becoming more critical considering the physical environment, due to the differed consequences that can even result in human casualties. It will be inquired that, despite existing uncertainties and potential events, progressing in the knowledge and identification of the territory is imperative.

KEYWORDS: mass rock, stability, zonation, control, mitigation.

1 INTRODUCCIÓN

Los Cerros Orientales de la Sabana de Bogotá, están conformados por rocas de origen sedimentario, en estratos de areniscas, arcillolitas y lutitas de las formaciones: Guaduas, Arenisca Tierna, Arenisca Labor, Plaeners, Arenisca Dura y Chipaque. Estas rocas han estado sometidas a esfuerzos tectónicos, como consecuencia de la presencia de varios tipos de estructuras geológicas, lo que ha determinado diferencias en las características del macizo rocoso y procesos inestables. Mediante la cartografía y zonificación detallada del macizo rocoso se pretende determinar la incidencia que sobre él tiene la presencia de pliegues y fallas, y su relación con los procesos de inestabilidad de laderas.

Parte básica del estudio, comprende el análisis de la información, proveniente de los trabajos realizados en el sector como los túneles de Los Rosales, Siberia, Usaquén; así como de canteras y cortes viales; con el objeto de identificar, relacionar y evaluar dicha información, con la obtenida a partir del trabajo de campo efectuado, principalmente en la determinación de parámetros índice y de resistencia del macizo rocoso.

De otra parte, con base en la localización de las principales estructuras geológicas y el detalle de sus geometrías, se busca determinar sus implicaciones sobre la calidad del macizo rocoso; por medio de análisis de laboratorio, complementados con

levantamientos geológico – estructurales y geomorfológicos, para definir el Mapa de Zonificación Geotécnica Semicuantitativa.

1.1 Localización y Aspectos Fisiográficos

Fisiográficamente el altiplano denominado Sabana de Bogotá está situado a una elevación de aproximadamente 2550 – 2600 m en la Cordillera Oriental de Colombia, entre 4°30' y 5°15' de latitud norte, y 73°45' y 74°30' de longitud oeste. Representa una gran cuenca tecto-sedimentaria, la cual fue rellenada por cientos de metros de sedimentos principalmente lacustres. El altiplano se encuentra rodeado en su totalidad por montañas que alcanzan localmente altitudes de casi 4.000 m.

El área objeto del presente estudio ocupa una extensión aproximada de 40 km², y está delimitada al norte por la cantera “El Bohío”, (calle 127), al sur por la quebrada “La Vieja”, (calle 67), al oeste por la zona plana urbanizada de Bogotá aproximadamente hasta la carrera 7ª y al este por el embalse de San Rafael y la vertiente occidental del río Teusacá (**Figura 1**).

Está comprendida entre las siguientes coordenadas planas: (X1, Y1) = (1.005.000, 1.001.630) (X3, Y3) = (1.013.000, 1.005.000) (X2, Y2) = (1.005.000, 1.006.260) (X4, Y4) = (1.013.000, 1.009.000).

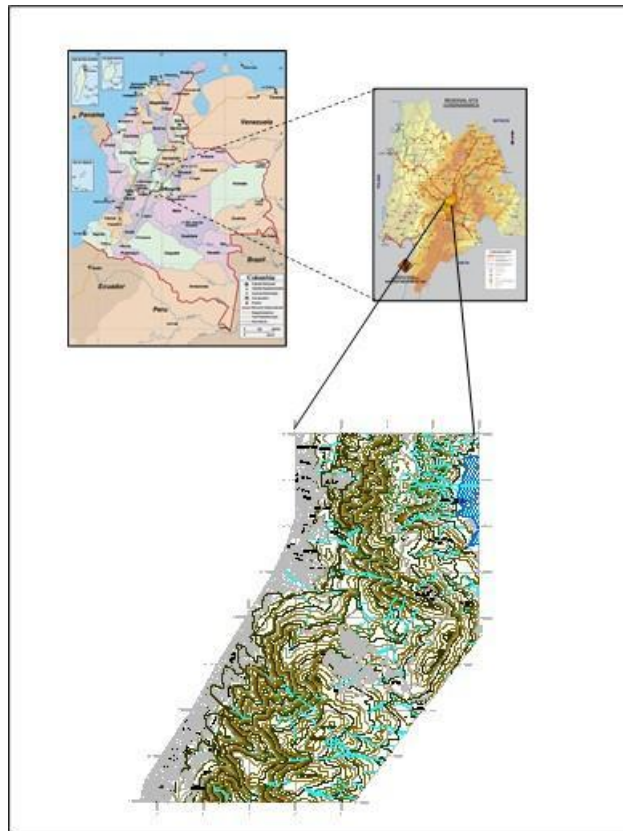


Figura 1. Localización general: arriba a la izquierda mapa de Colombia, a la derecha el Departamento de Cundinamarca y la ciudad de Bogotá y abajo la sección de los Cerros Orientales de Bogotá, objeto del estudio (Fuente: elaboración propia)

2 GEOLOGÍA REGIONAL

En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental representadas por las formaciones Guaduas (Tig), Arenisca Tierna (Ksgat), Arenisca Labor (Ksgal), Plaeners (Ksgp), Arenisca Dura (Ksgad) y Chipaque (Ksch) cubiertas parcial y discordantemente por depósitos no consolidados de diferente origen y composición. Litológicamente las rocas sedimentarias se componen principalmente de areniscas, limolitas, arcillolitas y lutitas. Parte básica del estudio, comprende el análisis de la información, proveniente de los trabajos realizados en el sector como los túneles de Los Rosales, Siberia, Usaquén; así como de canteras y cortes viales; con el objeto de identificar, relacionar y evaluar dicha información, con la obtenida a partir del trabajo de campo efectuado, principalmente en la determinación de parámetros índice y de resistencia del macizo rocoso.

Las areniscas del Grupo Guadalupe muestran diferente composición y resistencia a los procesos denudativos. Hay areniscas cuarzosas bien cementadas de consistencia muy dura y areniscas friables o deleznales de menor consistencia. De otra parte, las arcillolitas y lutitas afloran en menor proporción comparativamente y en general presentan un menor grado de consistencia y están relacionadas con procesos de inestabilidad en suelos.

El Cuaternario está representado en el área de estudio por depósitos: antrópicos (rellenos de excavación) (Qr), coluviales (Qdp), fluvio-glaciales (QfG), morrenas de fondo y terminales (Mf, Mr), fluviotorrenciales (Qft), aluviales o complejo de conos

(Qcc) y lacustres (Formación Sabana, Qs), que cubren la mayoría de las rocas más antiguas.

2.1 Geología Estructural

En el área de estudio se presentan pliegues y fallas los cuales tienen dos orientaciones preferenciales. Algunas de ellas se orientan entre N45°E a norte-sur, siguiendo el rumbo de la cordillera. Por el contrario, existen otras estructuras transversales con dirección NW, que cortan a las anteriores y en general transforman el contexto estructural de la zona. Las más importantes estructuras entre pliegues y fallas son: los anticlinales de Bogotá y Usaquén, el Sinclinal de Patios y las fallas del Alto El Cabo, Santa Ana, la falla de Bogotá, Usaquén, Teusacá y El Chicó.

2.1.1 Diaclasas

El análisis estructural de la zona de estudio comprendió tres fases, cuyo producto final fue la síntesis del comportamiento estructural y su relación con la estabilidad del sector. Las tres fases mencionadas comprenden: compilación de información referente a discontinuidades, fallas y pliegues de proyectos como túneles y en general obras de infraestructura, la segunda fase correspondió a la fotointerpretación estructural y finalmente el control de campo en relación con las zonas estructurales preliminares. De acuerdo con las estructuras presentes en el área y con el objeto de facilitar su análisis se definieron tres bloques principales, limitados por fallas de orientación este – oeste.

Para determinar los patrones de discontinuidades se utilizó el programa DIPS (Plotting Analysis and Presentation of Structural Data using Spherical Projection Techniques), creado por el grupo de ingeniería de rocas de la Universidad de Toronto bajo la dirección del profesor Hoek. En este análisis se realizaron cuatro tipos de diagramas, los cuales son:

- Diagrama de polos
- Diagrama de contornos
- Diagrama de planos mayores de familias predominantes
- Diagrama de sectorización cinemática

Estos cuatro gráficos se realizaron para cada una de las estaciones de campo efectuadas. Posteriormente se analizaron los datos obtenidos fotogeológicamente y de campo, para obtener en forma definitiva las discontinuidades que predominan en cada uno de los sub-bloques estructurales (Figura 2).

3 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS

En estudios de zonificación geotécnica, la geomorfología juega un papel fundamental, al relacionar las geoformas actuales con los procesos que han acontecido o que siguen actuando en determinada región. Específicamente para el objeto del presente estudio, se pretende entender el control que ejercen las estructuras geológicas del macizo rocoso sobre las geoformas actuales. Para lograr el objetivo señalado, el estudio geomorfológico de la zona de estudio aplicó una metodología morfogenética, donde se definieron los distintos modelados; mediante características estructurales, litológicas y morfométricas.

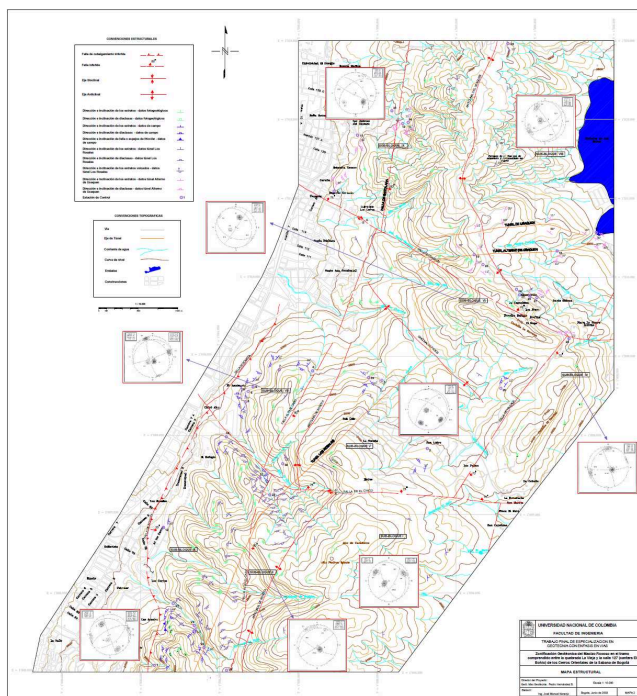


Figura 2. Mapa de Sectorización Estructural (Fuente: elaboración propia)

En el sector estudiado se observaron diversos tipos de modelados geomorfológicos (estructural, denudativo, de disección, lacustre, glacial, coluvial y por procesos morfodinámicos), siendo el modelado estructural el más recurrente (Figura 3).

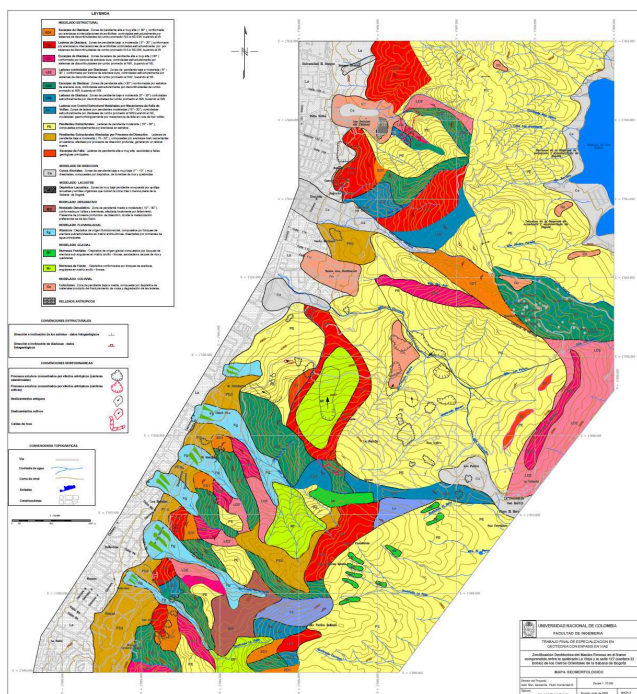


Figura 3. Mapa Geomorfológico (Fuente: elaboración propia)

4 ANÁLISIS DE PENDIENTES

Mediante el análisis de pendientes se busca cuantificar la inclinación de las geformas actuales con las condiciones de estabilidad del macizo rocoso. De esta forma el mapa de pendientes es un insumo básico para el estudio, el cual permite identificar y asociar zonas de pendiente homogénea, con tipos de material, características estructurales y procesos de inestabilidad.

De acuerdo con la escala de trabajo (1:10.000) y propósitos se determinaron seis intervalos de pendiente en función de los procesos de inestabilidad de laderas en macizos rocosos. Los intervalos seleccionados corresponden a las pendientes: 0-5°, 5°-15°, 15°-30°, 30°-40°, 40°-50° y >50°, los cuales permiten la adecuada valoración de este factor. El mapa final de pendientes se generó a partir de la base cartográfica digitalizada, con curvas de nivel elevadas cada 25 m; con la ayuda del Software SIG ILWIS.

Como resultado de la valoración de este mapa, se observa una clara tendencia en las zonas montañosas a ser escarpadas, en especial hacia el sector noroeste y suroeste del área de estudio, es decir la vertiente occidental de los Cerros Orientales de la Sabana de Bogotá. Allí las pendientes en general son mayores de 15°. Igualmente se observa la relación existente entre estas zonas de alta pendiente con la litología subyacente, compuesta en su mayoría por rocas de moderada a alta resistencia con un evidente control estructural.

De otra parte, las zonas planas a fuertemente inclinadas corresponden a amplios depósitos de tipo aluvial y lacustres, formando la zona plana de la sabana, el valle del río Teusacá y la zona correspondiente al Sinclinal de Patios. Allí las pendientes son menores de 15°. El evidente cambio morfológico de estos sectores se debe principalmente a la presencia de rocas más blandas o de menor resistencia las cuales se degradan y modelan con mayor rapidez. Como resultado final del análisis de pendientes (Figura 4), se obtuvo que en promedio el 40% del área de estudio se encuentra en pendientes entre 15° a 30°, 31% entre 5° a 15°, 13% entre 0° a 5°, 10% entre 30° a 40°, 4% entre 40° a 50° y un 2% con pendientes mayores de 50°.

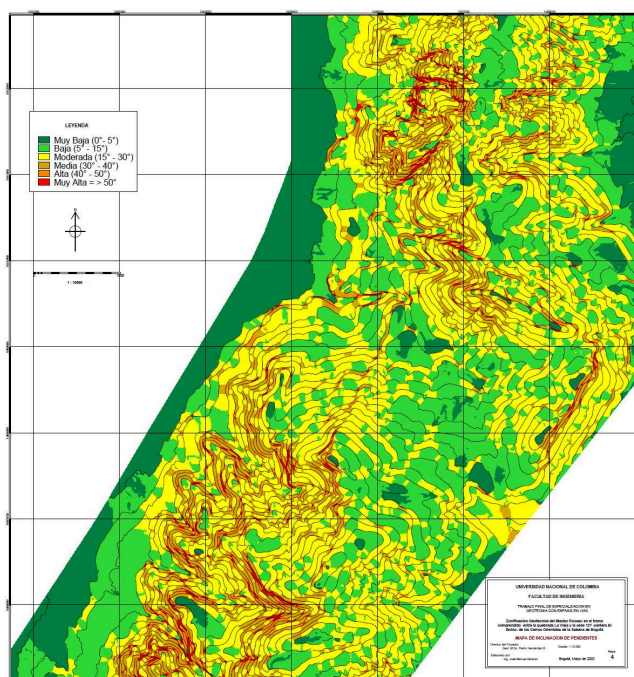


Figura 4. Mapa de Pendientes (Fuente: elaboración propia)

5 CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO

Parte fundamental dentro del estudio de zonificación geotécnica adelantado, tiene que ver con el conocimiento de las propiedades geomecánicas del material de roca, sin desconocer la gran subjetividad de las evaluaciones realizadas, teniendo en cuenta la extensión del área y la escala de estudio.

Para la caracterización geomecánica de las unidades de roca se tuvo en cuenta la información de laboratorio proveniente de los estudios de diseño y construcción de las principales obras subterráneas como los túneles de Los Rosales, Siberia y Usaquén. Igualmente, en zonas previamente seleccionadas se efectuó muestreo de bloques de roca, a los cuales se les realizaron ensayos de clasificación (peso unitario, peso específico de sólidos y absorción) y resistencia (resistencia a la compresión simple y carga puntual).

En total fueron seis los sitios seleccionados. El resumen de los resultados obtenidos de los testigos de roca ensayados es presentado en la Tabla 1. Las muestras seleccionadas corresponden a areniscas friables y cementadas.

A partir de la anterior tabla se concluye que el material rocoso presenta gran variación en cuanto la resistencia. Los materiales extremadamente débiles a moderadamente débiles se componen

Muestra	gt (gr/cm ³)	Gs	Absorción (%)	Resistencia de Is50 (scp) (kg/cm ²)	qu (kg/cm ²)
MR 1	2,02	2,10	6,69	56,7	66,7
MR 2	2,16	2,04	9,23	30,4	64,0
MR 3	2,20	2,47	4,07	390,0	265,3
MR 4	2,33	2,53	3,37	744,1	> 288,4
MR 5	2,34	2,54	3,33	493,9	199,1
MR 6	2,21	2,51	3,82	325,6	97,2

de lutitas en estado húmedo, arcillolitas y areniscas friables. Entre tanto los materiales catalogados de moderadamente fuertes a muy fuertes corresponden a areniscas cementadas y limolitas.

Es de anotar que en algunos tipos de roca como las lutitas, arcillolitas y limolitas el rango de variación es muy amplio dependiendo de las condiciones de humedad y alteración de las muestras. Para este estudio se tomaron los valores más bajos teniendo en cuenta la alta susceptibilidad de estos materiales a la meteorización.

Tabla 1. Resumen de resultados de laboratorio obtenidos a partir de muestreo de campo

5.1 Características físicas y geométricas de las discontinuidades

Como parte del trabajo de campo efectuado en la zona de estudio, se determinaron las principales características de las discontinuidades con base en el levantamiento estructural llevado a cabo en cada una de las estaciones de control. Mediante esta actividad se relacionan la naturaleza y condiciones particulares de las discontinuidades con relación a la presencia de estructuras geológicas regionales como fallas y pliegues.

Con base en el análisis de frecuencias se observa como en el sub-bloque III las discontinuidades se presentan próximas a separadas (0.2 a 2 m), rugosas, ligeramente abiertas a cerradas (<0.1 cm), poco continuas a discontinuas (< 5 m); y planas. En el sub-bloque VII se presentan separadas (0.6 – 2 m), rugosas a muy rugosas, a excepción de la diaclasa D2, la cual se manifiesta suave, cerradas a muy abiertas, continuas y discontinuas y onduladas. En el sub-bloque VIII se caracterizan por presentarse bastante próximas a próximas (0.2 – 2 m), muy rugosas, ligeramente abiertas a cerradas (<0.1 cm), discontinuas y continuas en la estratificación, y planas.

En cuanto al sub-bloque IX las discontinuidades se presentan próximas a separadas (0.2 a 2 m), rugosas, cerradas y abiertas entre estratos, discontinuas y continuas en la estratificación y onduladas. el Sinclinal de Patios y las fallas del Alto El Cabo, Santa Ana, la falla de Bogotá, Usaquén, Teusacá y El Chicó.

6 CLASIFICACION GEOMECÁNICA DEL MACIZO ROCOSO

La clasificación del macizo rocoso se efectuó con base en el sistema CSIR (RMR), propuesto por Bieniawski (1976), y en el sistema SMR para taludes propuesto por Romana (2000). Esta parte del estudio comprendió el levantamiento de la información litológica, estructural y geotécnica; parámetros que contiene la clasificación citada, a partir de las estaciones de campo efectuadas.

Posteriormente, con base en la información de clasificación del macizo rocoso y en las características geomorfológicas evaluadas del sector, se generó el mapa de zonificación por

calidad del macizo rocoso. En él se representan las distintas zonas categorizadas por tipo de macizo y geoforma asociada.

Para la calificación final del macizo rocoso, se optó por adoptar la propuesta de Romana (2000), SMR para taludes, mediante la cual se sustituye el sistema de 5 Clases por el de 10 Subclases. Cada Subclase tiene un rango de 10 puntos, manteniendo cierto grado de correlación con la división anterior, denominados con el numeral romano de Bieniawski (I, II, III, IV, V) seguido de una letra: "a" para la mitad superior y "b" para la mitad inferior de cada clase.

La calidad general de macizo rocoso en la zona de estudio presenta variaciones entre mala – media (IV a) a buena – media (II b), según el sistema de clasificación utilizado; pero también se encuentran sectores con condiciones muy desfavorables que corresponden a zonas de falla.

El resumen de la clasificación final del macizo rocoso se presenta en la Tabla 2. A partir de esta última se evidencia la relación existente entre el tipo de litología y la calificación obtenida para cada estación de campo.

7 ZONIFICACIÓN POR CALIDAD DEL MACIZO ROCOSO

La determinación de zonas homogéneas con relación a la calidad del macizo es muy común en obras subterráneas o lineales y tienen por objeto relacionar las características geométricas y de resistencia del macizo rocoso en función del proyecto en particular.

En el presente estudio se involucra este análisis en la zonificación geotécnica por inestabilidad de laderas mediante la evaluación geológica y geomorfológica. De esta forma se pretende analizar la relación existente entre tipos de macizo rocoso y geoformas asociadas.

Los resultados obtenidos son de gran utilidad principalmente con fines ingenieriles, al involucrar el contexto morfogenético de la zona con la clase de macizo rocoso. Igualmente, esta zonificación por calidad del macizo es importante en cuanto a la aplicabilidad de las clasificaciones geomecánicas en zonificaciones geotécnicas a escala semidetallada.

Para lograr el objetivo de zonificar el área de estudio en función de la calidad del macizo rocoso, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- El puntaje y clasificación del macizo rocoso con base en el RMR, obtenido a partir de las diferentes estaciones de control, aplicando las recomendaciones de Bieniawski (1976) para taludes en roca. La denominación de cada clase de macizo se efectuó con base en la propuesta de Romana (2000) para taludes, sistema SMR.

- El tipo de litología, basado en el mapa de geología para ingeniería, estableciendo las unidades de roca propiamente dichas y las unidades no consolidadas o suelos.

- El tipo de modelado asociado a cada clase de macizo rocoso, cruzando la información litológica y de clasificación con el mapa geomorfológico.

Los resultados producto del desarrollo del anterior procedimiento determinó la presencia de 11 tipos de macizo rocoso (Figura 5).

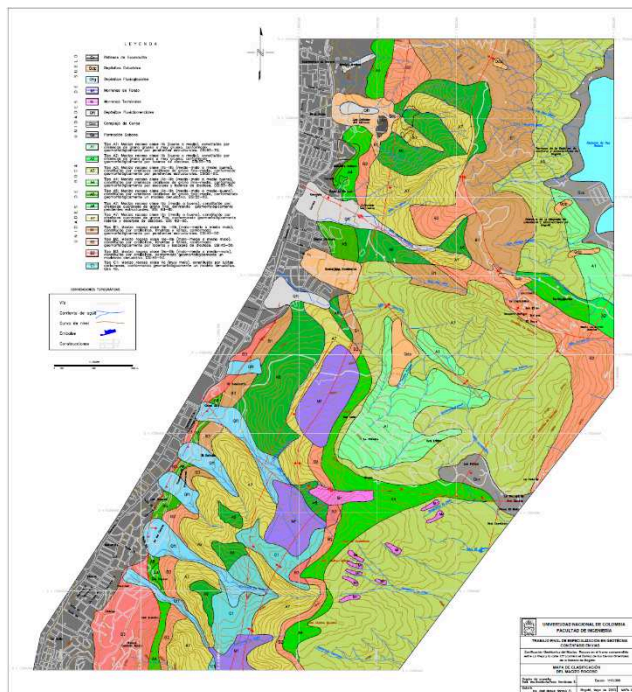


Figura 5. Mapa de Zonificación por Calidad del Macizo Rocoso (Fuente: elaboración propia)

8 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA SEMICUANTITATIVA DEL MACIZO ROCOSO

El principal objetivo del presente estudio se relaciona con la evaluación y análisis de información de índole litológico, geomorfológico y características del macizo rocoso, para de esta forma lograr mediante una metodología adecuada valorar dichos aspectos y llegar a determinar zonas geotécnicamente homogéneas. Según Forero, Avila y Caro (1994), en un sentido amplio, las zonificaciones geotécnicas se presentan como un importante instrumento técnico que permite definir entre otros aspectos: estimación de grado de amenaza por factores naturales, caracterización geomecánica de suelos y rocas, identificación y caracterización de las fuentes de materiales de construcción, definición de la estabilidad de cada zona ante obras civiles como edificios, vías o líneas de conducción, y llegar al uso recomendado del suelo desde el punto de vista de estabilidad.

En este trabajo se presenta la Zonificación Geotécnica Semicuantitativa del Macizo Rocos, entendida como la susceptibilidad a generar procesos de inestabilidad de laderas. Bajo este marco de referencia y teniendo en cuenta la escala de trabajo (1:10.000), los resultados de este estudio son aplicables en análisis de factibilidad para obras de ingeniería y como insumo en la generación de mapas de uso del suelo y en general de ordenamiento territorial urbano.

8.1 Metodología de Zonificación

La evaluación de estabilidad de una ladera requiere del conocimiento y análisis de los principales factores que intervienen en su comportamiento. La cuantificación de estos factores de por sí es muy compleja debido a su naturaleza o por falta de información que permita fijar intervalos de influencia. Por lo tanto, surge la necesidad de emplear metodologías cualitativas o semi-cuantitativas para evaluar la influencia en la

Tabla 2. Resumen clasificación geomecánica del macizo rocoso

LITOLÓGIA	ESTACIÓN	GSI	RMR	DENOMINACIÓN-SMR
Arenisca Friable	2	70	65	Buena a Media
(Formación Arenisca Tierna)	3	65	62	Buena a Media (II b)
Arenisca Cementada	1	60	50	Media a Mala
(Formación Arenisca Labor)	9	65-70	59	Media a Buena
	11	75-80	61	Buena a Media
	17	50-55	46	Media a Mala
	21	60	45	Media a Mala

estabilidad de cada uno de los factores, a partir de una asignación de calificaciones o puntaje de estabilidad. Basados en las características geotécnicas del área de estudio y teniendo en cuenta la escala de trabajo, se optó por emplear como metodología básica de zonificación la realizada por EARL E. BRABB, dentro del estudio denominado: "Sistemas de Información Geográfica (GIS) para la Predicción de las Consecuencias por Procesos de Amenazas Geológicas de la Región de San Mateo California – Estados Unidos - Servicio Geológico de los Estados Unidos – 1986, 1987".

Mediante esta metodología se evalúan los principales factores intrínsecos desde el punto de vista de inestabilidad de laderas, enfatizando en el presente estudio los análisis de estabilidad del macizo rocoso, de tal forma que fuera acorde con la escala de trabajo.

8.1.1 Factores Básicos Considerados

Entre los factores básicos considerados se tienen:

- Tipo de Material: La evaluación del tipo de material se realiza con base en el mapa de Geología para Ingeniería, el cual contiene información referente a las características de origen, textura y composición de los suelos y rocas presentes en el área de estudio.

- Inventario de Procesos Morfodinámicos: Parte fundamental de la zonificación geotécnica por inestabilidad de laderas, tiene que ver con la localización y distribución espacial de los procesos morfodinámicos actuales y pasados y/o zonas afectadas. La detallada identificación y caracterización de estos procesos permite asociar propiedades en cuanto a tipo de material y pendientes con la presencia de zonas inestables.

- Geomorfología: Las condiciones geomorfológicas determinan el origen y evolución de los paisajes dentro de una determinada zona. En este contexto la geomorfología tal como se plantea en este estudio, relaciona las características que dan origen a las laderas con las geoformas que actualmente se observan. Por tal razón los aspectos geomorfológicos son de gran importancia en la zonificación geotécnica, principalmente en la caracterización física del territorio, al aportar información sobre historia reciente y desarrollo del paisaje y su relación con la litología, origen y evolución de los distintos modelados.

- Pendientes: La condición de estabilidad de una ladera está asociada en términos de relieve a las características morfométricas, ya que es necesaria cierta pendiente para que se produzcan los movimientos en masa. En el área de estudio se seleccionaron los intervalos de pendiente en función de los procesos de inestabilidad de laderas en el macizo rocoso, con el fin de lograr categorizar debidamente las laderas con relación a los mecanismos de falla existentes.

8.2 Etapas de la Zonificación

8.2.1 Cálculo de Áreas de Afectación por Procesos de Inestabilidad

En esta etapa se tienen en cuenta los resultados obtenidos de los mapas de geología para ingeniería, estructural y geomorfológico. De acuerdo con la metodología, en este aparte se busca relacionar la presencia de zonas inestables con los tipos de materiales, para de esta forma llegar a una primera calificación de susceptibilidad.

El procedimiento descrito a detalle es como sigue y los resultados se presentan en la Tabla 3.

8.2.2 Determinación de Intervalos de Calificación

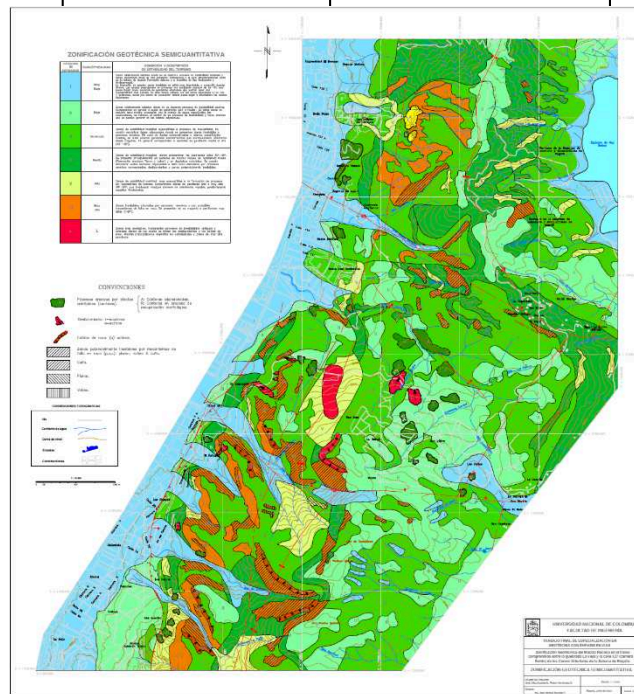
Del análisis a partir de la combinación del mapa de pendientes con el mapa de geología para ingeniería y el inventario de deslizamientos, se determinan sistemáticamente para cada intervalo de pendiente la frecuencia de procesos de inestabilidad, con relación a cada unidad litológica. De esta forma se definen las zonas geotécnicamente homogéneas de inestabilidad de laderas (Tabla 4).

Tabla 3. Relación de áreas de afloramiento y de afectación por unidad litológica

AREA (KM²)	AREA (%)	DESLIZAMIENTOS	AREA PROCESOS MORFODINÁMICOS (RMF)					TOTAL AREA AFECTADA (KM²)	% AREA AFECTADA POR UNIDAD GEOLOGICA
			CAIDA DE BLOQUES	ROSIÓN CONCENTRADA POR EFECTOS ANTROPICOS	ZONAS POTENCIALMENTE INESTABLES POR MECANISMOS DE FALLA EN ROCA				
					PLANAR	CUÑA	VOLITO		
7	18,82	0,034	0,2	0,1	0,3	0,6	0,02	1,254	17,91
6	16,13	0,01		0,037	0,14	0,16		0,337	5,62
14	37,63		0,054	0,14	0,02	0,15		0,364	2,60
2	5,38	0,02		0,16				0,18	9,00
0,4	1,08					0,03		0,03	7,50
1	2,69			0,02				0,02	0,74
1,3	3,49	0,13						0,13	10,00
0,86	2,31	0,03		0,03				0,08	9,30
4,64	12,47								0,00

Tabla 4. Intervalos de calificación de susceptibilidad con base en el porcentaje de área afectada por unidad litológica

% AREA AFECTADA POR UNIDAD GEOLOGICA	1ra. CALIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD
100,00	L
17,00 - 100	VI
9,00 - 17,00	V



8.2.3 Sensibilización de la calificación a partir del mapa de pendientes

Como indicativo y con el fin de correlacionar la calificación de susceptibilidad se calculó el promedio ponderado de procesos de inestabilidad por unidad litológica. A partir de este análisis se logra visualizar de forma más clara el grado de afectación de las distintas unidades y a su vez permite ratificar la calificación obtenida. Igualmente en el análisis de susceptibilidad se incluyó a manera de información los resultados de la clasificación del macizo rocoso para el área de estudio, con su correspondiente puntaje según el RMR. Con base en lo obtenido se nota una leve

tendencia de los macizos con el más bajo puntaje relacionados directamente con zonas de susceptibilidad de baja calificación.

8.3 Descripción de Zonas de Susceptibilidad

La zonificación geotécnica del macizo rocoso por inestabilidad de laderas se presenta en la Figura 6; así mismo se describen las distintas zonas enfatizando en las condiciones morfológicas, morfométricas y de estabilidad del macizo rocoso.

El principal uso y propósito de este mapa, es ayudar en la identificación de zonas de mayor inestabilidad.

La descripción de las zonas es como sigue:

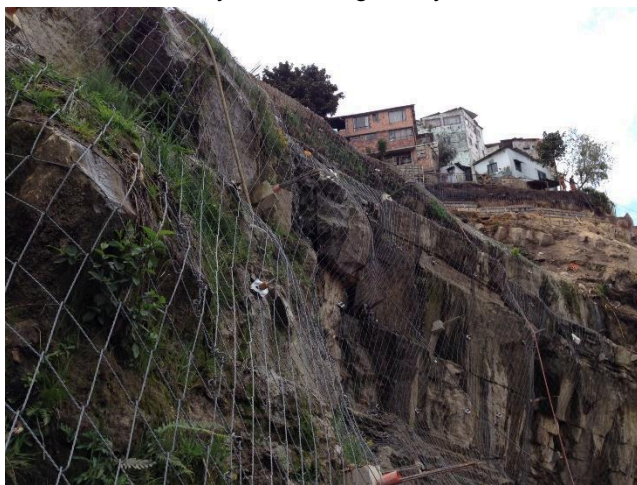
Categoría I: Zonas relativamente estables donde no se observan procesos de inestabilidad recientes y donde predominan áreas de muy baja pendiente. Las laderas generalmente se presentan con pendientes menores a los 5°, pero puede incluir áreas pequeñas de pendientes empinadas que podrían tener una susceptibilidad más elevada. Corresponde a la zona aproximadamente plana de la Sabana de Bogotá, conformada litológicamente por la Formación Sabana, y por depósitos de tipo fluvio-glacial y fluvio-torrencial.

Categoría II: Zonas relativamente estables, donde no se observan procesos de inestabilidad severos. Corresponden en general a zonas de pendiente baja (5° a 15°), donde predominan macizos rocosos de resistencia débil a moderadamente débil con una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 50 kg/cm², compuestos por arcillolitas y areniscas friables.

Categoría III: Zonas de estabilidad marginal susceptibles a procesos de inestabilidad, donde es común encontrar áreas adyacentes que presentan zonas inestables y procesos erosivos. En general corresponden a sectores de pendiente moderada (15°-30°), conformadas en gran extensión por macizos rocosos de resistencia moderadamente fuerte con una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 120 kg/cm², compuestos por areniscas cementadas y limolitas.

Figura 6. Mapa de Zonificación Geotécnica del Macizo Rocosó (Fuente: elaboración propia)

Categoría IV: Zonas de estabilidad marginal, donde predominan las laderas con pendientes medias (30°-40°). Se presenta principalmente en sectores de macizo rocoso de resistencia moderadamente fuerte a fuerte, con una resistencia a la compresión uniaxial promedio de 245 kg/cm², compuestos por areniscas cementadas y lutitas en su gran mayoría.



Categoría V: Zonas de estabilidad marginal, muy susceptibles a la formación de procesos de inestabilidad de laderas. Comprende en general zonas de pendiente alta 30°-50°, que involucran macizos rocosos muy fracturados de resistencia variable. En estas zonas se evidencian procesos de inestabilidad

como deslizamientos en depósitos coluviales y glaciales (morrenas de fondo).

Categoría VI: Zonas inestables asociadas con mecanismos de falla en roca. Se presentan en su gran mayoría en pendientes muy altas (>50°) y en macizos rocosos de areniscas cementadas muy fracturados y de fuerte resistencia a la compresión uniaxial (510 kg/cm² - promedio).

Categoría L: Zonas muy inestables. Comprende procesos de inestabilidad antiguos y actuales dentro de los cuales se tienen deslizamientos y caídas de roca. Afectan principalmente depósitos no consolidados y zonas de muy alta pendiente.

9 SISTEMAS FLEXIBLES PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES Y PROTECCIÓN CONTRA CAÍDAS DE ROCA

En el marco de la zonificación geotécnica del tramo de los cerros orientales de Bogotá adelantado, se ha buscado igualmente ilustrar y enfatizar en la necesidad de adoptar adecuadas medidas de control y mitigación.

Las medidas que tradicionalmente han sido usadas para la estabilización de taludes en roca muchas veces crean una falsa percepción del riesgo en tanto no poseen muchas veces criterios óptimos de diseño, seguridad, durabilidad y eficiencia.

Como alternativa al concreto lanzado (Shotcrete) y en general a medidas de alta rigidez estructural, se ha optado en varios sectores críticos por la utilización de sistemas flexibles con base en mallas romboidales de alambre de acero de alta resistencia, placas de fijación y pernos de anclaje para estabilización de taludes o laderas, demostrando una alta fiabilidad y respuesta eficiente frente a mecanismos de falla en roca, tal es el caso de una antigua cantera presente en la zona de estudio, hoy en día urbanizada y con una alta amenaza estabilizada por este tipo de sistema integrado, (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Estabilización reciente en talud rocoso de antigua cantera al norte de los Cerros Orientales de Bogotá empleando malla de alta resistencia, platinas y pernos de anclaje (Fuente: elaboración propia)

Figura 8. Vista general de uno de los antiguos frentes de explotación



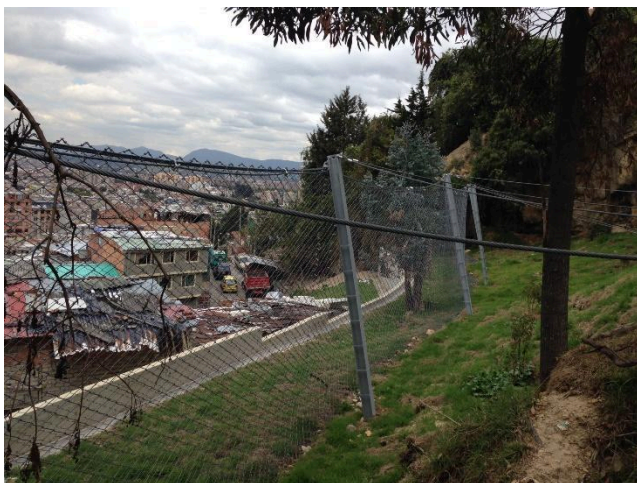
intervenidos con sistemas de estabilización flexible (Fuente: elaboración propia)

Igualmente se ha hecho cada vez más recurrente el empleo de barreras dinámicas para la protección de sitios clave donde por diversas circunstancias se hace más viable y económico su implementación.

Las capacidades de tales sistemas han sido aumentadas gracias a un desarrollo tecnológico continuo con barreras contra caída de roca con capacidad de absorción de energía de 100 a 10'000kJ; justamente en la cantera antes señalada se instalaron varios metros de barreras dinámicas de distinta capacidad, redundando

en una mayor resiliencia del sistema integrado de estabilización y mitigación allí instalado. (Figuras 9 y 10).

Figura 9. Sistema de protección mediante barrera dinámica de 1500 Kj



instalada en antigua zona de explotación hoy urbanizada al norte de Bogotá (Fuente: elaboración propia)



Figura 10. Integración de sistemas flexibles mediante barreras dinámicas junto con medidas de control en antigua cantera (Fuente: elaboración propia)

Los anteriores ejemplos de medidas de protección y estabilización nos comprometen desde el punto de vista de diseñadores, constructores y tomadores de decisión, en la necesidad de optar o por lo menos considerar reales alternativas que se adapten a las condiciones críticas de nuestro medio físico. Esta consideración es de vital importancia puesto que, aunque las aproximaciones al estado de amenaza y riesgo geológico son acertadas, de nada sirven si las medidas no son las óptimas y desde el punto de vista real y práctico no cumplen con los objetivos técnicos y económicos de un proyecto.

10 RESULTADOS

En cuanto a la cartografía de fallas y pliegues, se logró determinar con un elevado detalle la traza de estas, llegando a detectar la presencia de estas, georrefrenciándolas por medio de GPS. Sin embargo, se concluye que aún falta investigar con mayor detalle

el contexto geológico de la Sabana de Bogotá, principalmente en cuanto a actividad reciente de estas fallas.

La calidad de los resultados obtenidos, empleando la metodología de zonificación propuesta por Brabb E., depende directamente de una muy buena cartografía de geología para ingeniería, geomorfología y morfometría. La evaluación de los parámetros exige el mayor detalle posible, sin dejar de lado el objetivo principal, el cual es, evaluar las condiciones intrínsecas de las laderas en función de los procesos de inestabilidad que la puedan afectar.

En este sentido se nota muy claramente las bondades técnicas de la metodología, al adaptarse muy fácilmente a estudios detallados, empleando muy pocos recursos económicos y de tiempo. Es importante en todo caso tratar de implementar un Sistema de Información Geográfica, de tal forma que permita efectuar un análisis de mayor precisión.

Existen sin embargo algunas falencias de la metodología. La cartografía de procesos morfodinámicos es fundamental en la calificación de intervalos de susceptibilidad. De acuerdo con esto dicho mapa depende en gran medida de la experiencia del profesional al fotointerpretar y reconocer en campo los procesos de inestabilidad. Este inconveniente, sumado a la imposibilidad de reconocer muchas veces algunos deslizamientos antiguos enmascarados por la vegetación o por edificaciones se puede solventar empleando para ello un completo análisis a partir de fotografías aéreas multitemporales y por medio de una detallada revisión bibliográfica.

11 CONCLUSIONES

Las características de los materiales y las geofomas dominantes en el sector estudiado de los Cerros Orientales de la Sabana de Bogotá son influenciadas y en algunos casos consecuencia directa de las estructuras geológicas presentes. Una de las evidencias más claras al respecto es el alto grado de fracturamiento detectado en la gran mayoría de las estaciones de campo efectuadas.

Morfológicamente esta parte de los Cerros Orientales presenta características particulares, las cuales la hacen muy distinta con respecto a otros sectores. En general predominan los modelados estructurales, determinados por la presencia de discontinuidades, las cuales condicionan la estabilidad de las laderas. De otra parte, la zona presenta un relieve moderado, donde prevalecen pendientes medias a altas (15° - 45°), definidas por la presencia de grandes zonas de afloramiento del macizo rocoso.

Con base en la clasificación geomecánica del macizo rocoso, la zona presenta calificaciones del RMR que oscilan entre 35 y 65 puntos, definiendo macizos desde mala a buena calidad. Esta característica permite deducir la amplia variación de comportamiento del macizo con relación a las estructuras geológicas y su morfología. De otra parte, la realización de mapas de calificación del macizo representa un insumo básico en la calibración de zonificaciones geotécnicas como la efectuada en el presente estudio.

Es preponderante que las entidades gubernamentales, los consultores y contratistas sumen esfuerzos en la implementación de medidas de protección y estabilización óptimas, y que efectivamente reduzcan el riesgo en las áreas críticas, evitando con ello consecuencias que pueden llegar a cobrar vidas.

12 AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al Geólogo MSc. Pedro A. Hernández B., director del trabajo, por su asesoría, revisión y corrección del presente documento.

Al Doctor Earl Brabb del Servicio Geológico de los Estados Unidos por su asesoría y material suministrado.

Al Doctor Adolfo Alarcón Guzmán, Director de INGEOMINAS.

A la Ingeniera Yolanda Calderón L.

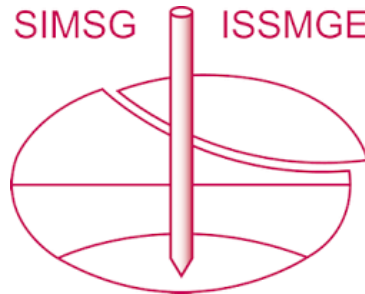
Al Geólogo Edgar Carrillo Lombana.

A las señoras Ana Isabel Alvarado y Ana Teresa Ramírez, por su valiosa colaboración.

12 REFERENCIAS

- BIENAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. Transactions, South African Inst. of Civil Engineers, vol. 15, n° 12. 1973. p. 335-344.
- BRABB, Earl E. The San Mateo County California GIS Project for Predicting the Consequences of Hazardous Geologic Processes. U.S. Geological Survey, Menlo Park. 1987.
- FLUM, D. TECCO Slope Stabilization System under earthquake load – Recent results from around the world. Geobrugg Jubilee Annual Meeting, Davos, Switzerland. 2011.
- FLUM, D., RÜEGGER, R., 2004. Dimensioning of flexible surface stabilization systems made from high-tensile steel wire meshes in combination with nailing and anchoring in soil and rock. IX International Symposium on Landslides. Rio de Janeiro, Brasil. 2004.
- FONSECA, R.-L. Aplicación de Membranas Flexibles para la Prevención de Riesgos Naturales. ISBN 978-84-613-6018-5. Madrid, España. 2010.
- FONSECA, R.-L., TORREBADELLA BARRAT, J., ALTIMIR PLANES, J., AMIGO MITJANA, J. Análisis comparativo entre la norma Suiza (FOEN) y la recomendación ETAG-27 (EOTA), para la homologación de kits de barreras de protección contra desprendimientos de rocas. 2008.
- HIGGINS, J. Recommended Procedures For The Testing Of Rock-Fall Barriers. Requested By: American Association Of State Highway And Transportation Officials (AASHTO). Colorado School Of Mines, Department Of Geology & Geological Engineering. 2003.
- HOEK, E. and BRAY, J. W. Rock slope engineering. 3rd ed. The Institution of Mining and Metallurgy. London. 1981.
- ROMANA RUIZ, Manuel. Recomendaciones de sostenimiento para túneles. Revista de Obras Públicas. Octubre, 2000. Barnett, M. (1973). "Geotechnical research studies" Geotechnical Science, 8(1): 102-116.
- WSL. Field testing of rockfall protection barriers. A comparison between inclined ropeway and vertical crane testing. Swiss Federal Institute WSL, Department of Natural Hazards. Suiza. 2001.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.