

**Correlación entre
el límite líquido y
el coeficiente de
compresibilidad para
arcillas de llanura
costera**

**Correlation between
the liquid limit and
compressibility
coefficient of clay in the
coastal plains**

**Correlação entre
o limite líquido e
o coeficiente de
compressibilidade para
as argilas da planície
do litoral**

Para citar este artículo / To reference this article /
Para citar este artigo: Martínez Cepeda, C. A. (2016).
Correlación entre el límite líquido y el coeficiente
de compresibilidad para arcillas de llanura costera.
Ingenio Magno, 7(1), 84-100.

Carlos Alberto Martínez-Cepeda

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Facultad de Ingeniería, Maestría en Geotecnia
carlosalberto.martinez@uptc.edu.co

Fecha de recepción: 25 de marzo de 2016

Fecha de aceptación: 8 de junio de 2016

Resumen

Este artículo presenta el análisis de correlación estadística entre el coeficiente de compresibilidad obtenido de múltiples ensayos de consolidación unidimensional y el ensayo de límite líquido practicado sobre suelos que se encuentran de normalmente consolidados a ligeramente sobreconsolidados. Adicionalmente se realiza un análisis de la relación entre la resistencia al corte no drenado y el esfuerzo de preconsolidación con el índice de plasticidad en el entorno explorado. Para el desarrollo del tema se presentan, en primera instancia, las características geológicas del entorno en el cual se realizó la exploración geotécnica del subsuelo. Posteriormente se muestra la metodología de exploración utilizada para la obtención de muestras inalteradas y se hace énfasis en los resultados de ensayos de laboratorio para la caracterización física de las arcillas obtenidas de la zona de estudio. Finalmente se realiza la comparación y discusión de la correlación estadística obtenida con respecto a las diferentes correlaciones en el tema propuestas por distintos autores. En función del análisis realizado, se determina la aplicabilidad de las correlaciones existentes a suelos arcillosos compresibles de origen geológico similar.

Palabras clave: arcillas, coeficiente de compresibilidad, consolidación, límite líquido, índice de plasticidad, correlación.

Abstract

The objective of this article is to present an analysis of the statistical correlation existing between the coefficient of compressibility C_c obtained through multiple one dimensional trials and the liquid limit found in soils that are normally consolidated to quickly over consolidated. In addition, the relationship between drainage resistance and preconsolidation strength with a plasticity index within a controlled environment was analyzed. In order to further develop this topic, the geological characteristics of the environment whose subsoil was tested are presented. Next, the exploration methods used to obtain undisturbed samples are presents. Emphasis is made on the results obtained from the laboratory tests done on to physically characterize the clays attained from the study site in the north coast of Colombia in the city of Cartagena. Finally, a comparison and discussion are included on the statistical correlation obtained with respect to different correlations presented by several authors.

In function of the analysis done, the use of the existing correlations on clay soils with similar geological origin will be determined.

Keywords: clay soils, compressibility coefficient, consolidation, liquid limit, plasticity index, correlation.

Resumo

O objetivo do artigo é apresentar a análise da correlação estadística existente entre o coeficiente de compressibilidade C_c obtido de múltiplos ensaios de consolidação unidimensional e o ensaio de limite líquido sobre os solos consolidados e ligeiramente sobreconsolidados. Adicionalmente, realiza-se uma análise da relação entre a resistência ao corte não drenado e ao esforço de pré-consolidação com o índice de plasticidade dentro do entorno explorado. Para o desenvolvimento do tema apresenta-se em primeira instância as características geológicas do entorno no qual foi apresentada a metodologia de exploração utilizada para a obtenção de amostras inalteradas. Uma ênfase é posta nos resultados dos ensaios de laboratório para a caracterização física das argilas obtidas na zona de estudo no litoral norte da Colômbia, na cidade de Cartagena. Finalmente apresenta-se o comparativo e a discussão da correlação estadística com respeito às diferentes correlações propostas pelos autores. Segundo a

análise realizada, determinou-se a aplicabilidade das correlações existentes nos solos argilosos compressíveis com origem geológica similar.

Palavras Chave: argilas, coeficiente de compressibilidade, consolidação, argilas, coeficiente de compressibilidade, consolidação, limite líquido, índice de plasticidade, correlação.

1. Introdução

Como parte del proyecto de investigación *Modelación mediante métodos numéricos del sistema de fundación del viaducto el Gran Manglar*, desarrollado en la Maestría en Geotecnia de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, se realizó el análisis de correlación entre el coeficiente de compresibilidad (C_c) y el límite líquido (LL) para los depósitos arcillosos recientes situados en la zona de localización del proyecto. Dado que la literatura presenta expresiones que correlacionan el coeficiente de compresibilidad con el índice de plasticidad (IP), este caso también será analizado.

Dicho análisis parte de los resultados de ensayos de consolidación unidimensional y límites de Atterberg efectuados sobre arcillas orgánicas provenientes de la unidad geológica denominada *llanura costera*, que se sitúa particularmente hacia el norte de Cartagena, en el corregimiento de La Boquilla.

Adicionalmente, a partir de los resultados de resistencia al corte no drenada (C_u), provenientes de ensayos de corte directo simple, se evalúa la teoría de Mesri (1975), en la que se encontró que la relación de C_u/σ'_p es poco dependiente del índice de plasticidad y que es aproximadamente constante en 0,22.

A continuación se presenta una breve descripción del proyecto y de las principales características geológicas, las actividades y metodologías empleadas para la ejecución de la exploración y toma de muestras, los ensayos de laboratorio, los análisis de correlación entre

las variables en estudio y los respectivos resultados. Las actividades de exploración y laboratorio se inscriben en los estudios geotécnicos realizados para la construcción del viaducto el Gran Manglar, que estará a cargo de una concesión vial y que forma parte de la ola de crecimiento de infraestructura 4G liderada por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI).

2. Descripción del proyecto

En la ciénaga de la Virgen, al norte de Cartagena, se proyecta la construcción de un viaducto con una longitud aproximada de 4800 m. Durante la etapa de diseño se realizó un programa de exploración directa e indirecta que permitió caracterizar los materiales, tanto horizontalmente como en profundidad, a través de la ejecución de ensayos de campo y laboratorio. En la figura 1 se observa la localización del proyecto.

La zona presenta una topografía plana con pocos accidentes geográficos y un nivel de lámina de agua que varía entre los 0,40 y 1,50 m de profundidad. El flujo de agua es laminar y está fuertemente influenciado por las corrientes de viento y, en segunda medida, por el ingreso y la salida de agua de mar. Esto último depende de las dinámicas de ascenso de la marea, que se da en horas de la madrugada, y de descenso, que ocurre en horas de la mañana y hasta el final de la tarde.

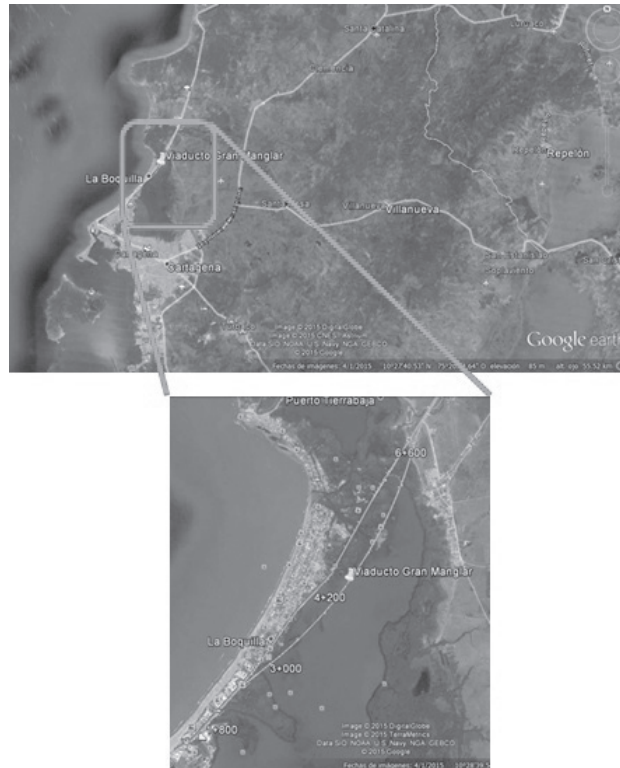


Figura 1. Localización del viaducto el Gran Manglar

Fuente: Google Earth.

3. Marco conceptual

De acuerdo con Das (2001), un incremento del esfuerzo provocado por la construcción de cimentaciones u otras cargas comprime los estratos de suelo. Este proceso de compresión de los suelos ante la imposición de cargas es conocido como *asentamiento*. La compresión es causada por deformación de partículas de suelo, reacomodo de partículas de suelo y expulsión de agua o aire de los espacios vacíos.

Los asentamientos básicamente pueden clasificarse en tres: a) *asentamiento inmediato*, causado por deformación elástica de las partículas de suelo; b) *asentamiento por consolidación primaria*, como resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos, debido a la expulsión de agua que ocupa los espacios vacíos, y c) *asentamiento por consolidación*

secundaria, como resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo (Das, 2001, p. 151).

El valor del asentamiento por consolidación primaria puede calcularse usando el índice de compresión (C_c), obtenido de una gráfica de relación de vacíos e versus \log del esfuerzo (Bowles, 1997). En la figura 2 se presenta un ejemplo de este gráfico, donde el coeficiente de compresibilidad representa la pendiente de la porción de la curva conocida como *tramo virgen*. Este tramo muestra el comportamiento del suelo cuando es sometido a un nivel de esfuerzo superior al máximo que haya sido sometido en su historia (esfuerzo de preconsolidación [p'_c]) (Bowles, 1997, p. 76).

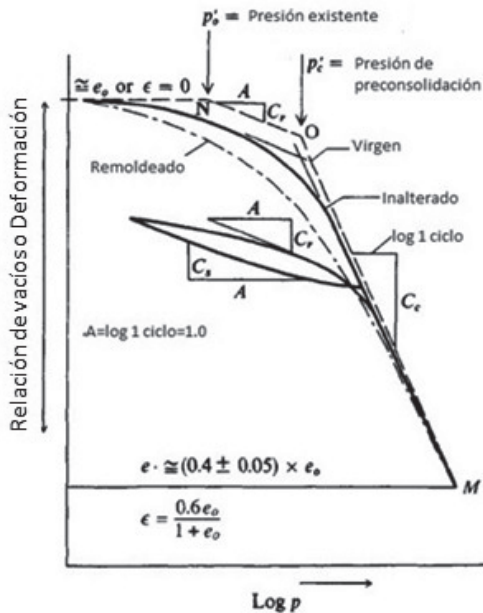


Figura 2. Gráfica general de e vs. p para un suelo preconsolidado

Fuente: Bowles (1997).

El ensayo de consolidación puede tomar bastante tiempo en su ejecución, y es allí cuando adquiere importancia el uso de expresiones que permitan correlacionar los parámetros y coeficientes obtenidos. De acuerdo con Bowles (1997), el índice de plasticidad es comúnmente empleado en correlaciones de resistencia, en tanto el límite líquido es usado principalmente para estimaciones de consolidación.

En la tabla 1 se presentan algunas de las correlaciones existentes para la determinación de C_c dadas por diferentes autores. Estas se encuentran en función de diferentes variables, como la relación de vacíos inicial, la gravedad específica, el peso unitario saturado y seco, la humedad natural, el límite líquido y el índice de plasticidad.

Tabla 1. Ecuaciones de correlación para el índice de compresibilidad (C_c) en suelos

Correlation equations for soil compressibility/consolidation		
Compression index, C_c	Comments	Source/Reference
$C_c = 0.009(w_L - 10)$ ($\pm 30\%$ error)	Clays of moderate S_u	Terzaghi and Peck (1967)
$C_c = 0.37(e_o + 0.003w_L + 0.0004w_N - 0.34)$	678 data points	Azzouz et al. (1976)
$C_c = 0.141G_s \left(\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_{dry}} \right)^{2.4}$	All clays	Rendon-Herrero (1983)
$C_c = 0.0093w_N$	109 data points	Koppula (1981)
$C_c = -0.0997 + 0.009w_L + 0.0014I_p + 0.0036w_N + 0.1165e_o + 0.0025C_p$	109 data points	Koppula (1981)
$C_c = 0.329[w_N G_s - 0.027w_p + 0.0133I_p(1.192 + C_p/I_p)]$	All inorganic clays	Carrier (1985)
$C_c = 0.046 + 0.0104I_p$	Best for $I_p < 50\%$	Nakase et al. (1988)
$C_c = 0.00234w_L G_s$	All inorganic clays	Nagaraj and Srinivasa Murthy (1985, 1986)
$C_c = 1.15(e_o - 0.35)$	All clays	Nishida (1956)
$C_c = 0.009w_N + 0.005w_L$	All clays	Koppula (1986)
$C_c = -0.156 + 0.411e_o + 0.00058w_L$	72 data points	Al-Khafaji and Andersland (1992)

Fuente: Bowles (1997).

En lo referente a la relación de Mesri (1975), en la figura 3 se presentan las curvas obtenidas de la evaluación de la correlación entre la resistencia al corte no drenada (S_u)

y el esfuerzo de preconsolidación (σ'_p) con el índice de plasticidad (I_p), a partir de los resultados de S_u provenientes de diferentes tipos de ensayos. En la

investigación de Holtz y Kovacs (1981) se determinó que no existe una relación directa entre estas propiedades y que la relación S_u/σ'_p tiende a un valor constante de 0,22.

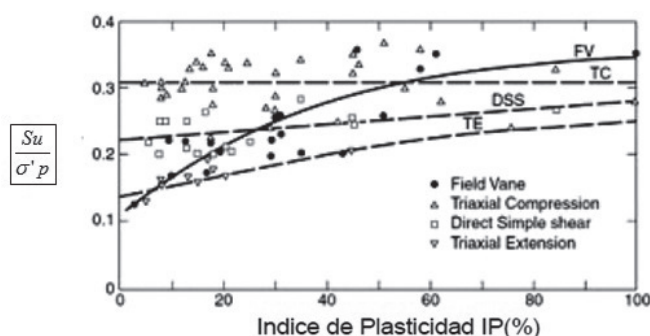


Figura 3. Relación S_u/σ'_p de Mesri (1975)

Fuente: Holtz y Kovacs (1981).

4. Estado del arte en el ámbito local

A continuación se reseñan brevemente algunas investigaciones desarrolladas en el ámbito local que son importantes para poner en contexto el presente estudio.

A. Determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión y las propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira

Con el apoyo de la Universidad Libre de Pereira, Molina, Hernández y Castillo (2012) llevaron a cabo una investigación para la determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión (C_c) y las propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira. En dicha investigación se realizó una serie de perforaciones para muestreo en distintas zonas de la ciudad.

Las muestras obtenidas fueron sometidas a ensayos de consolidación unidimensional, límites de Atterberg, humedad natural y gravedad específica. Los suelos ensayados provienen de cenizas volcánicas, que en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

corresponde a limos de alta plasticidad y compresibilidad (MH). La investigación concluye que existe una buena correlación al analizar los datos de cada sitio en particular; sin embargo, al estudiar el conjunto de sitios, se presenta una mayor dispersión de datos y el coeficiente de correlación disminuye.

B. Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá

En Bogotá, Montaña (2013) realizó una investigación a través de pruebas de campo (como corte con veleta), ejecutadas en inmediaciones de la pista sur del aeropuerto El Dorado, y ensayos de laboratorio (como consolidación unidimensional, ensayos triaxiales UU, ensayos para la obtención de propiedades índice).

A partir de estos estudios se logra la caracterización de las arcillas, se obtienen parámetros de resistencia y deformabilidad típicos y se evalúa su relación con las propiedades índice, orientada a la determinación de parámetros de deformabilidad adecuados para el cálculo y la predicción de asentamientos por consolidación.

Finamente fue posible obtener algunas correlaciones entre los parámetros de deformabilidad y las propiedades índice, al igual que los esfuerzos de preconsolidación con la resistencia al corte no drenada.

C. Mangles de Cartagena de Indias: patrimonio biológico y fuente de biodiversidad

En cuanto a la zona que atañe a la presente investigación, si bien no se encontraron estudios directamente relacionados, sí se cuenta con un importante estudio de caracterización físico-química de los suelos de manglar, realizado por Díaz, Castro y Manjarrez (2010). Estos investigadores señalan:

Las formaciones vegetales de manglar se asocian normalmente a suelos salobres, considerados pobres físicamente hablando, localizados en zonas de influencia de las mareas, tales como estuarios, lagunas y ensenadas, son muy comunes en zonas intertropicales, las cuales presentan condiciones innatas de temperatura, radiación solar, humedad relativa, formación de suelos y régimen hidrológico que hacen de esta zona diferente a las demás (p. 15).

Según este estudio, una variable por considerar es el grado de salinidad de los sedimentos presentes en la zona de manglar. El documento indica que la salinidad de los sedimentos en bosques de manglar localizados a orillas de la costa es más alta que la del agua de mar, debido a la influencia de la evaporación.

El estudio incluyó también diversas zonas de manglar, dentro de las que se encuentra la ciénaga de la Virgen. Aunque el estudio no hace énfasis en los minerales que componen el subsuelo, sí refiere el contenido de materia orgánica (entre 12 y 35%), ph (entre 8,06 y 8,23%) y salinidad (entre 1,6 y 2,1 ppm) (Díaz, Castro y Manjarrez, 2010, p. 26)

5. Metodología

En este punto se empleó información referente a geología local y regional, exploración del subsuelo y resultados de ensayos de laboratorio. Para el tratamiento de los datos se realizó la conformación de una base de datos, a través de las herramientas de Excel 2013. A continuación se presenta la información, que proviene de la ejecución de los diseños fase III llevados a cabo por la Concesión Costera Cartagena Barranquilla.

D. Geología local

El área de investigación se sitúa en la ciénaga de la Virgen, o ciénaga de Tesca, ubicada al norte de Cartagena. Este sector limita con las playas del corregimiento La Boquilla, que forman parte de la línea costera que separa la ciudad del océano Atlántico. En la figura 4 se presentan las diferentes unidades geológicas regionales presentes y circundantes al área de estudio.

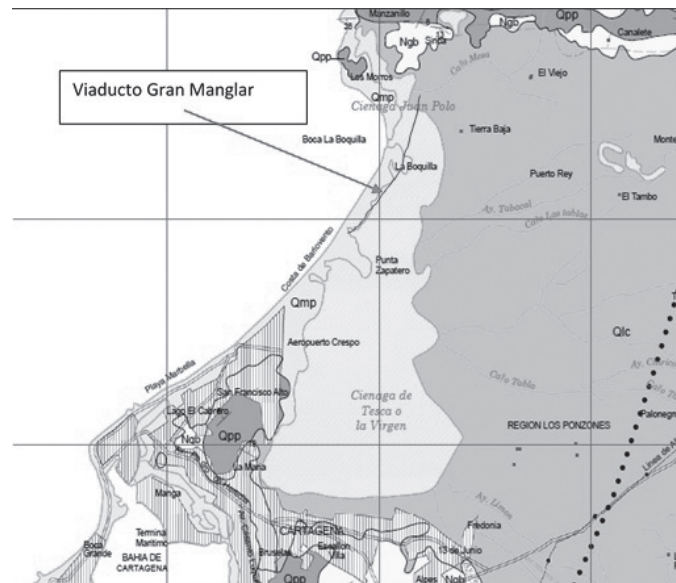


Figura 4. Geología regional

Fuente: Ingeominas (2003)

Es conveniente destacar que las exploraciones locales se llevaron a cabo hacia el norte de la ciénaga. A partir de las observaciones de campo y el tipo de suelo

obtenido en la exploración directa, se determinó la presencia de depósitos recientes a lo largo del eje del viaducto, a saber:

- *Depósitos aluviales recientes (Qar)*. Sedimentos finos conformados por limos, arcillas y, en menor proporción, arenas de grano fino, los cuales se localizan en los cursos de canales que comunican la ciénaga con el océano.
- *Depósitos de manglar (Qm)*. Caracterizado por la presencia de sedimentos finos, con presencia importante de materia orgánica. En el escenario local, estos sedimentos se encuentran cubiertos por un nivel de lodo con espesor entre 10 y 12 m, que se ha depositado en el lecho de la ciénaga.
- *Depósitos de llanura costera (Qlc)*. Corresponde a depósitos orgánicos y clásticos que se originan en la llanura costera. Dentro de los depósitos orgánicos se diferencian dos tipos: unos corresponden a los llamados manglares y los otros están asociados al crecimiento de corales. Dentro de los depósitos clásticos se encuentran las arenas depositadas y retrabajadas en la zona intermareal. Las islas barreras se deben a la acción de las corrientes marinas y los deltas formados en la desembocadura de las corrientes de agua en el mar.

E. Exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio

A continuación se presenta de manera sucinta el resumen de la metodología de exploración empleada y de los ensayos de laboratorio ejecutados.

1) Exploración directa del subsuelo

Para la ejecución de la exploración del subsuelo se emplearon equipos mecánicos que permiten la ejecución de ensayos de campo como el SPT (*standard penetration test*), así como la perforación mediante rotación e

hincado de tubos de pared delgada para la obtención de muestras inalteradas, al detectar la presencia de suelos arcillosos.

La figura 5 ilustra el proceso exploratorio ejecutado en la ciénaga; por su parte, la figura 6 muestra el tipo de arcillas encontradas.

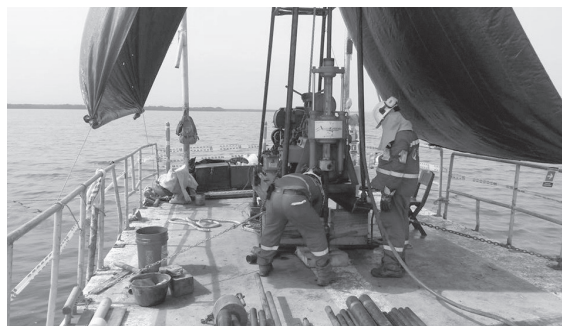


Figura 5. Proceso de exploración directa

Fuente: autor.

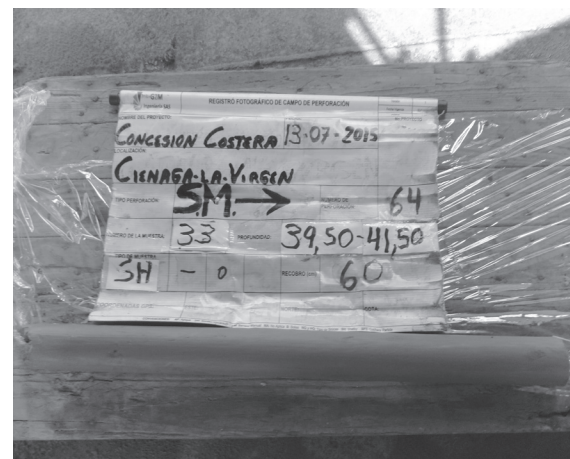


Figura 6. Arcillas de consistencia firme

Fuente: autor.

2) Ensayos de laboratorio

Para la ejecución de los ensayos de laboratorio se acudió a los servicios de un laboratorio certificado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC), con un sistema de gestión de calidad igualmente acreditado. Los procedimientos empleados para la ejecución de los ensayos corresponden principalmente a

los establecidos en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de vías (Invías), o bien, la norma de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) aplicable.

En cuanto a la cantidad de ensayos de deformabilidad ejecutados, es importante destacar que se dispone de 27 ensayos de consolidación unidimensional ejecutados en 2015, y 29 en 2012.

3) Caracterización y clasificación de los suelos

La fracción fina de los suelos encontrados en la etapa exploratoria posee, en términos generales, un alto grado de plasticidad; se encuentran valores de límite líquido entre 33 y 190%, y límite plástico entre 9 y 63%.

En la figura 7 se puede observar la variación del contenido de humedad natural de los suelos con la profundidad, al igual que su magnitud con respecto al límite líquido y el límite plástico. En términos generales, los materiales se encuentran en estado plástico; en su gran mayoría, desde el SUCS, se catalogan como CH y MH, y en menor proporción como CL.

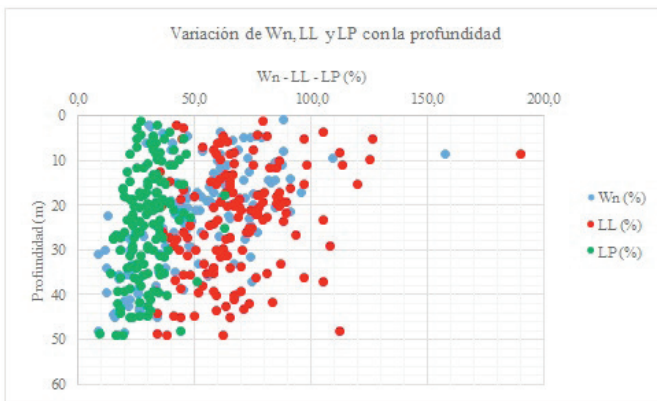


Figura 7. Variación del contenido de humedad, límite líquido y límite plástico con la profundidad

Fuente: autor.

La figura 8 presenta la variación de la composición granulométrica de los materiales encontrados. Se evidencia un fuerte predominio de suelos finos entre los 5 y los 44 m de profundidad, espesor en el que se tomaron y ensayaron las muestras inalteradas. El valor medio del contenido de suelos finos que pasaron el tamiz 200 es, en promedio, del 88%.

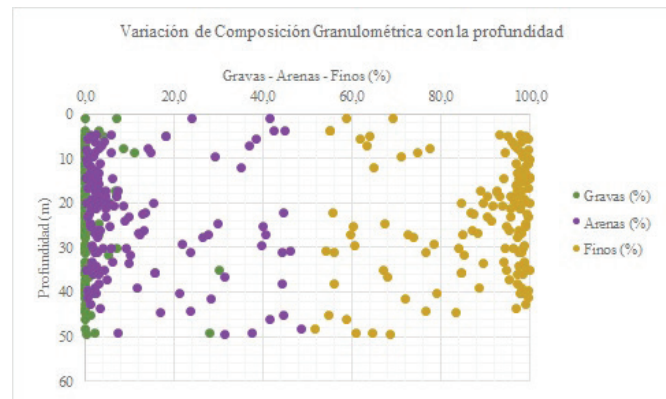


Figura 8. Variación de la composición granulométrica con la profundidad

Fuente: autor.

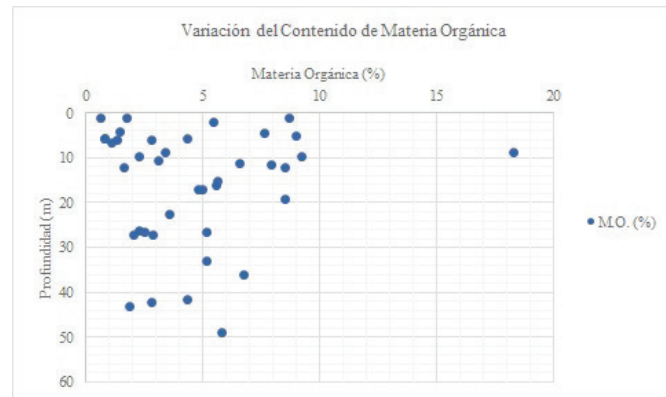


Figura 9. Variación del contenido de materia orgánica

Fuente: autor.

En la figura 9 se presenta la variación del contenido de materia orgánica con la profundidad. Como se observa, los valores pico de contenido de material orgánico,

determinados a partir del procedimiento establecido en la norma INV E-121, indican dentro de los primeros 20 m de profundidad valores que exceden el 3% y alcanzan un pico de 18%, con un valor medio de 7%.

F. Correlaciones existentes

En la literatura es posible encontrar diversas correlaciones entre el límite líquido y el coeficiente de compresibilidad. Como referencia del presente artículo se toma la correlación determinada por Terzaghi y Peck (1967) [1], que es aplicable en arcillas inalteradas; la correlación de Skempton (1986) [2], determinada para arcillas en suelos españoles, y la correlación de Nakase y Boekhout (1988) [3], en la que la variable por correlacionar no es directamente el límite líquido, sino el índice de plasticidad.

$$C_c = 0.009 * (LL - 10) \quad [1]$$

$$C_c = 0.0097 * (LL - 16.4) \quad [2]$$

$$C_c = 0.046 + 0.0104 * IP) \quad [3]$$

6. Análisis de correlación y resultados

Para la realización de los análisis se contó con una muestra de 27 consolidaciones realizadas en 2015, más 29 consolidaciones ejecutadas en un estudio previo durante 2012, para un total de 56 ensayos. Cada una de ellas tiene los correspondientes límites de consistencia. Para el estudio, la variable dependiente será C_c y la variable independiente será LL, o para el segundo caso, IP. En la tabla 2 se presentan los datos de las variables analizadas.

Tabla 2. Índice de plasticidad (IP), límite líquido (LL) y coeficientes de compresibilidad (C_c) obtenidos en laboratorio

IP (%)	LL (%)	C_c	IP (%)	LL (%)	C_c
41	65	0,308	73,8	107,7	0,992
46	69	0,772	95,5	115,2	0,992
47	76	0,226	71,0	104,2	0,594
46	72	0,704	29,5	44,5	0,741
60	86	0,520	63,7	80,7	0,619
38	70	0,376	26,8	50,6	0,325
38	54	0,239	25,0	39,8	0,166
60	97	0,558	69,0	108,3	0,46
62	86	0,413	83,1	121,2	0,74
54	77	0,609	57,2	89,0	0,8
79	112	0,787	41,0	62,5	0,53
49	77	0,606	69,9	100,2	0,33
44	79	0,536	47,3	62,3	0,46

IP (%)	LL (%)	Cc	IP (%)	LL (%)	Cc
78	108	0,586	53,1	69,5	0,17
50	70	0,443	33,4	49,9	0,9
50	86	0,720	44,7	65,1	0,6
62	87	0,713	53,9	73,3	0,96
68	112	0,840	82,6	108,1	0,45
74	113	1,021	81,0	108,1	2,02
73	97	0,509	44,5	67,8	1,13
34	66	0,315	76,5	100,7	1,17
16	33	0,154	82,6	120,4	1,06
16	36	0,087	88,2	132,6	1,21
32	47	0,200	53,4	82,3	0,84
57	85,0	0,609	74,3	96,9	0,77
44	89,0	0,363	89,9	120,0	0,66
52,3	70,31	0,150	99,8	131,8	1,7
48,1	77,6	0,53	52,4	82,4	0,72

Fuente: autor.

G. Correlación obtenida entre Cc y LL

En el análisis realizado entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido se obtuvo una expresión con un coeficiente de correlación lineal de Pearson $r = 0,61$, que permite clasificar el grado de correlación como positiva moderada.

La ecuación [4] presenta la expresión resultado de la regresión lineal, mediante el método de los mínimos cuadrados y empleando los datos de Cc y LL obtenidos en laboratorio:

$$Cc = 0,0087 * LL - 0,0897 \quad [4]$$

Esta ecuación, expresada en los términos presentados en la literatura, se presenta en [5], donde se ha

factorizado el coeficiente que acompaña la variable independiente:

$$Cc = 0,0087 * (LL - 10.3) \quad [5]$$

En la figura 10 se observa el gráfico de dispersión de puntos, que representa los valores de LL y Cc provenientes de laboratorio y que por su disposición indican una asociación positiva entre las dos variables. En color naranja se muestran los valores de Cc, que son producto de aplicar la expresión de correlación lineal, donde LL es la variable independiente.

Es posible observar también que para los valores de límite líquido que exceden el 62%, el error de estimación, dado como la diferencia entre el valor observado del

coeficiente de compresibilidad C_c y el valor que arroja la expresión [5], se incrementa considerablemente.

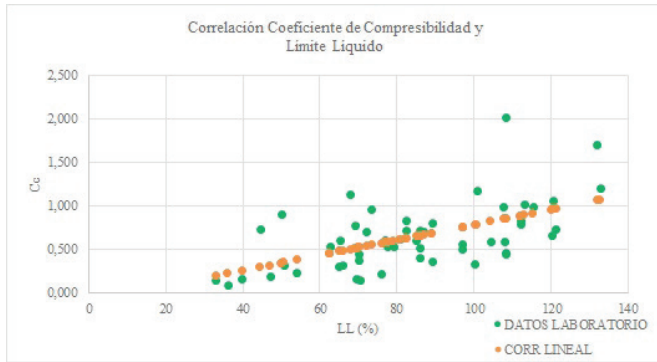


Figura 10. Correlación lineal obtenida entre C_c y LL

Fuente: autor.

4) Prueba de hipótesis para C_c y LL

Al coeficiente de correlación obtenido se le aplica la prueba de hipótesis, con el fin de corroborar la existencia de correlación lineal entre las variables estudiadas. Para ello, se emplea un nivel de confianza $\alpha = 0,05$.

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa planteadas se expresan de la siguiente forma:

$$H_0: \rho = 0 \text{ (no existe correlación lineal)}$$

$$H_1: \rho \neq 0 \text{ (existe correlación lineal)}$$

En la tabla 3 se presenta el valor observado t_o , obtenido de la muestra en análisis conformada por 56 pares de datos. Para el nivel de confianza establecido, y tomando el modelo estadístico de dos colas, se determina el intervalo de aceptación mostrado. Como en este caso el valor observado $t_o = 3,849$ se encuentra por fuera del intervalo de aceptación, la hipótesis nula H_0 se rechaza; por tanto, existe correlación lineal.

Tabla 3. Intervalo de aceptación (C_c y LL)

r	Sr	t0	GI	tstudent
0,61	0,158	3,849	54	2,005
Intervalo de aceptación			[-2,0049, +2,0049]	

Fuente: autor.

Desde el enfoque de ρ se obtiene una probabilidad de $3.2E-04$, con lo cual se requeriría un nivel de confianza mucho menor al 5% para que la hipótesis nula pueda ser aceptada.

H. Correlación obtenida entre C_c e IP

De la misma manera como se analizó la correlación entre el coeficiente de compresibilidad y el límite líquido, se realizó el análisis teniendo cuenta esta vez como variable independiente el índice de plasticidad (IP). De esta evaluación se obtuvo una expresión con un coeficiente de correlación lineal de Pearson $r = 0,59$, que permite clasificar el grado de correlación como positiva moderada.

La ecuación [6] presenta la expresión resultado de la regresión lineal, mediante el método de los mínimos cuadrados y empleando los datos de C_c e IP obtenidos en laboratorio.

$$C_c = 0,0112 * IP + 0,00478 \quad [6]$$

En la figura 11 se observa el gráfico de dispersión de puntos, que representa los valores de IP y C_c provenientes de laboratorio y que, por su disposición, indican una asociación positiva entre las dos variables. En color naranja se muestran los valores de C_c , que son producto de aplicar la expresión de correlación lineal, donde IP es la variable independiente.

Es posible observar que para los valores de índice de plasticidad mayores al 45%, el error de estimación, dado como la diferencia entre el valor observado del coeficiente de compresibilidad C_c y el valor que arroja la expresión [6], se incrementa considerablemente.

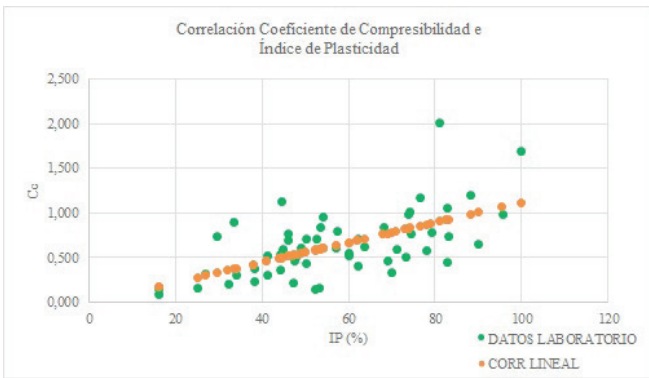


Figura 11. Correlación lineal obtenida entre C_c e IP

Fuente: autor.

5) Prueba de hipótesis para C_c e IP

Para este caso se realiza la prueba de hipótesis, con el fin de corroborar la existencia de correlación lineal entre las variables estudiadas, tal como se aplicó en el anterior caso. Para ello se emplea un nivel de confianza $\alpha = 0,05$.

La hipótesis nula y la hipótesis alternativa planteadas son las mismas empleadas en el análisis del coeficiente de correlación que se obtuvo entre C_c y LL.

En la tabla 4 se presenta el valor observado t_o , obtenido de la muestra estudiada compuesta por 56 pares de datos. Para el nivel de confianza establecido, y tomando el modelo estadístico de dos colas, se determina el intervalo de aceptación mostrado. Como en este caso el valor observado $t_o = 3.654$ se encuentra por fuera del intervalo de aceptación, la hipótesis nula H_0 se rechaza; por tanto, existe correlación lineal.

Tabla 4. Intervalo de aceptación (C_c e IP)

r	Sr	t0	GI	tstudent
0,59	0,161	3,654	54	2,005
Intervalo de aceptación			[-2.0049,+2,0049]	

Fuente: autor.

Desde el enfoque de ρ se obtiene una probabilidad de $5.85E-04$, con lo cual se requeriría un nivel de confianza mucho menor al 5% para que la hipótesis nula pueda ser aceptada.

6) Comparativa de correlaciones

La correlación obtenida en la presente investigación entre LL y C_c muestra una variación promedio de 31% con respecto a los valores de C_c obtenidos en laboratorio. En cuanto a la correlación de Terzaghi y Peck (1967), presenta una variación promedio del 34% con respecto a los valores de C_c obtenidos en laboratorio.

Por su parte, la correlación de Skempton (1986) muestra una variación promedio del 31%. En la figura 12 se presentan las curvas de cada correlación entre LL y C_c frente a los valores de C_c obtenidos en laboratorio. De la muestra de 56 pares de datos, se presentan 4 valores en los que la variación excede el 100%. Estos valores atípicos se excluyen de los valores promedio mencionados.

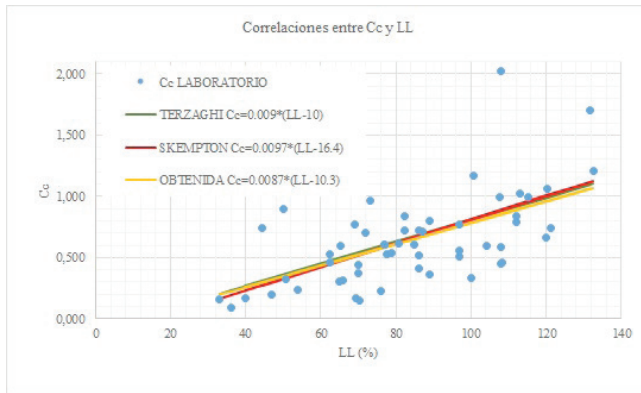


Figura 12. Correlaciones entre LL y Cc y valores medidos en laboratorio

Fuente: autor.

Con respecto a la correlación que se obtuvo entre IP y Cc, se presenta una variabilidad promedio de 28% con respecto a los valores obtenidos en laboratorio. Por su parte, la correlación de Nakase y Boekhout (1988) muestra una variabilidad promedio del 50%.

En la figura 13 se observan las curvas de cada correlación entre Cc e IP frente a los valores de Cc obtenidos en laboratorio. Al igual que en el caso anterior, de la muestra de 56 pares de datos, se presentaron 7 valores que exceden hasta un 200% los valores medidos para la correlación de Nakase; en consecuencia, dichos valores atípicos se excluyen del valor promedio mencionado para dicha correlación.

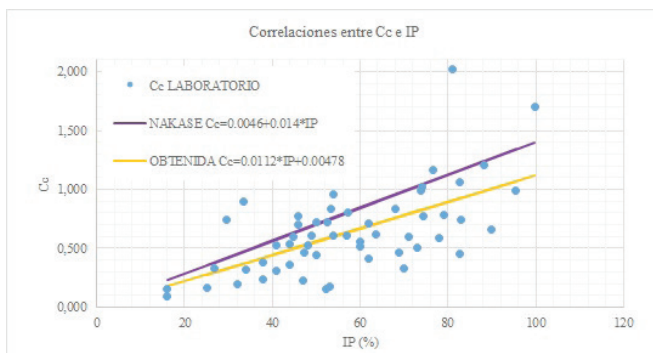


Figura 13. Correlaciones entre IP y Cc y valores medidos en laboratorio

Fuente: autor.

I. Relación entre resistencia al corte no drenada (S_u) y esfuerzo de preconsolidación

Haciendo uso de los valores de resistencia al corte no drenado (provenientes de ensayos de corte directo simple) y de los valores de esfuerzo de preconsolidación (obtenidos de las gráficas de relación de vacíos contra logaritmo del esfuerzo, resultantes de los ensayos de consolidación unidimensional), se realizó el análisis de la relación entre S_u/σ'_p con el índice de plasticidad, con el fin de verificar la teoría propuesta por Mesri (1975). Esta indica que no existe una relación directa entre dichas variables y que la relación entre la resistencia al corte no drenada y el esfuerzo de preconsolidación tiende a un valor constante. En la tabla 5 se presentan los datos que fueron analizados.

Tabla 5. Datos para análisis de la relación S_u/σ'_p

S_u (kPa)	σ'_p (kPa)	S_u/σ'_p	IP(%)
38,8	130,0	0,30	60,0
36,6	110,0	0,33	38,0
16,9	80,0	0,21	38,0
39,3	100,0	0,39	54,0
26,3	100,0	0,26	32,0
24,0	80,0	0,30	95,5
38,0	190,0	0,20	63,7
42,0	230,0	0,18	26,8
42,0	200,0	0,21	25,0
29,0	120,0	0,24	83,1
14,0	48,0	0,29	57,2
36,0	140,0	0,26	69,9
42,0	100,0	0,42	76,5
46,0	190,0	0,24	88,2

Fuente: autor.

En la figura 14 se aprecia la variación de la relación

estudiada con respecto al índice de plasticidad. Se encuentra una dispersión significativa de los datos, pero con una tendencia lineal ligeramente creciente, es decir, con una ligera pendiente positiva. El rango de variación obtenido de la relación S_u/σ'_p oscila entre 0,18 y 0,42. De esta manera, y realizando una aproximación de la relación a un valor medio, este corresponde a 0,26. Respecto al valor propuesto por Mesri de 0,22, este es 15% inferior al encontrado en la investigación. Esto puede deberse particularmente a la influencia del alto contenido de materia orgánica presente en el subsuelo de la ciénaga de la Virgen.

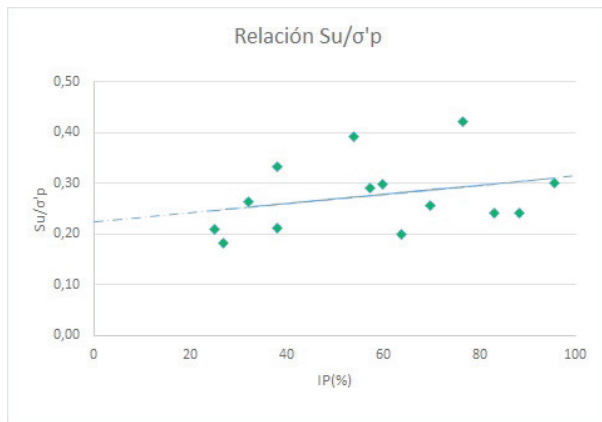


Figura 14. Relación S_u/σ'_p para arcillas de llanura costera

Fuente: autor.

7. Conclusiones

El análisis realizado sobre las arcillas existentes en la ciénaga de la Virgen, al norte de Cartagena, permitió verificar la existencia de correlación de tipo lineal entre el coeficiente de compresibilidad como variable dependiente y el límite líquido e índice de plasticidad como variables independientes para los suelos finos allí presentes.

Las expresiones de correlación obtenidas en el análisis realizado son bastante similares a las propuestas por Terzaghi y Peck (1967) para la asociación del coeficiente

de compresibilidad con el límite líquido.

En cuanto a la asociación del coeficiente de compresibilidad con el índice de plasticidad dada por Nakase y Boekhout (1988), es ligeramente diferente a la expresión de correlación obtenida en la investigación, con una particularidad respecto al incremento del error de estimación, que es significativamente alto para suelos con límite líquido mayor a 60% o índice de plasticidad mayor a 45%.

A partir de lo observado, puede determinarse que el uso de la correlación de Terzaghi y Peck (1967) es fiable en suelos de plasticidad media a baja, y debe tenerse mucha precaución para suelos de alta plasticidad, dada la naturaleza y el ambiente geológico de los suelos aquí estudiados.

El error de estimación observado en los suelos de alta plasticidad coincide con zonas en las que los contenidos de materia orgánica exceden el 5%. Ello es un claro indicio de la influencia de esta variable en el proceso de consolidación y cuidado que debe tenerse al hacer uso de este tipo de correlaciones, en particular cuando se tiene el conocimiento y la evidencia de la presencia significativa de material orgánico en los materiales.

Para las correlaciones obtenidas en la presente investigación, se presentó una variabilidad entre el 28% y el 31% entre los valores correlacionados y los valores medidos en laboratorio. Se considera que no se debe utilizar la correlación de Nakase y Boekhout (1988) para obtener el C_c empleando el índice de plasticidad, dado que se presenta una variabilidad del 50% entre los valores correlacionados y medidos en laboratorio, sin contar con 7 valores que exceden en más del 100% el valor medido en laboratorio.

Con respecto al análisis de la relación entre la resistencia

al corte no drenada y el esfuerzo de preconsolidación con el índice de plasticidad, no se encuentra una clara tendencia que permita correlacionar S_u/σ'_p con el índice de plasticidad; sin embargo, se observó en los datos analizados que la relación S_u/σ'_p oscila entre 0,18 y 0,42. Al realizar la regresión lineal, se obtiene una recta con tendencia ligeramente positiva, pero casi horizontal, lo cual muestra que la relación de S_u/σ'_p es independiente de la variación del índice de plasticidad y tiende a un valor medio de 0,26.

Finalmente, dentro de las limitaciones y los factores de influencia en los resultados se encuentran todas aquellas variables que intervienen en el proceso, desde la exploración y toma de muestras, la conservación, el transporte de estas y la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Aunque este proceso contó con personal calificado y con equipos calibrados, es bien sabida la influencia en los resultados de ensayos de laboratorio como producto de la preparación y el montaje de las muestras, y en mayor medida de las diferencias en la toma de lecturas y los demás aspectos que puedan darse entre laboratoristas y entre ensayos.

Asimismo, es deseable contar con una muestra estadística mucho mayor que permita determinar y ajustar las correlaciones de manera confiable al tipo de suelos presentes en nuestro país. Más deseable aún es generar conciencia en torno a la importancia de la ejecución de estudios geotécnicos de calidad en el desarrollo de la ingeniería en el país, con buenas prácticas en los métodos de exploración, así como la realización de ensayos de laboratorio suficientes y acordes con el tipo de obra y el suelo encontrado.

Siempre se debe procurar ejecutar los ensayos necesarios y dejar como último recurso el uso de las correlaciones, que siempre tendrán un nivel de

incertidumbre. Si contamos con suerte, este será bajo y la obra ejecutada tendrá un buen comportamiento, similar al esperado, o bien, será alto y conllevará problemas de diferente magnitud que requerirán mayores inversiones en reparaciones y mantenimientos correctivos de las estructuras, en el mejor de los casos. Mas en el peor de los casos, puede llegar a lamentarse la pérdida de vidas humanas, por haber escatimado, durante la etapa de diseño, en la asignación de los recursos necesarios, que muy seguramente serán ínfimos en comparación con los requeridos para reparar las obras o indemnizar las víctimas.

La aplicabilidad de las correlaciones aquí obtenidas se deja al buen criterio y juicio ingenieril de quien las consulte, y en ninguna circunstancia pretenden reemplazar la ejecución de los ensayos de laboratorio.

Referencias

Bowles, J. E. (1976). *Foundation analysis and design* (5.ª ed). Preoria: McGraw-Hill.

Concesión Costera Cartagena Barranquilla (2015). *Geología para ingeniería* (vol. III). Barranquilla: Autor.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Ciudad de México: Thomson

Díaz, C., Castro, I. y Manjarrez, G. (2010). *Mangles de Cartagena de Indias: Patrimonio biológico y fuente de biodiversidad*. Colombia: Fundación Universitaria Tecnológico Comfenalco.

Holtz, R. y Kovacs, W. (1981). *An introduction to Geotechnical Engineering*. Nueva Jersey: Prentice Hall.

Ingeominas (2003). Plancha 023, Cartagena.

Molina, G., Hernández, E. y Castillo C. (2012).

Determinación de la correlación entre el coeficiente de compresión y propiedades índice en suelos de expansión urbana de Pereira. *Avances, Investigación en Ingeniería*, 9, 72-79.

Montaña, D. (2013). *Características de compresibilidad y resistencia de arcillas típicas del depósito lacustre de Bogotá* (tesis de maestría). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Nakase, T. y Boekhout, T. (1988). Emendation of the genus *Bensingtonia* Ingold. *Journal of General and Applied Microbiology Tokyo*, 34(5), 433-437.

Skempton, A. W. (1986). Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation. *Geotechnique*, 36(3), 425-447.

Terzaghi, K. y Peck, R. B. (1967) *Soil mechanics in engineering practice* (2.^a ed.). Nueva York: John Wiley & Sons.