

Variaciones del coeficiente lateral en reposo K_0 en arcillas superficiales del occidente de la sabana de Bogotá

JORGE ARTURO PINEDA-JAIMES¹

DILAN EDUARDO ARIAS-MONTAÑEZ²

DIEGO ALEJANDRO GARCÍA-LÓPEZ³

JULIO ESTEBAN COLMENARES⁴

RESUMEN

Este documento presenta los resultados obtenidos del estudio de la influencia de la relación de sobreconsolidación y en el coeficiente de presión de tierras en reposo K_0 de un conjunto de arcillas afectadas por desecación. La investigación experimental se realizó a partir de pruebas edométricas sobre muestras extraídas en direcciones de planos horizontales y verticales, en las que la respectiva relación de esfuerzos efectivos de preconsolidación hallados se asocia directamente a un valor de K_0 . Estos valores se compararon con otros estimados a partir de los incrementos en succión matricial en el intervalo saturado, asumiendo que el material es isotrópico, elástico e incompresible en sus fases sólida y líquida. Se encontró que los valores de K_0 varían entre 1,21 y 0,27 en el perfil estudiado, con los mayores valores cerca de la superficie y una disminución apreciable de su magnitud con la profundidad. Lo anterior es congruente con la historia de esfuerzos reciente del subsuelo, relacionada con los procesos de equilibrio del contenido de agua que han tenido lugar en la zona.

Palabras clave: arcillas lacustres, coeficiente lateral de presión de tierras en reposo K_0 , desecación, esfuerzos de preconsolidación, succión matricial.

¹ Docente investigador, Maestría en Infraestructura Vial, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Docente asistente de cátedra, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: jpinedaj@unal.edu.co, jorgepineda@usantotomas.edu.co

² Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá. Ingeniero civil, Departamento de Geotecnia - Dicein SAS, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dilan.arias@usantotomas.edu.co

³ Ingeniero civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: diegogarcialopez@usantotomas.edu.co

⁴ Docente titular, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico: jecolmenaresm@unal.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 21 DE OCTUBRE DE 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 2 DE MARZO DE 2015

Cómo citar este artículo: Pineda-Jaimes, J.A., Arias-Montañez, D.E., García-López, D.A. y Colmenares, J.E. (2015). Variaciones del coeficiente lateral en reposo K_0 en arcillas superficiales del occidente de la sabana de Bogotá. *Epsilon*, (25), 177-201.

Variations of the Coefficient of Lateral Earth Pressure at Rest (K_0) in Surface Clays West of Sabana de Bogotá

ABSTRACT

This paper presents the results of the study of the influence of the overconsolidation ratio and in the coefficient of lateral earth pressure at rest (K_0) of a group of clays affected by desiccation. The experimental research conducted was based on oedometer tests on samples taken in horizontal and vertical plane directions, where the respective ratio of the effective preconsolidation pressure found is directly associated with a K_0 value. These values were compared to other estimated values, based on the matrix suction increases in the saturated interval, assuming that the material is isotropic, elastic and incompressible in its solid and liquid phases. It was found that the K_0 values range between 1.21 and 0.27 in the studied profile, with the higher values near the surface and a significant decrease in magnitude with depth. This is consistent with recent history of stress in the subsoil, related to the equilibrium water content processes that have taken place in the area.

Keywords: lacustrine clays, lateral earth pressure at rest K_0 , desiccation, preconsolidation pressure, matrix suction.

Variações do coeficiente lateral em repouso K_0 em argilas superficiais do ocidente da savana de Bogotá

RESUMO

Este documento apresenta os resultados obtidos do estudo da influência da relação de sobre consolidação e no coeficiente de pressão de terras em repouso K_0 de um conjunto de argilas afetadas por dessecação. A pesquisa experimental se realizou a partir de testes edométricos sobre amostras extraídas em direções de planos horizontais e verticais, onde a respectiva relação de esforços efetivos de pré-consolidação achados, se associa diretamente a um valor de K_0 . Estes valores se compararam com outros estimados a partir dos aumentos em sucção matricial no intervalo saturado, assumindo que o material é isotrópico, elástico e incompressível em suas fases sólida e líquida. Encontrou-se que os valores de K_0 variam entre 1,21 e 0,27 no perfil estudado, com os maiores valores cerca da superfície e uma diminuição apreciável de sua magnitude com a profundidade. O anterior é congruente com a história de esforços recente do subsolo, relacionada com os processos de equilíbrio do conteúdo de água realizado na zona.

Palavras chave: argilas lacustres, coeficiente lateral de pressão de terras em repouso K_0 , dessecação, esforços de pré-consolidação, sucção matricial.

Introducción

El subsuelo del noroccidente de la sabana de Bogotá, en la cordillera oriental de Colombia, está conformado por un depósito profundo que contiene secuencias de arcillas y limos de alta compresibilidad y consistencia blanda, formado en un ambiente lacustre, durante el plioceno, en los últimos cinco millones de años (Pérez, 2000). Los materiales localizados cerca de la superficie del terreno han estado sometidos a procesos de equilibrio de contenido de agua, en los cuales la tasa de evaporación es superior a la de infiltración, con lo cual se desarrolla un fenómeno denominado *deseccación*. El desarrollo de procesos de desecación y su influencia en suelos arcillosos superficiales de Bogotá y alrededores ha sido identificado por diversos autores (Vesga, Caicedo y Mesa, 2002; Pineda, 2003; Pineda, Colmenares, Martínez y Rodríguez, 2003; Suárez y Suárez, 2005; Pineda y Colmenares, 2007; Pineda, Rojas, Rivera y Rueda, 2013).

La desecación puede entenderse como el proceso mediante el cual una masa de suelo pierde progresivamente el agua libre presente en sus poros (*i. e.* pérdidas de contenido de agua), por factores naturales y antrópicos. En las arcillas lacustres del occidente de la sabana de Bogotá, diversos autores han mencionado como los principales factores detonantes de este fenómeno la evaporación inducida por el brillo solar, la presencia de plantas y árboles de gran avidéz de agua como el pino (*Pinus patula*, *Pinus radiata*, *Pinus taeda*), el eucalipto (*Eucaliptus mobulus*, *Eucaliptus viminalis*) y la acacia (*Acacia melanoxylon*), y la profundización del nivel freático a causa de la extracción continua de agua por bombeo desde acuíferos presentes en el occidente de la sabana de Bogotá. Implícitamente, el fenómeno de pérdida de agua origina en los suelos arcillosos presiones de agua de poros negativas, lo que permite incluso que se puedan generar condiciones de saturación parcial.

Al presentarse los cambios de contenido de agua durante la desecación, la tensión presente en la fase líquida del material controla la respuesta volumétrica de este. El estado de esfuerzos efectivos inducido por la desecación causa en los materiales contracciones volumétricas que llevan a la formación de grietas, las cuales se asocian con la aparición de esfuerzos de tensión (Ávila, 2004). Estos inducen pérdida de continuidad del medio, y afectan negativamente la estabilidad, durabilidad y funcionalidad de vías y otras estructuras livianas. En la figura 1 se presenta un ejemplo de daños asociados al comportamiento volumétrico de la subrasante arcillosa.



Figura 1. Deformaciones presentes en la vía Tenjo-Siberia asociadas al comportamiento volumétrico de la subrasante arcillosa

Fuente: Pineda et al. (2013).

En el contexto de esta problemática, atípica en la literatura especializada, persiste un desconocimiento acerca de las variables que controlan el estado de esfuerzos inicial de la masa de suelo, afectada por la desecación y eventualmente fisurada por sus efectos, entre ellas K_0 , que determina el tensor de esfuerzos geostático. K_0 es considerado usualmente un parámetro fundamental en la mecánica de suelos y su magnitud define la relación existente entre los esfuerzos horizontales y los verticales efectivos, bajo deformaciones laterales nulas sobre planos verticales (Brooker e Ireland, 1965). En la mecánica de suelos moderna, este coeficiente representa estados generales de esfuerzos —permite definir, por ejemplo, invariantes de esfuerzos normales promedio p' - q y s' - t — en un punto de una masa de suelo semiinfinita.

La correcta definición del estado de esfuerzos *in situ* es un paso fundamental para la simulación numérica de muchos problemas geotécnicos. Mientras que la determinación del esfuerzo efectivo vertical es una tarea relativamente sencilla, la determinación de los esfuerzos horizontales efectivos es una tarea compleja debido a que K_0 depende de la historia geológica y la historia de esfuerzos del depósito. En el caso específico de las arcillas lacustres fisuradas, objeto del presente artículo, la magnitud de K_0 es desconocida, de acuerdo con las condiciones particulares descritas anteriormente.

La determinación de K_0 ha sido objeto del desarrollo y la aplicación de diferentes ensayos de laboratorio, principalmente sobre muestras reconstituidas, a partir de los cuales se han propuesto correlaciones (Liyuan, Lian, Guojun y Guangyin, 2013),

se han medido esfuerzos laterales en cámaras modificadas (Teerachaikulpanich, Satochi, Kazuaki y Hideki, 2007) y se han realizado deducciones analíticas de su magnitud a partir de modelos constitutivos elastoplásticos (Nieto, 2007; Federico, Elia y Germano, 2009). En depósitos de suelos naturales, la determinación del coeficiente se ha llevado a cabo implementando ensayos esfuerzo-deformación *in situ* (Hirochika et al., 2012) y la implementación de celdas de carga en excavaciones (Taeseo y Mayne, 2013). A pesar del acervo de información existente en la literatura especializada, todos los trabajos se han relacionado con muestras o materiales que forman parte de un medio continuo, sin que se tengan presentes discontinuidades como las mencionadas.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos de la estimación de K_0 para un conjunto de arcillas sobreconsolidadas por desecación. La estimación se realizó a partir de pruebas edométricas realizadas sobre planos horizontales y verticales (asumidos como planos principales en la masa de suelo), en los que la respectiva relación de esfuerzos efectivos de preconsolidación hallados se asocia directamente con un valor de K_0 . Estos valores se compararon con otros estimados a partir de las mediciones de succión matricial en el intervalo de succiones en que el suelo aún está saturado, puesto que se considera que el material es isotrópico, elástico e incompresible en sus fases constitutivas. Se encontró que los valores de K_0 varían entre 1,21 y 0,27, lo cual explica la persistencia de las grietas semiverticales registradas por autores como Vesga et al. (2002), Ávila (2004) y Pineda y Colmenares (2007), quienes postulan que la pérdida de continuidad del medio arcilloso se presenta cuando la succión matricial se desarrolla en el subsuelo por uno o varios de los factores antes mencionados, lo que causa la reducción del esfuerzo horizontal con valores de K_0 inferiores a 1.

Materiales estudiados

Para la estimación de K_0 se utilizó material extraído de la vía Tenjo-Siberia, en Cundinamarca, luego de la ejecución de un sondeo de 20 m de profundidad realizado en un sitio en el que se destaca la presencia de cercas vivas conformadas por pinos y eucaliptos. En este sector, la estructura de pavimento se encuentra deteriorada visiblemente por las deformaciones volumétricas de la subrasante arcillosa, asociadas a la desecación producida por los sistemas radiculares de las especies vegetales. El sondeo se realizó con un equipo mecánico, que involucra el uso de muestreadores

de pared delgada tipo *österberg* de cuatro pulgadas de diámetro para la extracción de muestras inalteradas. En la figura 2 se presenta la relación de las muestras obtenidas y la nomenclatura que será empleada en este artículo. Como se puede observar en la figura 1, el sitio de muestreo coincide con la localización de arcillas de la formación Bogotá, grupo Subachoque, la cual corresponde a arcillas y limos con intercalaciones de turbas y lentes de arena de hasta 2,0 m de espesor, depositados en un ambiente lacustre durante el período cuaternario. Este trabajo se relacionó directamente con el comportamiento de los materiales superficiales de esta formación.



N 4°46' 51,43" – O 74°09' 30,20"

Figura 2. Mapa geológico del occidente de la sabana de Bogotá y localización del sitio de muestreo

Fuente: Rueda (2012).

Sobre las muestras extraídas en la campaña de exploración, las cuales se presentan en la figura 3e, se realizaron ensayos convencionales de caracterización geotécnica, dentro los cuales se incluyeron la determinación del contenido gravimétrico de agua (norma ASTM D 2216-10), los límites de consistencia líquido (norma ASTM D 4318-10e1), plástico (norma ASTM D 4318-10e1) y de contracción (norma

INV-E 127-13) y la determinación de pesos unitarios totales y sumergidos (norma ASTM D 4914-08). Se realizaron consolidaciones edométricas EOP (*End of Primary Consolidation*, norma ASTM 2435M-11) con el fin de establecer el esfuerzo efectivo máximo de preconsolidación y obtener una aproximación a la historia de esfuerzos causada por la desecación, así como para determinar la compresibilidad de los materiales. El esfuerzo de preconsolidación fue hallado empleando el método de Becker (1987), en el cual se usa como variable el trabajo inducido en cada uno de los incrementos de carga del ensayo edométrico. Mediante el método del papel de filtro en contacto con la muestra (norma ASTM D 5298-10), se determinó la succión matricial presente en los materiales arcillosos y su variación con la profundidad, para el contenido de humedad medido al momento de la realización de la exploración de campo.

En la figura 3 se presenta el perfil estratigráfico del sondeo realizado, las variaciones del contenido gravimétrico de agua con la profundidad al momento de la realización de los trabajos de campo (noviembre de 2013, época lluviosa en la zona), la variación de los límites de consistencia, el índice de liquidez y la relación de vacíos *in situ* con la profundidad. Se observa que los menores valores del contenido de agua oscilan entre 80 y 100 %, para profundidades entre 2,0 y 6,0 m, aumentando con la profundidad a valores cercanos a 140 %, hasta el final del sondeo. El límite plástico oscila entre el 60 y el 80 %, mientras que el límite de contracción varía entre el 18 y el 32 %, para todo el perfil.

Los valores del índice de liquidez son positivos para todas las profundidades, con valores que oscilan entre 0,30 y 0,80; sin embargo, las menores magnitudes de este índice se localizan entre la superficie del terreno y 6,0 m, lo cual indica que los materiales afectados por la desecación se encuentran en ése intervalo. Lo anterior es congruente con las menores relaciones de vacíos identificadas en el perfil, las cuales oscilan entre 1,0 y 2,0. Las mayores relaciones de vacíos identificadas en el subsuelo se localizan para profundidades mayores a 6 m, con valores variables entre 2,0 y 4,5, lo que hace que se conserve la tendencia del índice de liquidez.

La figura 4 presenta la carta de plasticidad de Casagrande (1936), extendida para los materiales identificados en este trabajo y la carta de actividad de los minerales arcillosos propuesta por Skempton (1953). Los materiales se localizan en inmediaciones de la línea A de la carta de plasticidad (figura 3a), que corresponde a minerales arcillosos característicos de la familia de las *Smectitas*. La actividad de

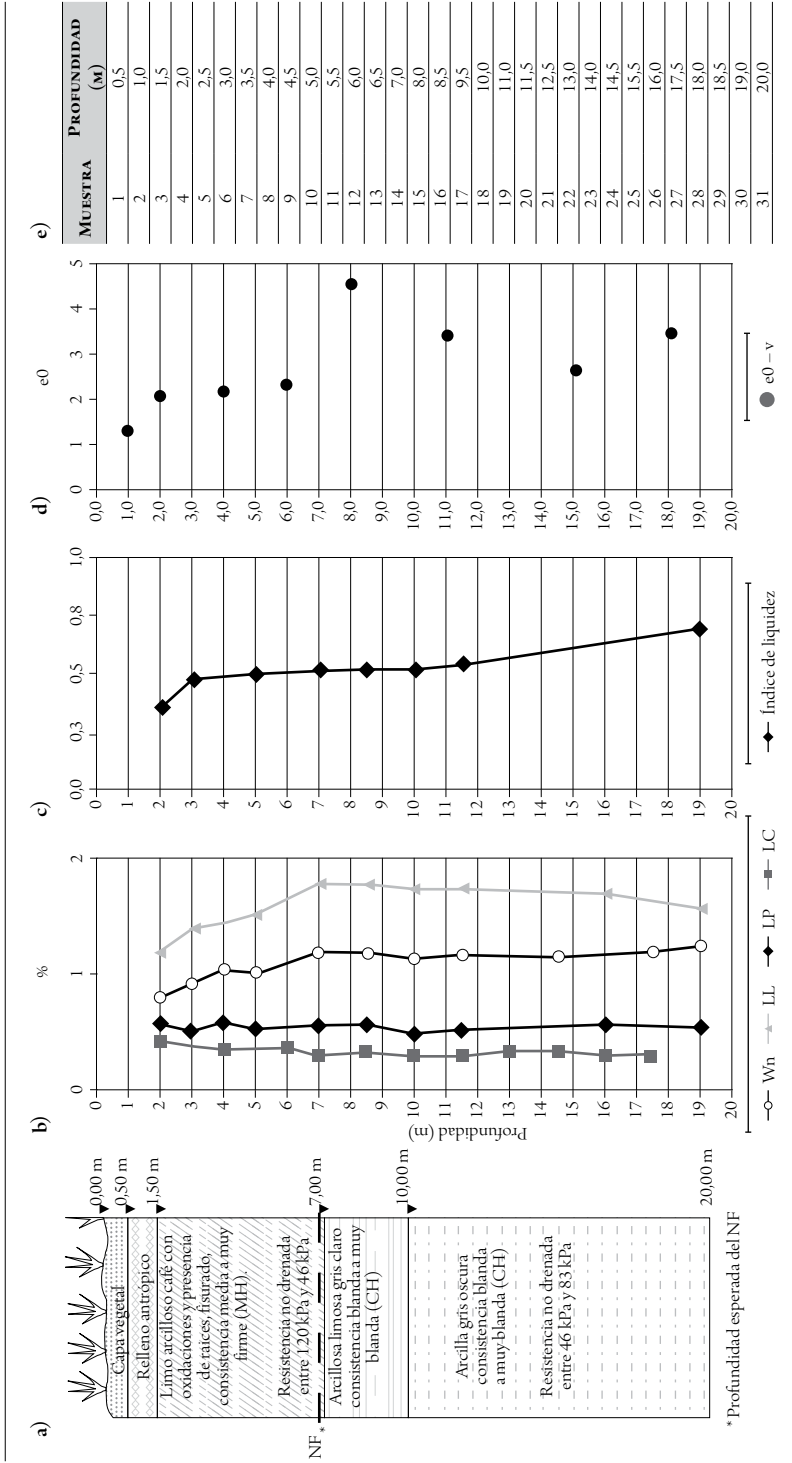


Figura 3. Perfil estratigráfico y variación de las propiedades índice con la profundidad: a) estratigrafía, b) límites de consistencia y humedad gravimétrica, c) índice de liquidez, d) relación de vacíos y e) relación de muestras inalteradas

Fuente: elaboración propia.

los materiales parece ser independiente de la profundidad; las arcillas se clasifican como expansivas según los criterios de Skempton (1954). Dado que las arcillas se localizan sobre el nivel freático, en este caso localizado a 7 m bajo la superficie del terreno, al momento de la realización de la exploración geotécnica, las características expansivas acentúan los cambios volumétricos estacionales asociados al desarrollo de las condiciones de equilibrio de contenido de agua que puedan presentarse en períodos secos y lluviosos de la zona.

En la figura 5 se presentan las variables que determinan el estado de esfuerzos del subsuelo en el sitio de exploración. Las arcillas hasta 6 m de profundidad aparecen como fuertemente sobreconsolidadas, con relaciones de sobreconsolidación (RSC), variables entre 2 y 6 (con los mayores valores de RSC en la superficie), y se perciben ligeramente sobreconsolidadas entre 6 y 8 m, con valores de la RSC variables entre 1 y 2. A partir de 8 m de profundidad, las arcillas son normalmente consolidadas de consistencia blanda y muy blanda, características típicas asociadas a la deposición reciente de sedimentos en ambientes lacustres.

La figura 5c muestra la variación de la succión matricial con la profundidad, establecida mediante la técnica de papel de filtro, en la que puede evidenciarse que los mayores valores de succión se localizan hasta 6 m de profundidad, con valores iniciales variables entre 200 y 400 kPa, con las magnitudes más elevadas en cercanía de la superficie del terreno, de manera congruente con la variación de los esfuerzos de preconsolidación efectivos y la RSC presentes en el perfil (figuras 5a y 5b). Todos los materiales se encuentran saturados en el perfil identificado, y dada la variación de la RSC, los más afectados por la desecación se localizan cerca de la superficie del terreno.

Coefficiente K_0

La evaluación de K_0 fue desarrollada a partir de dos metodologías empleadas en otros ambientes sedimentarios cuya aplicabilidad es especialmente importante para las condiciones mencionadas en este artículo: materiales localizados por encima del nivel de agua libre, con presiones negativas del agua de poros y fuertemente sobreconsolidados (Arias, 2015).

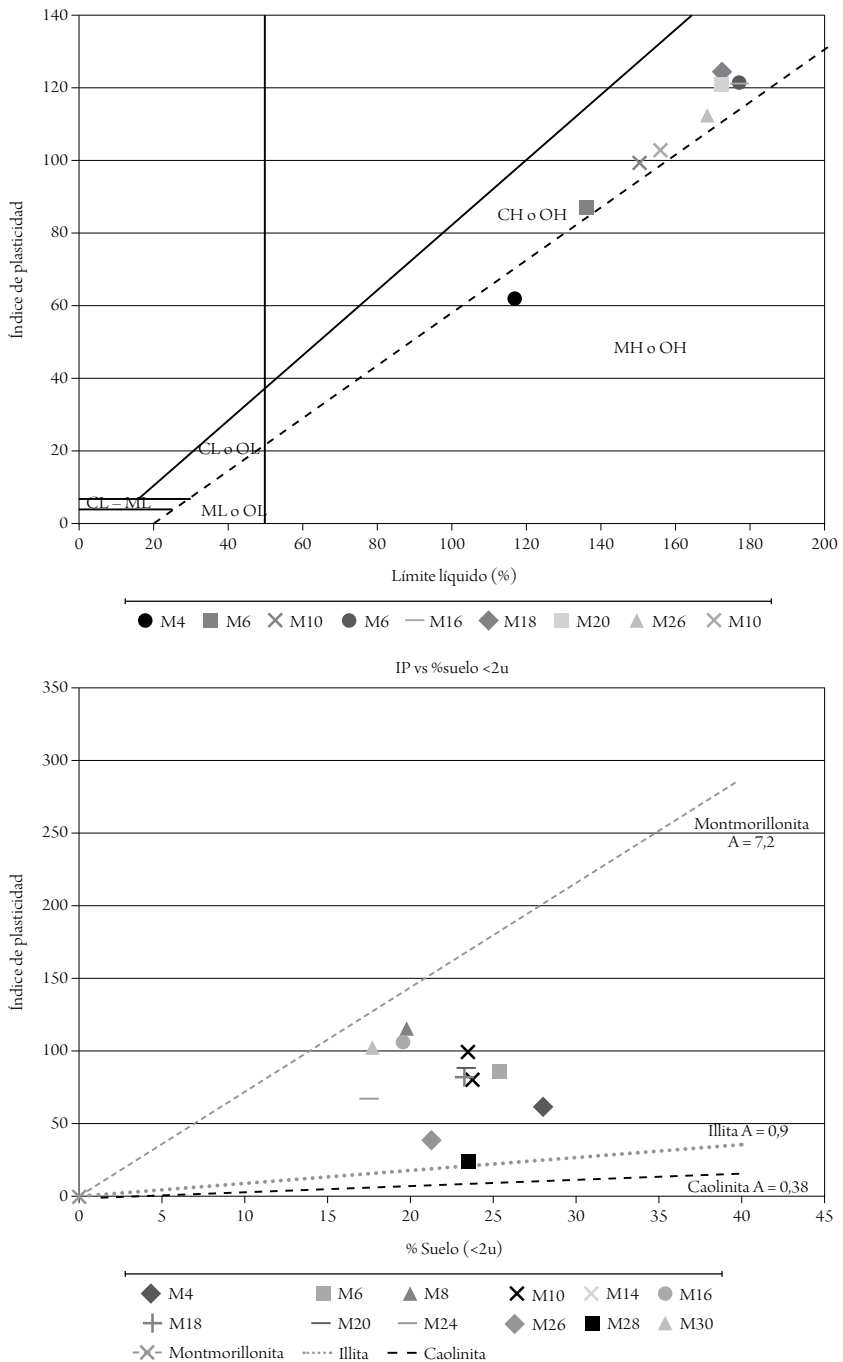


Figura 4. Diagramas de clasificación de los materiales identificados: a) carta de plasticidad para las diferentes muestras extraídas y b) carta de actividad de la fracción arcillosa
Fuente: elaboración propia.

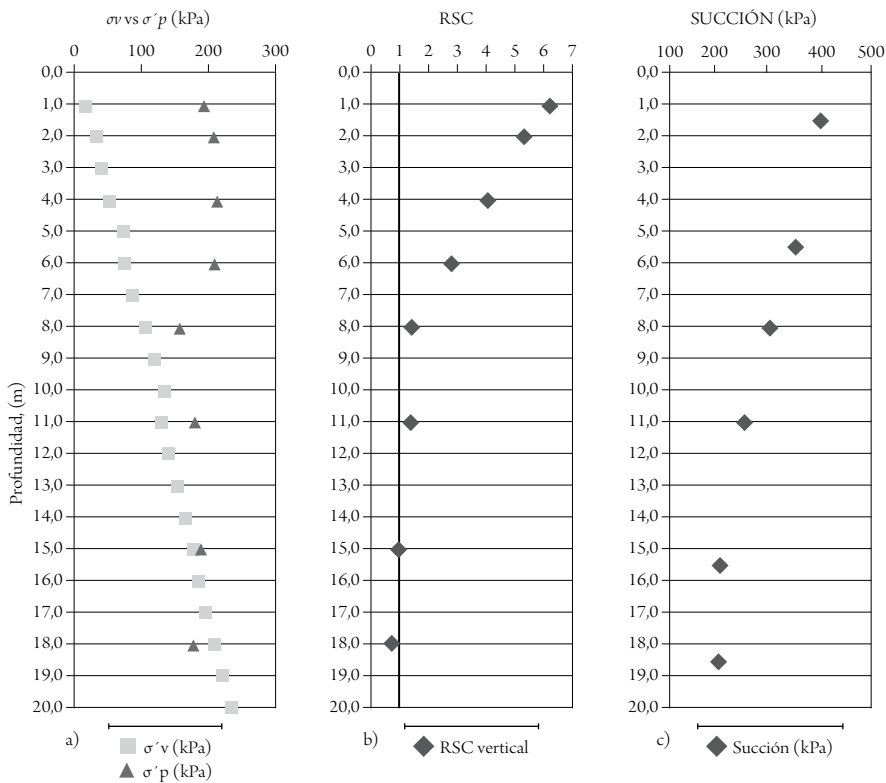


Figura 5. Variables que determinan el estado de esfuerzos del subsuelo en el sitio de estudio con la profundidad: a) variación del esfuerzo vertical y el esfuerzo efectivo de preconsolidación medido sobre planos horizontales b) variación de la relación de sobreconsolidación y c) variación de la succión matricial

Fuente: Cabana y García (2015).

El primer método consiste en la determinación de los esfuerzos efectivos de preconsolidación sobre muestras cuidadosamente talladas en direcciones paralelas y perpendiculares al sentido de la profundidad del sondeo realizado, con lo cual se considera que los planos horizontales y verticales de las muestras corresponden a los mismos planos principales de la masa de suelo en una condición geostática (en el apartado anterior se han mostrado los esfuerzos de preconsolidación asociados a la dirección perpendicular, es decir, estimados sobre muestras extraídas sobre planos horizontales). Se decidió tallar una muestra por punto en las dos direcciones perpendiculares entre sí para llevar a cabo la determinación de los esfuerzos efectivos de preconsolidación, con lo que se conservan las propiedades propias y características del material. Este método, propuesto por Tavenas (1975),

ha sido empleado en Colombia anteriormente por Suárez y Suárez (2005), entre otros autores. La ecuación 1 presenta la definición de K_0 para este método, donde s'_{ph} corresponde al esfuerzo de preconsolidación de una muestra paralela al plano vertical y s'_{pv} corresponde al esfuerzo de preconsolidación de una muestra paralela a un plano horizontal (figura 6).

$$K_0 = \frac{\sigma'_{ph}}{\sigma'_{pv}} \nu \quad (1)$$

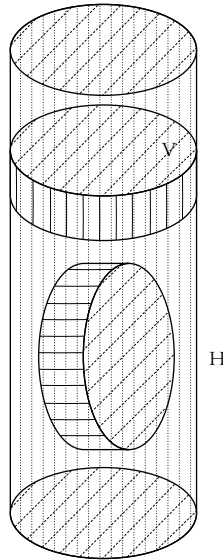


Figura 6. Obtención de muestras cilíndricas sobre planos horizontales y verticales a partir de muestras cilíndricas

Fuente: Arias (2015).

En la figura 7 se presentan las curvas de compresibilidad EOP y la determinación de los esfuerzos de preconsolidación sobre muestras horizontales y verticales, para 1,5 m y 18,5 m de profundidad, que corresponden a la muestra más superficial y la muestra más profunda, respectivamente, y en la figura 8 se presentan las curvas de compresibilidad para las demás profundidades estudiadas.

El segundo método considera la determinación de K_0 a partir del estado de esfuerzos presente en el subsuelo antes de la realización de un “muestreo ideal”, situación

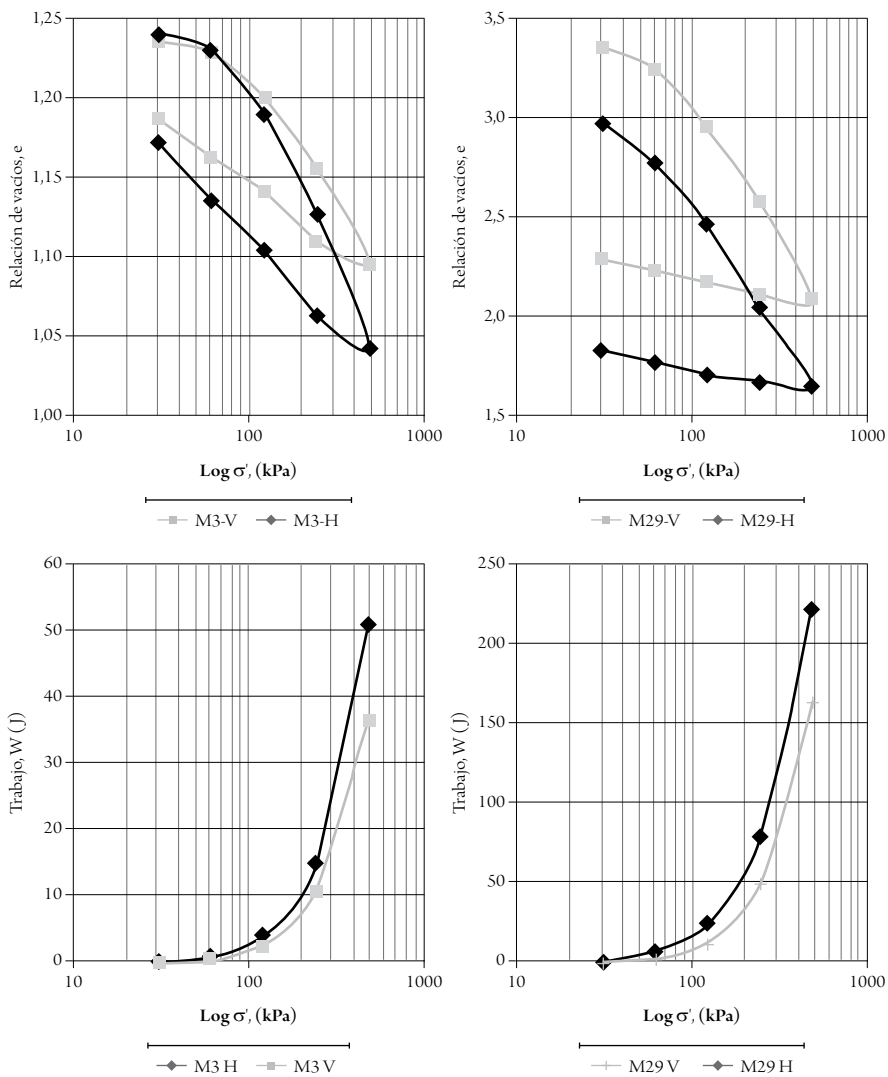
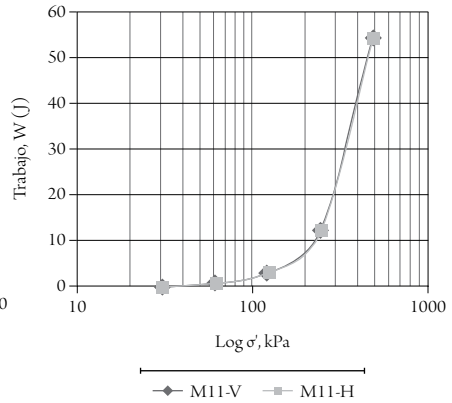
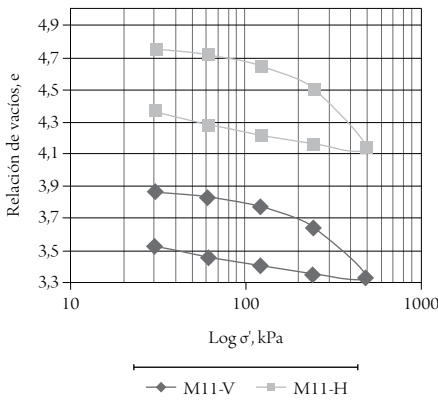
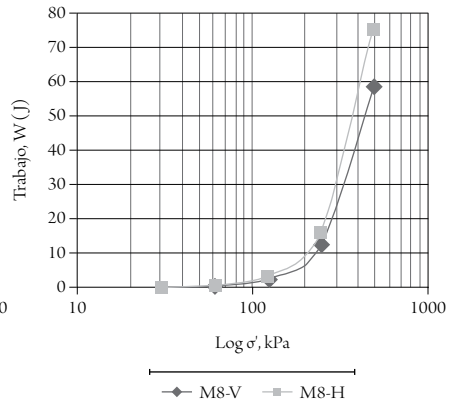
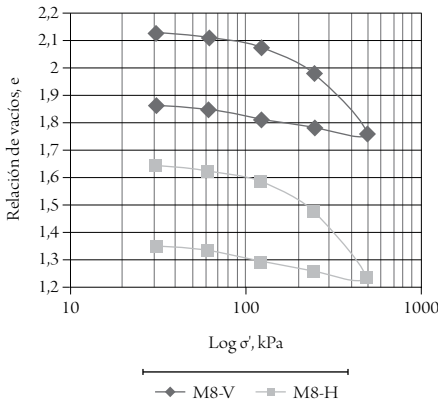
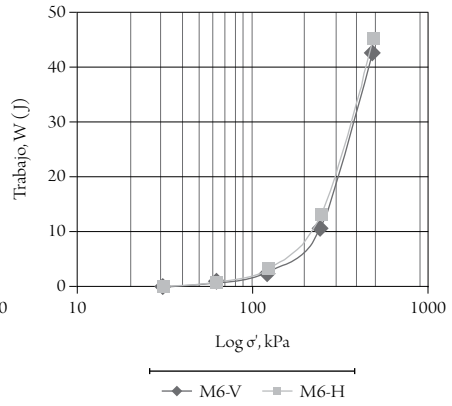
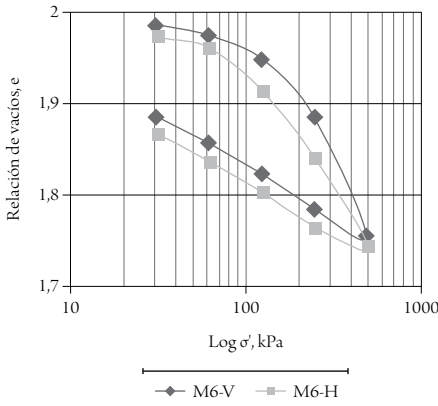


Figura 7. Curvas de compresibilidad EOP y curvas de trabajo para la determinación de los esfuerzos efectivos de preconsolidación: a) curvas para las muestras horizontales y verticales M3, b) curvas para las muestras horizontales y verticales M29

Fuente: Arias (2015).

en la cual la perturbación causada por la extracción de la muestra y la posterior relajación de esta se relaciona directamente con la succión matricial desarrollada por el desconfinamiento y los parámetros de presión de poros A y B definidos por Skempton (1954). En este método se considera que tanto el agua presente en



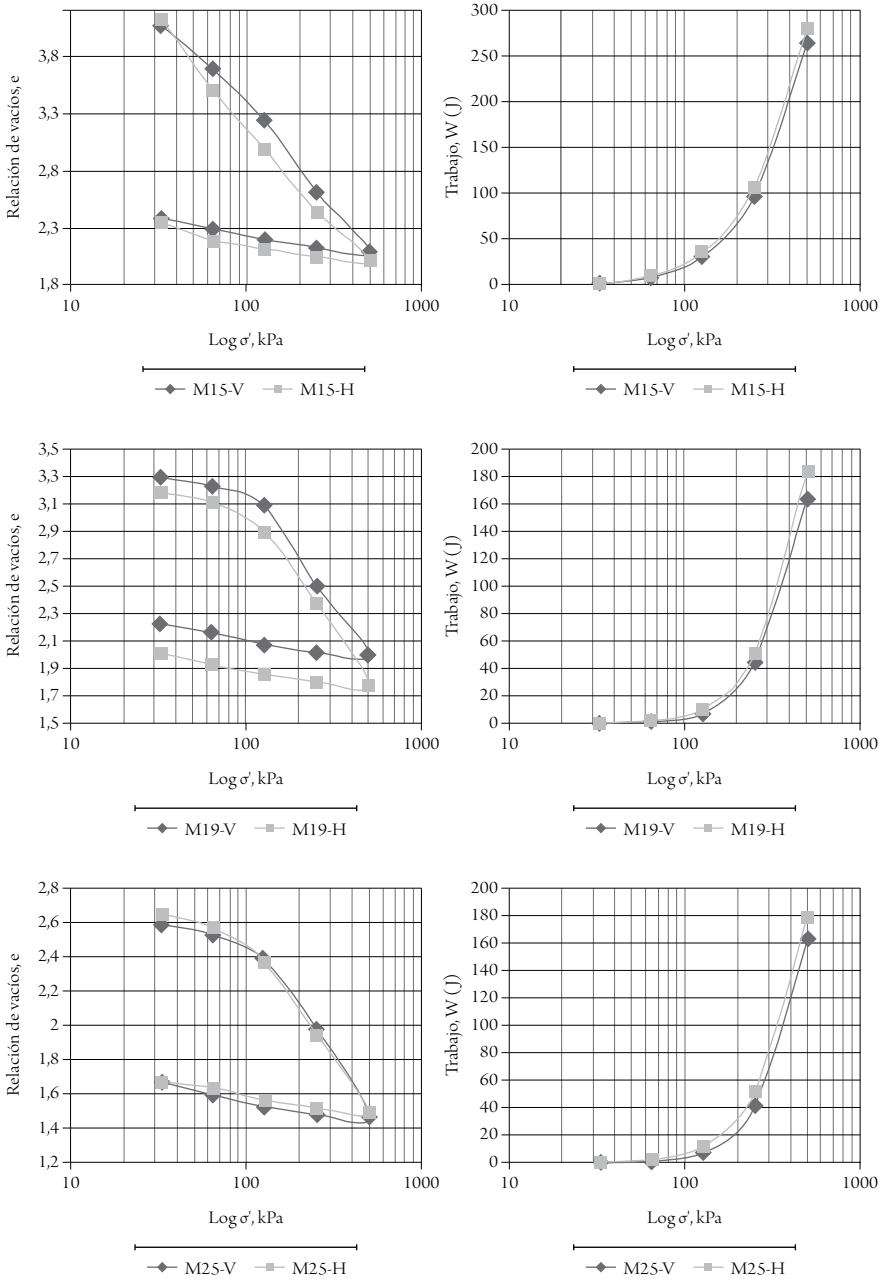


Figura 8. Curvas de compresibilidad EOP y curvas de trabajo para la determinación de los esfuerzos efectivos de preconsolidación para la demás muestras: curva de compresibilidad (der.) y curvas de trabajo (izq.)

Fuente: Arias (2015).

los materiales arcillosos como su esqueleto mineral son incompresibles y no se tienen en cuenta los cambios volumétricos de contracción o expansión causados por cambios en el contenido de agua y la succión matricial luego de la extracción de la muestra.

El incremento no drenado de la presión de poros, derivado del muestreo ideal puede expresarse mediante la ecuación 2, donde $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$ y $\Delta\sigma_3$ corresponden a los cambios de los esfuerzos totales principales causados por el muestreo ideal, y B corresponde al parámetro de presión de poros de Skempton para carga isotrópica, que en suelos saturados toma el valor límite de 1,0. Sin embargo, dado que el estado de esfuerzos en el depósito antes del muestreo ideal no es isotrópico, el incremento no drenado puede expresarse en función de los esfuerzos principales mayor y menor (considerando una condición plana de deformaciones en la cual $\Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$) y del parámetro de presión de poros (A) (ecuación 3). El valor del parámetro (A) depende de la condición de cambio del estado de esfuerzos. En la investigación desarrollada se analizaron procesos de extensión y compresión axial asociados hipotéticamente a procesos de humedecimiento-secado con restricción lateral de deformaciones (figura 9), en los cuales los valores de A son iguales a 2/3 y 1/3, respectivamente, para un material idealmente elástico.

$$u = B * \left[\frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right] \quad (2)$$

$$\Delta u = B * [\Delta\sigma_3 + A + (\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)] \quad (3)$$

A partir de las ecuaciones 2 y 3 es posible encontrar expresiones que permiten la estimación de K_v . Suponiendo que la mayor variación de esfuerzos en el suelo estudiado en este artículo está dada por las variaciones del esfuerzo vertical causadas por los procesos de humedecimiento/secado, se han analizado casos de extensión axial y compresión axial, asociados a expansiones y contracciones para cambios nulos de los esfuerzos verticales. Las ecuaciones 4 (caso de extensión axial) y 5 (caso de compresión axial) presentan la estimación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo para los dos escenarios. En este trabajo, la succión matricial empleada corresponde a la reportada en la figura 5c y el parámetro de presión de poros (A) se tomó como 2/3 para descarga axial y 1/3 para carga axial, teniendo

en cuenta el material elástico, homogéneo e isotrópico. Dado que las condiciones asumidas para los materiales son ideales, el valor de K_0 estimado por medio de las ecuaciones 4 y 5 es idéntico. El desarrollo matemático de estas ecuaciones se presenta en Suárez y Suárez (2005) y Vaca y Martínez (2005).

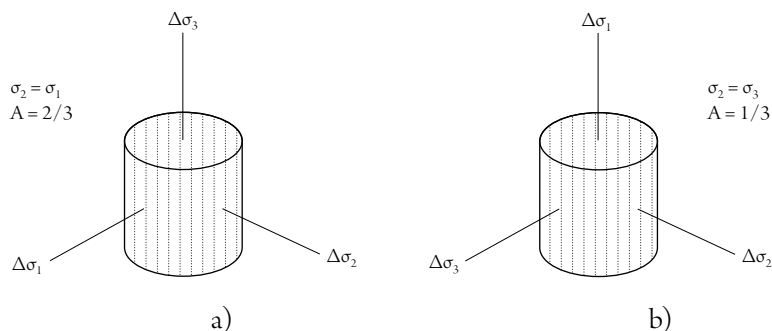


Figura 9. Estados de esfuerzos que definen el valor del parámetro A: a) proceso de extensión y b) procesos de compresión

Fuente: Pineda et al. (2003).

$$K_0 = \frac{\left(\frac{U_a - U_w}{\sigma'_v} \right) + A - 1}{A} \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{\left(\frac{U_a - U_w}{\sigma'_v} \right) - A}{1 - A} \quad (5)$$

Adicionalmente, y con el objetivo de hacer un análisis de sensibilidad acerca de la influencia del parámetro (A) en la magnitud de K_0 , se determinó el parámetro de presión de poros (A) a partir de los resultados de esfuerzo *vs.* deformación y presión de poros *vs.* deformación (mostrados en la figura 10), obtenidos de un ensayo triaxial CIU realizado a la muestra número 9, extraída a 4,50 m de profundidad, en el intervalo sobreconsolidado del perfil de suelo analizado. Se obtuvieron valores del parámetro (A) mínimos de 0,17 y máximos de 0,29 en función de las presiones de confinamiento efectivas σ'_1 , σ'_2 y σ'_3 implementadas en el ensayo (20 kPa, 50 kPa y 150 kPa, respectivamente). A partir de estos valores se determina K_0 .

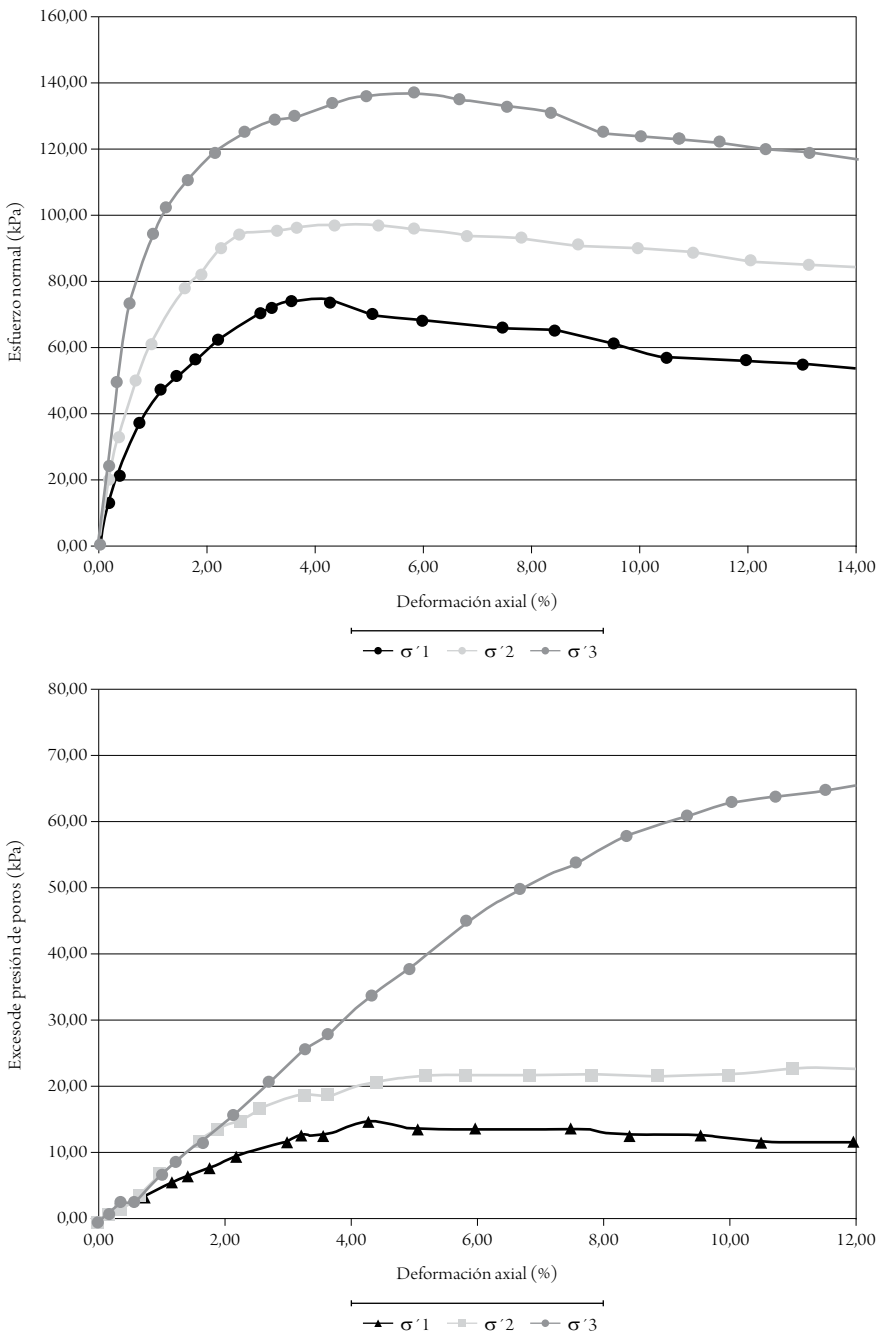


Figura 10. Esfuerzo normal vs. deformación y exceso de presión de poros vs. deformación para las presiones de confinamiento efectivas σ'_1 (20 kPa), σ'_2 (50 kPa) y σ'_3 (150 kPa)

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 1 se presentan los valores de K_o deducidos a partir de las dos metodologías presentadas y los resultados del análisis de sensibilidad. A su vez, en la figura 11 se presenta la variación de K_o con la profundidad.

Tabla 1. Valores de K_o a partir de esfuerzos de preconsolidación edométricos y medición de succión matricial

MUESTRA	σ'_{pv} (kPa)	σ'_{pu} (kPa)	(K_o)	SUCCIÓN (kPa)	(K_o) (A) TEÓRICO	(K_o) (A) MÍNIMO	(K_o) (A) MÁXIMO
M-3	191,30	181,49	0,95	400	1,21	1,17	1,20
M-6	206,01	186,39	0,90	-	-	-	-
M-8	210,92	201,11	0,95	-	-	-	-
M-11	206,01	213,86	1,04	350	0,95	0,96	0,95
M-15	155,00	152,06	0,98	300	0,70	0,76	0,72
M-19	175,60	169,71	0,97	250	0,54	0,63	0,57
M-25	186,39	185,40	0,99	200	0,31	0,45	0,36
M-29	175,60	156,96	0,89	200	0,27	0,42	0,32

Fuente: elaboración propia.

Análisis de resultados

Los valores de K_o determinados a partir de la relación de esfuerzos de preconsolidación son en general cercanos a 1,0, entre la superficie del terreno y 6,0 m de profundidad (valores entre 0,95 y 1,04). Al parecer, la influencia de la presión negativa de agua causada por la desecación se ha manifestado en la configuración de los máximos esfuerzos efectivos soportados por el esqueleto mineral del material sobre planos verticales y horizontales, lo que origina valores de los esfuerzos de preconsolidación similares en las direcciones perpendiculares entre sí.

En el mismo intervalo de profundidades, el valor de K_o hallado a partir de la medición de la succión matricial y el parámetro de presión de poros (A) teórico presentan valores variables entre 0,95 y 1,21. Así mismo, el valor de K_o hallado a través del parámetro de presión de poros (A) mínimo presenta valores variables entre 0,96 y 1,17. Por último, el valor de K_o hallado a través del parámetro de presión de poros (A) máximo presenta valores variables entre 0,95 y 1,20. De lo anterior se infiere que los valores de K_o hallados en función de la succión matricial y los valores tanto

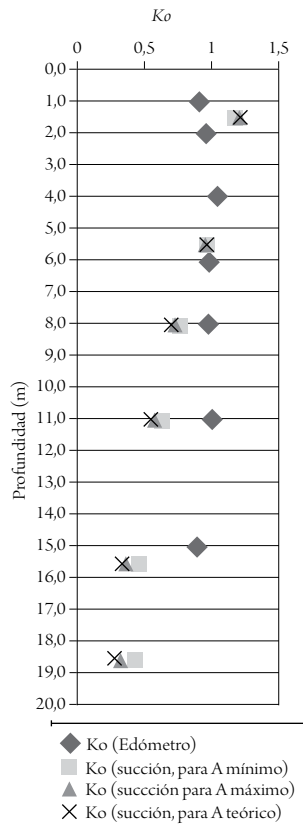


Figura 11. Valores estimados de K_o para el perfil estudiado

Fuente: elaboración propia.

teóricos como experimentales del parámetro de presión de poros (A) presentan magnitudes similares a las determinadas a partir del primer enfoque. Lo anterior sugiere que la microestructura de los materiales afectados por la pérdida de agua presenta rasgos de isotropía, a pesar de las eventuales condiciones de fisuración que puedan presentarse de acuerdo con las evidencias físicas de daños en las obras de infraestructura de la zona.

Para profundidades mayores a 6,0 m, los materiales arcillosos aparecen como ligeramente sobreconsolidados a normalmente consolidados, con valores del índice de liquidez positivos y variables entre 0,5 y 0,8, lo que indica que el contenido de agua se acerca a los valores del límite líquido y la consistencia cualitativa del material es blanda a muy blanda. Este aspecto es determinante en la revisión de los

valores de K_o hallados a partir de las curvas de compresibilidad, toda vez que su magnitud varía entre 0,89 y 0,98 (el límite inferior se localiza en las muestras más profundas), lo cual sugiere que la microestructura del material es isotrópica cerca al nivel freático y anisotrópica en profundidad, de acuerdo con la historia geológica esperada de los materiales.

Por el segundo método, los valores de K_o oscilan entre 0,27 y 0,70 (el límite inferior se localiza en la muestra más profunda). Los valores del coeficiente determinados por el segundo método sugieren que los esfuerzos principales menores se presentan en la dirección horizontal dentro del depósito. La tendencia es similar a la definida por los esfuerzos de preconsolidación, no obstante la diferencia de las magnitudes del coeficiente. Dado que los materiales arcillosos, en el perfil estudiado, se han identificado como fuertemente sobreconsolidados cerca de la superficie del terreno y normalmente consolidados en profundidad, es posible que los valores reales *in situ* del parámetro (A) sean diferentes a los empleados en este trabajo para una condición perfectamente elástica y continua del material, con magnitudes de K_o un poco diferentes a las presentadas.

Autores como Nahlawi (2004) y Ávila (2004) mencionan que la formación de grietas en arcillas causadas por el desarrollo de succión matricial se inicia para grados de saturación cercanos al 100 % y para valores de succión cercanos al valor de entrada de aire de los materiales, con contenidos de agua presumiblemente cercanos al límite plástico o al de contracción. En el caso del perfil estudiado, de acuerdo con los resultados de la figura 3, los valores más bajos del índice de liquidez localizados entre 2,0 y 3,0 m bajo la superficie del terreno sugieren que en este intervalo de profundidades se presentan presumiblemente las condiciones ideales para la existencia de grietas. No obstante lo anterior, dado que los materiales se encuentran sobreconsolidados hasta 6,0 m, es muy posible que en otras épocas del año, especialmente en periodos de verano, se desarrollen las condiciones para el agrietamiento del subsuelo hasta esta profundidad, en cercanías del nivel freático. Los valores presentados aquí, por los dos métodos, se encuentran dentro de los intervalos de valores de K_o hallados por Pineda et al. (2003) para arcillas superficiales de la Ciudad Universitaria y a los determinados por Suárez y Suárez (2005), para arcillas lacustres superficiales del sector de la calle 170, al norte de Bogotá. En estos dos últimos casos, los materiales arcillosos han sido afectados por procesos de secado-humedecimiento, en menor medida que los citados en este artículo. Los valores de K_o cerca de la superficie hallados en este trabajo no explican la forma-

ción de grietas semiverticales presentes en el subsuelo mencionado en la literatura especializada, acerca de la zona en cuestión, a pesar de que en este trabajo la condición de fisuramiento no fue identificada explícitamente en las muestras extraídas.

Conclusiones

Se aplicaron dos metodologías para la obtención de K_o para materiales arcillosos del subsuelo del occidente de la sabana de Bogotá, las cuales son complementarias y ofrecieron valores probables de este parámetro. Los esfuerzos de preconsolidación hallados permiten asumir que las arcillas estudiadas se encuentran sobreconsolidadas por desecación en la parte superficial del perfil estudiado. Luego de los 6,0 m de profundidad en el sondeo realizado, el suelo arcilloso puede considerarse ligeramente sobreconsolidado y normalmente consolidado.

Se encontraron valores de K_o variables entre 0,89 y 1,04 por medio de los esfuerzos de preconsolidación, y valores entre 0,27 y 1,21 por medio de la medición de la succión matricial. De acuerdo con la variación del índice de liquidez, la relación de vacíos *in situ* y la relación de sobreconsolidación, los valores de K_o en el material afectado por desecación son congruentes por las dos metodologías empleadas, pero se muestran diferentes para los materiales normalmente consolidados.

A pesar de que los resultados presentados en este trabajo constituyen una primera aproximación al valor de K_o , es necesario reconfirmar las tendencias de la variación de este parámetro con la profundidad en otros sitios dentro de la zona geográfica, en sitios cercanos al del sondeo realizado y haciendo las mediciones en otras épocas del año, empleando ensayos *in-situ* avanzados, especialmente para tener en cuenta el efecto real de la fisuración y el agrietamiento en la representatividad de los resultados y en el estado de esfuerzos de los materiales de la zona.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás y al programa de Maestría en Infraestructura Vial, por el financiamiento de las actividades conducentes a los resultados presentados en este trabajo; y al grupo

de investigación en Suelos Residuales y Parcialmente Saturados de la Universidad Nacional de Colombia, por la colaboración con la revisión conceptual de los resultados y la asesoría prestada durante la realización de los ensayos, especialmente en lo relacionado con la medición de la succión matricial y la presentación de los resultados en este trabajo.

Referencias

- Ávila, G. (2004). *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá* (tesis de doctorado). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Arias, D.E. (2015). *Determinación del coeficiente lateral de presión de tierras en reposo "K_o", para una arcilla superficial del occidente de la sabana de Bogotá D.C.* (tesis de grado). Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Brooker, E. W. e Ireland, H. O. (1965). Earth pressure at rest related to stress history. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(1), 1-15.
- Casagrande, A. (1936). *The determination of the pre-consolidation load and its practical significance*. Documento procedente del 1st International Conference on soil Mechanics, vol. 3, Harvard.
- Cabana, M.D. y García, D.A. (2015). *Propiedades de retención de humedad de arcillas sobreconsolidadas por desecación del occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de grado). Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Federico, A., Elia, G. y Germano, V. (2008). A short note on the earth pressure and mobilized angle of internal friction in one-dimensional compression of soil. *Journal of GeoEngineering*, 3(1), 41-46.
- Hirochika, H., Nobutaka, Y., Toshiyuki, M., Hiroyuki, T. y Satoshi, N. (2012). Coefficient of earth pressure at rest for normally and overconsolidated peat ground in Hokkaido area. *Soil and Foundation*, 52(2), 299-311.
- Liyuan, T., Lian, L., Guojun, C. y Guangyin, D. (2013). *Assesing the coefficient of earth pressure at rest from shear wave velocity and electrical resistivity measurements*. Nanjing, China: Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University.
- Nahlawi, H. (2004). *Behaviour of a reactive soil during desiccation* (tesis de maestría). Clayton, Australia: Monash University.
- Nieto, C. (2007). Medición del coeficiente de presión de tierras en reposo "K_o", por medio del consolidómetro de Rowe modificado. *Épsilon*, (8), 45-55.

- Pérez, A. P. (2000). *La estructura ecológica principal de la sabana de Bogotá*. Sociedad Geográfica de Colombia – Academia de Ciencias Geográficas. Recuperado de http://www.sogeocol.edu.co/documentos/est_eco.pdf
- Pineda, J. A. (2003). *Investigación experimental sobre el comportamiento volumétrico en una arcilla de sabana de Bogotá en proceso de secado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Pineda, J., Colmenares, J., Martínez, W. y Rodríguez, J. (2003). Comportamiento volumétrico de arcillas superficiales de la sabana de Bogotá en procesos de pérdida de humedad. *Memorias – XII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*. Bogotá: Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- Pineda, J. y Colmenares, J. (2007). *Influence of dessiccation on volume change behavior of Bogota Clay*. Documento procedente de 13th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Isla Margarita, Venezuela.
- Pineda J. A., Rojas L. L., Rivera, S. A. y Rueda, M. Y. (2013). *Algunas patologías de pavimentos flexibles sobre suelos arcillosos fisurados*. Documento proveniente de 11th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity, Cancun, México.
- Rueda, M. Y. (2012). *Estado del arte de la problemática asociada a patologías por desecación en vías del occidente de la sabana de Bogotá* (tesis de maestría). Bogotá, Universidad Santo Tomás.
- Skempton, A. W. (1953). *The colloidal activity of clays*. Londres: Universidad de Londres.
- Skempton, A. W. (1954). *The pore pressure coefficients A and B*. *Geotechnique* (pp. 143-147). Vol. 4. London: ICE Publishing.
- Suárez, D. y Suárez, F. A. (2005). *Determinación del valor del coeficiente de presión de tierras en reposo K_0 para una arcilla superficial de la sabana de Bogotá, mediante ensayos de consolidación unidimensional* (tesis de grado). Bogotá: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.
- Taeseo, K. y Mayne, W. (2013). Profiling of K_0 lateral stress coefficient in soils using paired directional G_0 ratios. *Journal of Applied Geophysics*, 94, 15-21.
- Tavenas, F. A. (1975). In-situ measurement of initial stresses and deformation characteristics. *Proc, In-Situ Measumerent of Soil Properties, ASCE*, (2), 263-270.
- Teerachaikulpanich, N., Satoshi, O., Kazuaki, M. y Hideki, O. (2007). Estimation of coefficient of earth pressure at rest usin modified oedometer test. *Japanese Geotechnical Society*, 47(2), 349-360.
- Vaca, N. J. y Martínez, J. F. (2005). *Determinación del coeficiente K_0 para una arcilla superficial de Uniagraria utilizando succión matricial* (tesis de grado). Bogotá: Fundación Universitaria Agraria de Colombia.

Vesga, L., Caicedo, B., Mesa, L. (2002). Comportamiento del subsuelo arcilloso de la sabana de Bogotá debido a su agrietamiento profundo causado por desecación. *Memorias IX Congreso Colombiano de Geotecnia*. Medellín, Colombia: Sociedad Colombiana de Geotecnia.

