

Evaluation by different methodologies of collapse potential of some residual soils in Aburrá and San Nicolás Valleys

Yamile Valencia-González ^a, Jorge Andrés Yepes-García ^b & Oscar Echeverri-Ramírez ^c

^a Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. yvalenc0@unal.edu.co

^b Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jayepes@unal.edu.co

^c Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. oecheve@unal.edu.co

Received: February 24th, 2015. Received in revised form: April 11th, 2015. Accepted: July 7th, 2015.

Abstract

The process of precipitated variation of a soil volume when subjected to increase in stresses which withstand and/or the degree of saturation, it's also known as collapse. Collapse Potential of soils can be determined from correlations derivative of the material properties index. That's why in this work, it was evaluated using different methods the Collapse Potential of soils for ten specimens of tropical residual soils coming from five different points in Aburrá and San Nicolás Valleys, and the results were compared with the index collapse obtained using the duple-oedometer test. It was achieved to establish which of the procedures is closer to the traditional test results, and thereby obtain an approximation to the potential collapse using easy implementation methodologies with significant costs savings and rehearsal times, without loss of reliability evaluation.

Keywords: Collapsible soils; duple-oedometer test; Collapse Potential

Evaluación por diferentes métodos del potencial de colapso de algunos suelos residuales en los Valles de Aburrá y San Nicolás

Resumen

El proceso de variación precipitada del volumen de un suelo cuando se ve sometido a un aumento en las tensiones que soporta y/o cuando se satura, se conoce como colapso. El potencial de colapso de los suelos se puede determinar a partir de correlaciones derivadas de las propiedades índice de los materiales. Se evaluó por diferentes métodos el potencial de colapso en diez muestras de suelos residuales tropicales provenientes de cinco puntos diferentes de los valles de Aburrá y San Nicolás, y se compararon los resultados con el índice de colapso obtenido a partir del ensayo de doble edómetro, logrando establecer cuál de los procedimientos se acerca más a los resultados del ensayo tradicional y de esta manera obtener una aproximación al potencial de colapso a partir de metodologías de fácil ejecución con ahorros significativos en tiempos de ensayo y costos asociados, sin pérdida de confiabilidad en la evaluación.

Palabras clave: potencial de colapso, suelos residuales; ensayo de doble edómetro.

1. Introducción

Algunos suelos presentan una estructura metaestable cuando los partículas que lo forman establecen entre si vínculos mediante agentes cementantes, vínculos que aportan una resistencia temporal a pesar de los vacíos significativos que hacen parte de la fábrica y que pueden deformarse volumétricamente.

El colapso es un fenómeno que ocurre en suelos porosos no saturados y con estructura metaestable y es detonado por el aumento en el grado de saturación y/o en las tensiones que soporta el mismo suelo, provocando el ablandamiento o la

remoción de los vínculos que unen las partículas y su colapso hacia los poros vacíos (tal como se observa en la Fig. 1), lo que se refleja en un cambio repentino del volumen del suelo y en la pérdida de la resistencia al corte del material.

Los efectos producidos por el fenómeno del colapso representan un problema para las obras civiles, al potenciar el desarrollo de fisuras y grietas en estructuras por asentamientos diferenciales, el deslizamiento de taludes, la ruptura de terraplenes, el hundimiento de las bancas en la vía, daños en el pavimento entre otros problemas; de ahí la importancia de su estudio de manera que se logre estimar su ocurrencia y tomar las medidas pertinentes a fin de minimizar su impacto.

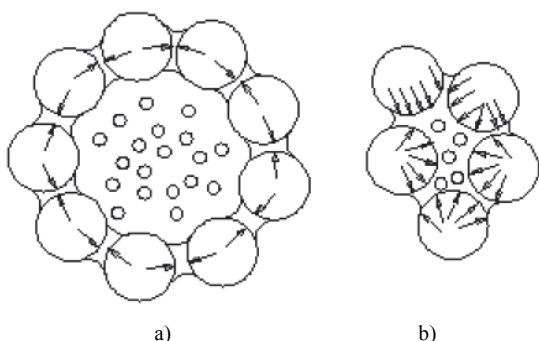


Figura 1. Estructura de un suelo a) antes y b) después del colapso
Fuente: [1]

La magnitud del colapso y su velocidad dependen de la mineralogía, del porcentaje de saturación, del índice de vacíos, de los iones absorbidos, de los tipos de iones y sus concentraciones en el agua que está en los poros, de la historia de esfuerzos, y las sobrecargas aplicadas (Dudley, 1970 citado en [2]) y de la estructura del suelo [2]. Las altas temperaturas y precipitaciones de las regiones tropicales contribuyen a la generación de una amplia variabilidad de suelos residuales con propiedades geotécnicas particulares, que propicien la ocurrencia de ciertos fenómenos como el de colapso.

Son varios los métodos propuestos a partir de la evaluación de algunos de los parámetros físicos de los suelos para la estimación cualitativa del potencial de colapso de un

Tabla 1. Criterios reportados para la identificación de suelos que sufren colapso

Investigador	Año	Criterio
Denisov	1951	Coeficiente de hundimiento: $K = \frac{\text{relación de vacíos en el límite líquido}}{\text{relación de vacíos natural}}$ K = 0,5 – 0,75: Alto potencial de colapso K = 1,0: limoarcilloso que no presenta colapso K = 1,5 – 2,00: suelos que no presenta colapso
Priklonski	1952	$K_D = \frac{(\text{humedad natural} - \text{límite plástico})}{\text{índice de plasticidad}}$ K _D < 0,0: suelos con alto potencial de colapso K _D > 0,5: suelos que no presenta colapso K _D > 1,0: suelos expansivos
Soviet Building Code	1962	$L = \frac{e_0 - e_L}{1 + e_0}$ donde e ₀ = relación de vacíos natural y e _L = relación de vacíos en el límite líquido. Para un grado de saturación natural menor que 60%, si L > 0,1, se trata de un suelo que presenta colapso.
Feda	1964	$K_L = \frac{w_0}{S_r} - \frac{L_p}{I_p}$ donde w ₀ = contenido de agua natural, S _r = grado de saturación natural, L _p = límite plástico e I _p = índice de plasticidad. Para S _r < 100%, si K _L > 0,85, se trata de un suelo que presenta colapso.
Handy	1973	Loess de Iowa con contenido de arcilla (<0,002 mm): <16%: alta probabilidad de colapso 16-24%: probabilidad de colapso 24-32%: menos del 50% de probabilidad de colapso >32%: usualmente seguro contra el colapso

Fuente: adaptado de [3]

suelo. La Tabla 1 presenta un resumen de las propuestas implementadas para determinar dicho potencial según [3].

Los ensayos edométricos han sido los más utilizados en el laboratorio para evaluar la posibilidad de ocurrencia de colapso. Existen dos maneras de realizar estos ensayos: ensayos edométricos simples o ensayos de doble edómetro.

El ensayo de doble edómetro analizado en este trabajo, consiste en la realización de dos ensayos edométricos (norma ASTM D2435-11 [4]) paralelamente en la misma muestra de suelo, una en condición de humedad natural y la otra en condición saturada. El propósito de este trabajo es establecer cuál de los métodos existentes puede dar una mejor aproximación al resultado de índice de colapso por el ensayo de doble edómetro.

La validación de los métodos de la Tabla 1 se realizó mediante la comparación de los resultados con la estimación cuantitativa del índice de colapso propuesto por [1] que se muestran en las ec. (1) - (3):

$$I = \frac{\Delta e_c}{\left[1 + \left(\frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}}\right) \times e_{0(medio)}\right]} \quad (1)$$

$$\Delta e_c = \left[\left(\frac{e_{nat}}{e_{0(nat)}}\right) - \left(\frac{e_{sat}}{e_{0(sat)}}\right)\right] \times e_{0(medio)} \quad (2)$$

$$e_{0(medio)} = \frac{(e_{0(nat)} + e_{0(sat)})}{2} \quad (3)$$

Donde e_{0(nat)} y e_{0(sat)} son las relaciones de vacíos inicial de la muestra en estado de humedad natural y saturada; y e_{nat} y e_{sat} son las relaciones de vacíos final en estado de humedad natural y saturada. Estas variables se obtienen al realizar un ensayo de doble edómetro. Los criterios para categorizar el índice de colapso se muestran en la Tabla 2.

2. Metodología

El área de estudio corresponde a los valles de Aburrá y San Nicolás, ubicados sobre la Cordillera Central de los Andes en el departamento de Antioquia, República de Colombia. El de Aburrá es un valle estrecho cruzado por el río Medellín, rodeado por laderas de topografía irregular y que oscilan entre los 1.300 y 2.800 metros sobre el nivel del mar. El Valle de San Nicolás se encuentra al oriente del Aburrá, su geografía se asemeja a la de un altiplano entre los 1.900 y 2.600 metros sobre el nivel del mar.

Tabla 2. Clasificación del potencial de colapso de suelos para obras de ingeniería

CP (%)	Gravedad del problema
0-1	Ninguno
1-5	Moderado
5-10	Problemático
10-20	Grave
>20	Muy grave

Fuente: [1]

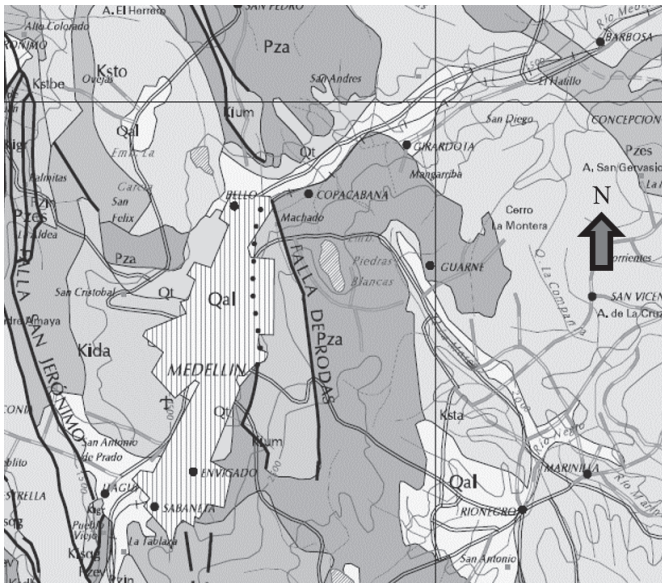


Figura 2. Geología de la zona de estudio. Sin escala. Fuente: [5]

La geología en el Valle de Aburrá es diversa. De manera general y tal como se observa en la Fig. 2 se pueden encontrar depósitos aluviales (Qal) en la llanura de inundación del río Medellín, mientras que en las laderas aparecen formaciones de rocas plutónicas como dioritas y dunitas (Kida, Kium); y metamórficas como anfibolitas (Pza). Al norte del Valle de Aburrá y gran parte del San Nicolás se encuentra el Batolito Antioqueño (Ksta) correspondiente a afloramientos cuarzdioríticos.

Se trabajaron en total 10 muestras inalteradas en cinco puntos diferentes de ambos Valles, ocho de las muestras provienen de suelos residuales de anfibolitas y tres provienen de suelos residuales del Batolito Antioqueño. Para las muestras recolectadas se determinaron los parámetros físicos mediante la ejecución de ensayos de laboratorio: humedad natural (ASTM D2216-10 [6]), gravedad específica (ASTM D854-14 [7]), límites de consistencia (ASTM D4318-10 [8])

y granulometría por tamizado e hidrómetro (ASTM D422-07 [9]); los resultados se presentan en la Tabla 3.

Una vez definidos los parámetros físicos fue posible aplicar los distintos métodos expuestos en la Tabla 1 con el fin de identificar cualitativamente el potencial de colapso de los suelos. Posteriormente se realizaron los ensayos de consolidación duplo edométrica, los cuales permitieron obtener las variables necesarias para calcular el índice de colapso, y así realizar las respectivas comparaciones.

3. Resultados y discusión

Los resultados de la caracterización física de los suelos estudiados se muestran en la Tabla 3, donde:

- G_s**: Gravedad específica
- e**: Relación de vacíos
- e_l**: Relación de vacíos en el límite líquido, se define como $G_s \times L_L$
- n (%)**: Porosidad
- S (%)**: Saturación
- w (%)**: Humedad natural
- L_L (%)**: Límite líquido
- L_P (%)**: Límite plástico
- I_p**: Índice de plasticidad

Los suelos estudiados corresponden a suelos residuales de Anfibolitas y del Batolito Antioqueño, clasificados como MH, ML, CL y CL-ML. Las arcillas poseen pesos específicos entre 2,61 y 2,65, mientras en los limos el peso específico se encuentra entre 2,73 y 2,98.

Por otro lado, los resultados de los cálculos del índice de colapso y de las estimaciones para el potencial de colapso de los mismos suelos se presentan en la Tabla 4.

Varios de los resultados presentados en la Tabla 4 indican como potencial de colapso “no concluyente”. Esto significa que el valor obtenido de colapso aplicando dicha metodología, no se encuentra dentro del rango establecido por la misma.

El método propuesto por Handy no refleja ser el más adecuado para los suelos residuales estudiados, debido a que en ninguno de los casos valora los suelos como susceptibles al colapso. Esto evidencia la singularidad del método, el cual se desarrolló específicamente para loess en función de su granulometría.

Tabla 3. Caracterización física de los suelos estudiados

Localización	Geología	Suelo	Caracterización física												
			Finos (%)	USC	G _s	e	e _l	n (%)	S (%)	w (%)	L _L (%)	L _P (%)	I _p		
Cerro El Volador, Medellín, Valle de Aburrá	Anfibolitas margen izquierda rio Medellín	1	86	MH	2,85	1,67	1,54	63	53	31	54	30	24		
		2	80	MH	2,85	1,90	1,37	66	44	29	48	30	18		
		3	87	CL	2,65	1,55	0,80	61	29	17	30	22	8		
		4	73	CL-ML	2,65	1,65	0,69	62	10	6	26	19	7		
Cerro Nutibara, Medellín, Valle de Aburrá	Anfibolitas margen izquierda rio Medellín	5	52	ML	2,98	0,98	1,28	49	88	29	43	31	12		
		6	64	ML	2,84	1,24	1,28	55	100	47	45	30	15		
		7	75	ML	2,73	1,00	1,20	50	100	43	44	32	12		
Barbosa, Valle de Aburrá	Batolito Antioqueño	8	-	CL-ML	2,61	1,04	0,73	51	54	22	28	22	6		
Guarne, Valle de San Nicolás	Batolito Antioqueño	9	56	ML	2,80	1,10	1,62	52	76	30	58	33	25		
Rionegro, Valle de San Nicolás	Batolito Antioqueño	10	68	MH	2,79	1,54	1,48	61	56	31	53	45	8		

Fuente: Los autores

Tabla 4.
Índice de colapso y potencial de colapso para los suelos estudiados

Suelo	Índice de colapso. Jennings y Knight, 1975		Potencial de colapso a partir de correlaciones con propiedades índice									
			Denisov (1951)		Priklonski (1952)		Código de Obras de la URSS (1962)		Feda (1964)	Handy, (1973)		
1	5,5	Problemático	0,9	No concluyente	0,0	No concluyente	0,0	Suelo que presenta colapso	-5,4	No concluyente	86	Usualmente seguro contra el colapso
2	5,3	Problemático	0,7	Potencial alto	-0,1	Suelo con potencial alto	0,2	Suelo que presenta colapso	-11,3	No concluyente	80	Usualmente seguro contra el colapso
3	27,0	Muy grave	0,5	Potencial alto	-0,6	Suelo con potencial alto	0,3	Suelo que presenta colapso	-13,4	No concluyente	87	Usualmente seguro contra el colapso
4	9,0	Problemático	0,4	No concluyente	-1,9	Suelo con potencial alto	0,4	Suelo que presenta colapso	-11,4	No concluyente	73	Usualmente seguro contra el colapso
5	3,6	Moderado	1,3	No concluyente	-0,2	Suelo con potencial alto	-0,2	No concluyente	-18,7	No concluyente	52	Usualmente seguro contra el colapso
6	4,1	Moderado	1,0	Limoarcilloso que no presenta colapso	1,1	Suelo expansivo	0,0	Suelo que presenta colapso	-14,5	No concluyente	64	Usualmente seguro contra el colapso
7	3,8	Moderado	1,2	No concluyente	0,9	Suelo que no presenta colapso	-0,1	No concluyente	-19,6	No concluyente	75	Usualmente seguro contra el colapso
8	2,5	Moderado	0,7	Potencial alto	-0,1	Suelo con potencial alto	0,2	Suelo que presenta colapso	-15,6	No concluyente	-	-
9	2,9	Moderado	1,5	Suelo que no presenta colapso	-0,1	Suelo con potencial alto	-0,2	No concluyente	-8,5	No concluyente	55	Usualmente seguro contra el colapso
10	1,0	Ninguno	1,0	Limoarcilloso que no presenta colapso	-1,8	Suelo con potencial alto	0,0	Suelo que presenta colapso	-36,4	No concluyente	68	Usualmente seguro contra el colapso

Fuente: Los autores

El método de Priklonski como se puede ver en la Tabla 4, en la mayoría de los casos lleva a los suelos hacia una clasificación extrema de “muy colapsable”, lo cual no concuerda con los resultados del ensayo de doble edómetro. De igual forma el método de la URSS es radical, valorando un suelo como “colapsable” o “no colapsable”, llevando a clasificar en términos generales todos los suelos como colapsables, hecho que tampoco coincide con la valoración de índice de colapso propuesta por Jennings y Knight. En definitiva estos dos métodos muestran no ser los más adecuados para la determinación cualitativa del potencial de colapso en los suelos estudiados.

El método propuesto por Feda, no posibilitó concluir específicamente el potencial de colapso de los suelos, debido a que sólo caracteriza como suelo colapsable, aquellos suelos con valores de $K_I > 0.85$, y no permite hacer ninguna aseveración en caso contrario, haciéndolo un método bastante restringido.

Para definir cualitativamente el índice de colapso de los suelos analizados, el método propuesto por Denisov muestra los resultados más aproximados a los del ensayo de doble edómetro, aunque deben realizarse ajustes a los intervalos propuestos originalmente.

Es posible observar una asociación entre la categorización del índice de colapso según Jennings y

Knight, con los valores para el potencial de colapso por la metodología de Denisov: el suelo 3 categorizado como “muy grave” presenta un valor de 0,5; los suelos 1, 2 y 4 identificados como “problemáticos” muestran valores entre 0,4 y 0,7; los suelos 5, 6, 7 y 9 con un índice “moderado” registran valores entre 1,0 y 1,5; al suelo 10 con un índice de “ninguno” le corresponde un valor de 1,0; finalmente el suelo 8 clasificado como “moderado” se le asocia un valor de 0,7 el cual está por fuera del rango de los demás suelos con el mismo índice. Las anteriores relaciones permiten ajustar los intervalos y los criterios a los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5.
Rangos y criterios propuestos para la identificación del potencial de colapso en suelos ajustando el método de Denisov (1951)

Rangos originales		Rangos propuestos	
Intervalo	Potencial de colapso	Intervalo	Potencial de colapso
$K = 0,5 - 0,75$	Alto	$0,4 \leq K < 1,0$	Alto
$K = 1,0$	Limo arcilloso que no presenta colapso	$1,0 \leq K \leq 1,5$	Moderado
$K = 1,5 - 2,00$	Suelo que no presenta colapso	$1,5 < K < 2,00$	No presenta colapso

Fuente: Los autores

Tabla 6.
Índice de colapso y potencial de colapso con los criterios modificados

Geología	Suelo	Índice de colapso Jennings y Knight, 1975	Denisov Modificado
	1	5.5	Problemático
Anfibolitas margen izquierda río Medellín	2	5.3	Problemático
	3	27.0	Muy grave
	4	9.0	Problemático
Anfibolitas margen izquierda río Medellín	5	3.6	Moderado
	6	4.1	Moderado
	7	3.8	Moderado
Batolito Antioqueño	8	2.5	Moderado
Batolito Antioqueño	9	2.9	Moderado
Batolito Antioqueño	10	1.0	Ninguno

Fuente: Los autores

En la Tabla 6 se puede observar que con los intervalos sugeridos, se llega a una mayor concordancia entre la estimación cuantitativa y cualitativa: a los suelos 1 al 4 que presentan índices “muy grave” y “problemático”, se les otorga un potencial “alto”; a los suelos 5, 6, 7, 9 y 10 se les otorga un potencial “moderado”, coincidiendo con el criterio de Jennings y Knight, a excepción del suelo 10 cuyo índice es “ninguno”. Este último suelo presenta una relación de vacíos mayor a la de los suelos con un potencial moderado (suelos 5, 6, 7, 8 y 9), sin embargo se considera válido asociarle un potencial de colapso moderado, pues se trata de una primera aproximación y no de una definición final.

Cabe anotar que si bien los datos arrojados por el método cualitativo fueron bastantes próximos al método cuantitativo, no reemplazan la ejecución del ensayo de doble edómetro.

4. Conclusiones

Es importante entonces determinar el potencial de colapso para esos suelos residuales tropicales, para lo cual la literatura provee diversos métodos cualitativos, los cuales fueron evaluados en diez muestras de suelos de la región, y se compararon con los resultados obtenidos mediante el ensayo de doble edómetro, encontrando que los métodos de Priklnski (1952), Feda (1964), Handy (1973) y el Código de Obras de la URSS (1962) no son adecuados para estimar el potencial de colapso de los suelos de los Valles de Aburrá y San Nicolás; en contraste, y a pesar de haber sido formulado para suelos en otras latitudes, el método propuesto por Denisov (1951) ofrece una caracterización del potencial de colapso muy cercana al índice de colapso. Sin embargo, se propuso un ajuste a los intervalos y los criterios originales, logrando así resultados más coherentes entre el método y el ensayo de doble edómetro.

Se propone entonces usar el método de Denisov con los ajustes realizados, como una primera aproximación para determinar el potencial de colapso de los suelos residuales tropicales presentes en los valles de Aburrá y San Nicolás. No obstante se hace hincapié en que dicha aproximación no reemplaza la ejecución del ensayo duplo de doble edómetro.

Agradecimientos

A todos aquellos que de una u otra forma contribuyeron con los resultados de sus ensayos para el desarrollo de esta

investigación. A la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Referencias

- Jennings, J.-E. and Knight, K., A guide to construction on or with materials exhibiting additional settlement due to “collapse of grain structure”, Regional Conference for African on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Durban, 1975. pp. 99-105.
- Gutierrez, N., Influências de aspectos estruturais no colapso de solos do norte do Paraná Teses. Universidad de Sao Paulo, Brasil, 2005. [Online]. [date of reference, August 15th of 2014]. p. 143. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-28042006-095725/en.php>
- Das, B., Principles of foundation engineering, SI Edition [Online]. Cengage Learning, 2010 [date of reference September 25th of 2014]. Available at: <http://books.google.com/books?id=1eAEAAAQBAJ&pgis=1>
- ASTM D2435/D2435M - 11 Standard test methods for one-dimensional consolidation properties of soils using incremental loading. [Online]. [date of reference September 25th of 2014]. Available at: www.astm.org
- González, H., Geología del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000. Medellín, INGEOMINAS, 1999.
- ASTM D2216 - 10 Standard test methods for laboratory determination of water (Moisture) content of soil and rock by mass [Online]. [date of reference September 25th of 2014]. Available at: www.astm.org
- ASTM D854 - 14 Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer [Online]. [date of reference September 25th of 2014]. Available from: www.astm.org
- ASTM D4318 - 10e1 Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils [Online]. [date of reference September 25th of 2014]. Available from: www.astm.org
- ASTM D422 - 63(2007)e2 Standard test method for particle-size analysis of soils [Online]. [date of reference September 25th of 2014]. Available from: www.astm.org

Y. Valencia-González, graduada de Ing. Civil de la Universidad Nacional en el 2001, con MSc en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. En el 2009 recibió su título de Dra. en Geotecnia y posteriormente realizó un año de estudios posdoctorales en la Universidad de Brasilia en Brasil. Actualmente es profesora Asociada del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, Colombia. Sus líneas de investigación son: suelos tropicales, biotecnología, fundaciones y control de vibraciones.

O. Echeverri-Ramírez, graduado de Ing. Civil en el 1980, con MSc. en Ingeniería – Geotecnia en el 2005 de la Universidad Nacional de Colombia. Actualmente es profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Sus líneas de investigación son: geotecnia de ambientes tropicales, biotecnología, estabilidad de taludes.

J.A. Yepes-García, graduado de Ing. Civil de la Universidad Nacional, en el año 2012. Ha trabajado en consultoría en geotecnia desde 2011 y actualmente es estudiante de Maestría en Ingeniería Geotécnica de la Universidad Nacional de Colombia. Dentro de las líneas de investigación se incluye la dinámica de suelos y la geotecnia de rellenos sanitarios.