

# Correlaciones de ensayos de campo SDMT, CPT y laboratorio para caracterización de arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá

Correlations between SDMT and CPT field tests and laboratory tests to characterize clays in the area between calle 127 and La Caro in Bogotá

ÍNGRID PAOLA GARCÍA

Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia.

ingrid.garcia@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 10/01/2018 Aceptado: 31/01/2018

Disponible en [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista)

## Resumen

El presente artículo tiene como objetivo dar a conocer la caracterización de las arcillas que se encuentran comprendidas entre la calle 127 y La Caro, en la ciudad de Bogotá. Para lo anterior, se tomaron en cuenta ensayos básicos de laboratorio (humedad del suelo, límites de Atterberg, compresión inconfineda y consolidación) y ensayos de campo (CPT y SDMT), con los cuales se evaluaron para el parámetro de resistencia no drenada ( $S_u$ ) las correlaciones planteadas por Skempton, Jamiolkowski, Mesri y Itansbo, y para el parámetro de OCR se emplearon las correlaciones planteadas por Stas y Kulhawy, Mayne y Mitchell. Con la respectiva evaluación de las expresiones planteadas por los autores mencionados, se hizo una comparación con los resultados de campo ( $S_u$ , OCR), para posteriormente definir las ecuaciones de correlación características para el suelo en estudio. Con estas ecuaciones de correlación anteriormente mencionadas, se puede obtener una aproximación a los resultados de  $S_u$  y OCR, a partir de los ensayos de laboratorio y campo.

**Palabras claves:** arcillas, caracterización, consolidación, correlación.

## Abstract

This article is aimed at sharing the characterization of clays found between calle 127 and La Caro, in the city of Bogotá. To achieve this, basic laboratory tests were accounted for (soil humidity, Atterberg limits, unconfined compression, and consolidation) as well as field tests (CPT and SDMT). Correlations were assessed for undrained shear strength ( $S_u$ ), using the ones proposed by Skempton, Jamiolkowski, Mesri, and Itansbo, and for OCR, using the ones from Stas and Kulhawy, Mayne, and Mitchell. The results of the expressions suggested by the aforementioned authors prompted a comparison with the field results ( $S_u$ , OCR), thus defining the correlation equations for soil under study. These correlation equations can provide an approximation to the  $S_u$  and OCR results, based on laboratory and field tests.

**Keywords:** clays; characterization; consolidation; correlation

## INTRODUCCIÓN

Los suelos del sector en estudio de la ciudad de Bogotá se caracterizan por ser arcillas blandas de alta compresibilidad y baja resistencia, las cuales deben analizarse muy bien ante cualquier toma de decisiones en términos de ingeniería, ya que estas arcillas tienen alta plasticidad, baja consistencia o resistencia al corte y gran espesor, motivo por el cual deben tratarse de la mejor manera para evitar que se presenten fallas en obras de construcción.

Estas arcillas presentan un reto de vital importancia para la cimentación de edificaciones livianas y pesadas, pues desde hace un par de décadas empezaron a evidenciarse hundimientos en los suelos de algunos sectores, lo que se atribuye tanto a las características geológicas del terreno como a la intervención humana.

En este trabajo de investigación se crean curvas de correlación que permitan producir una caracterización del comportamiento mecánico más acertada de las arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en Bogotá, y de este modo proporcionar herramientas para que en futuras investigaciones puedan usarse como base para el desarrollo de proyectos. Igualmente, se propone una base metodológica para buscar otras bases de correlación entre parámetros obtenidos de ensayos de campo y laboratorio y las propiedades mecánicas de arcillas blandas.

Dichas correlaciones se obtuvieron a partir de datos recolectados por Ingeniería y Georriesgos SAS

en investigaciones geotécnicas en la zona geográfica mencionada anteriormente.

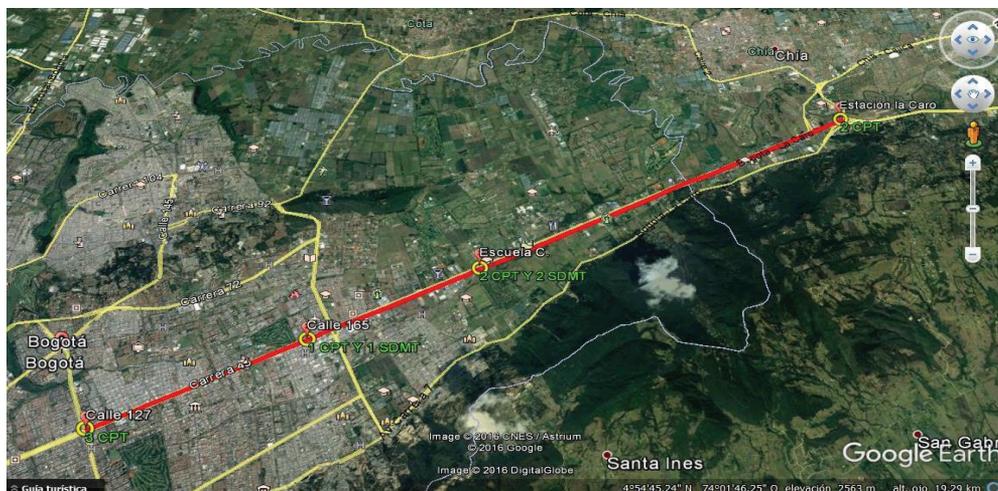
## LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio que se determinó para el desarrollo de este estudio fueron la calle 127, calle 165, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la autopista norte; con una recolección de laboratorios distribuidos de la siguiente manera:

- 8 ensayos de penetración de cono (CPT).
- 3 ensayos de dilatómetro sísmico (SDMT).
- 223 determinaciones de humedad.
- 115 límites de Atterberg.
- 61 compresiones inconfiadas.
- 3 consolidaciones unidimensionales.

Más adelante se muestra la localización de las zonas de estudio empleadas en esta investigación (figura 1).

Teniendo en cuenta el mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (figura 2), se pueden apreciar la delimitación precisa y la subdivisión de las zonas de piedemonte, así como la subdivisión de las unidades de planicie (lacustre, lacustre-aluvial y llanura de inundación). En la zona de estudio se puede observar que el perfil de suelo se encuentra compuesto por arcillas limosas muy blandas, con baja a media capacidad portante y muy compresible.



**Figura 1.** Localización general del área de estudio (figura tomada y adaptada de Google Earth, 2015).

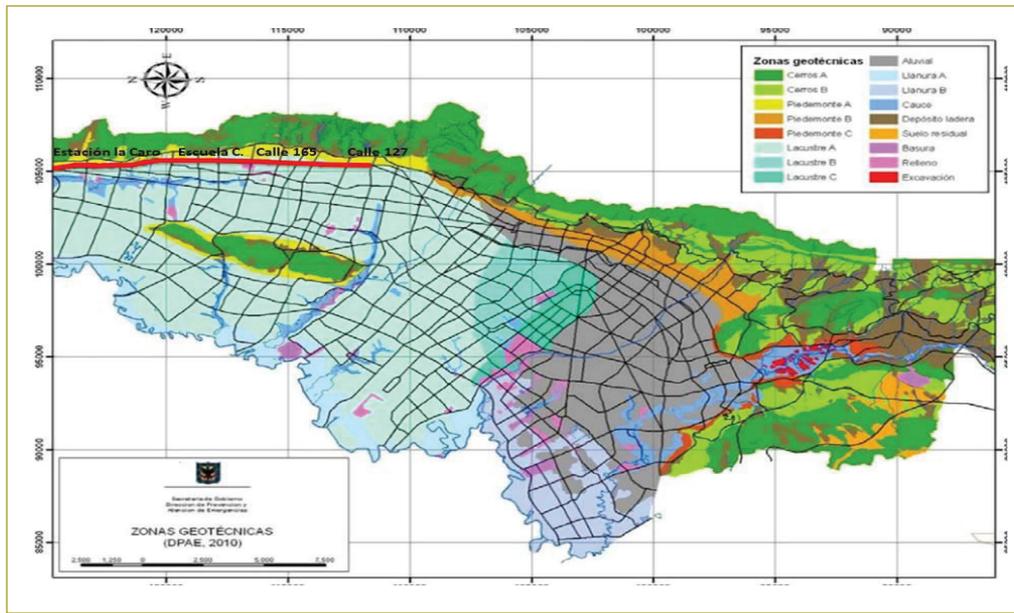


Figura 2. Mapa de zonificación geotécnica de Bogotá (tomada del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, 2010).

**RESULTADOS**

**Análisis de información**

Para cada uno de los puntos de estudio, luego de analizar e interpretar los resultados de laboratorio y de campo, se emplearon ecuaciones de correlación para estimar los valores de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) y relación de sobreconsolidación (OCR). Se evaluó y verificó la utilidad de cuatro correlaciones para  $S_u$  de

diferentes autores y tres para OCR, a partir de los datos ya obtenidos.

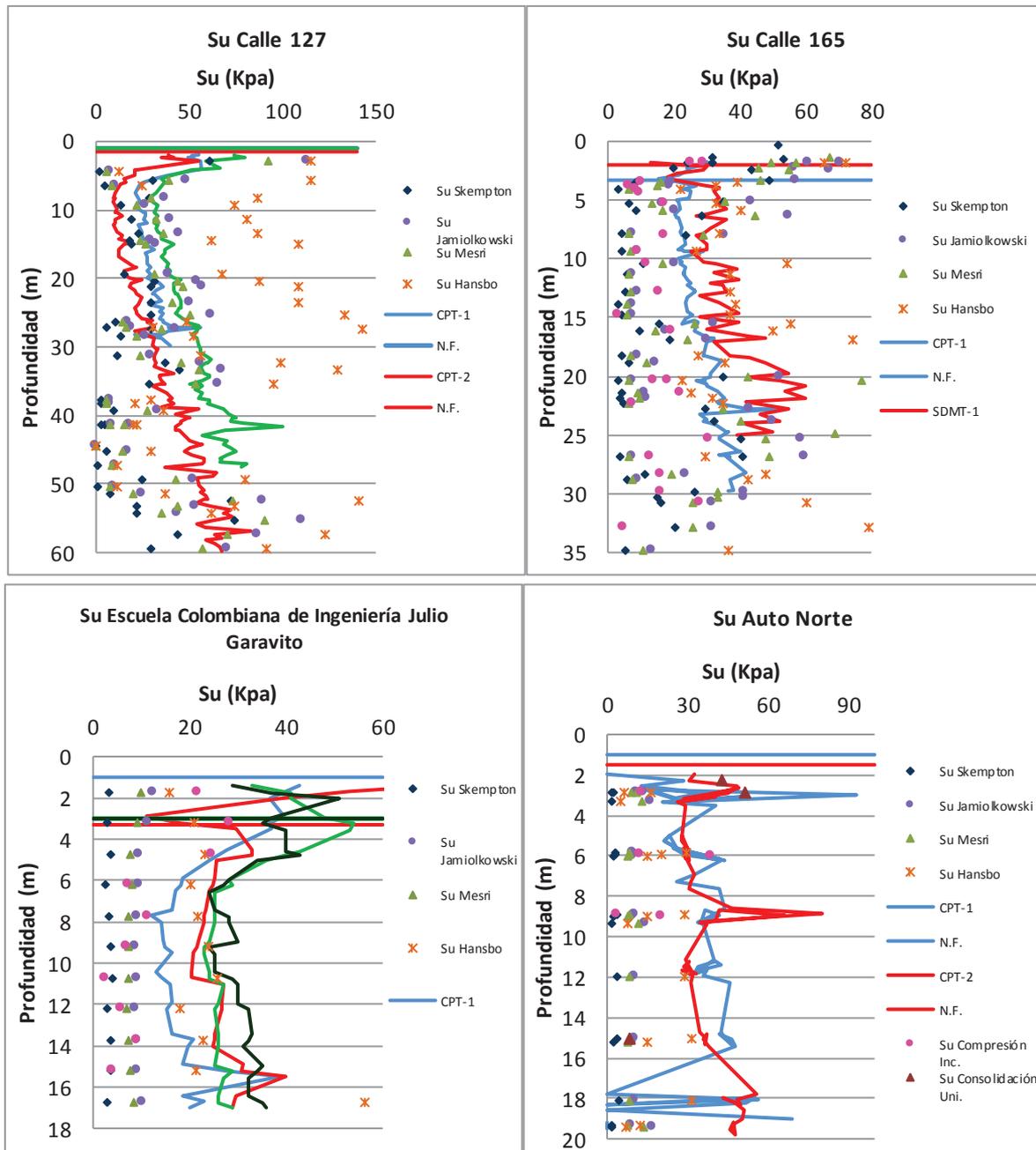
En la tabla siguiente se muestran las ecuaciones utilizadas para las correlaciones, para cada uno de los parámetros, según los ensayos de laboratorio (tabla 1).

En los ensayos de campo se tomaron profundidades iniciales, intermedias y finales, puesto que las profundidades en los ensayos de laboratorio no se encontraban puntuales, sino en rangos.

**Tabla 1**  
Correlaciones  $S_u$  (kPa) y OCR

| Ecuaciones para cálculo de $S_u$ (kPa)   |   | Ecuaciones para cálculo de OCR  |   |
|--|---|---|---|
| Según Wood (1983), determina el esfuerzo efectivo vertical.                      | $\sigma_v/Pa = 0,063 * 10^{2(1-U)}$       | Según Stas y Kulhawy (1984), determina la relación de sobreconsolidación.   | $OCR = (Pa/\sigma_{vo}) 10^{(1,11 - 1,62 U)}$             |
| Según Skempton (1957), determina la resistencia al corte no drenado.             | $s_u(VST)/\sigma_{vo} = 0,11 * 0,0037 PI$ | Según Mayne y Mitchell (1984), determina la relación de sobreconsolidación. | $OCR = \sigma_{VST} (s_u/\sigma_{vo})VST$                 |
| Según Stas y Kulhawy (1984), determina el esfuerzo efectivo de preconsolidación. | $\sigma_p/Pa = 10^{(1,11 - 1,62 U)}$      | Según Mayne y Kulhawy (1988), determina el índice de esfuerzo en reposo.    | $KO = 0,5 OCR^{0,5}$                                      |
| Según Jamiolkowski (1985), determina la resistencia al corte no drenado.         | $s_u/\sigma_p = 0,23 \pm 0,04$            | Según Mayne y Mitchell (1984), determina la relación de sobreconsolidación. | $K_o = 0,5[(p_u/\sigma_{vo})^{0,5} 10^{(0,56 - 0,81 U)}]$ |
| Según Mesri (1989), determina la resistencia al corte no drenado.                | $s_u/\sigma_p = 0,22$                     |   |   |
| Según Hansbo (1957), determina la resistencia al corte no drenado.               | $\sigma_p = \sigma_{VST} s_u(VST)$        |   |   |

Fuente: Elaboración propia, con base en F.H. & P.W., 1990.



**Figura 3.** Variación del  $S_u$  (kPa) a diferentes profundidades (elaboración propia, con base en Ingeniería y Georriesgos SAS).

En la figura anterior (figura 3) se muestran los datos recopilados de los ensayos de laboratorio y los ensayos de campo de la zona de estudio, en los que se emplearon cuatro correlaciones para  $S_u$  de diferentes autores a partir de los ensayos de laboratorio. Las ecuaciones de los autores que más se acercan a los datos de los ensayos de campo son las de Skempton, Mesri y Jamiolkowski en la calle 127 y la calle 165, y la de Hansbo en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y autopista Norte.

Así mismo, se pueden observar los datos recopilados de los ensayos de laboratorio y los ensayos de campo de la zona de estudio, en los que se usaron tres correlaciones para OCR de diferentes autores a partir de los ensayos de laboratorio. Las ecuaciones de los autores que más se acercan a los datos obtenidos de los ensayos de campo fueron las de Mayne y Mitchell, Mayne y Kulhawy (figura 4).

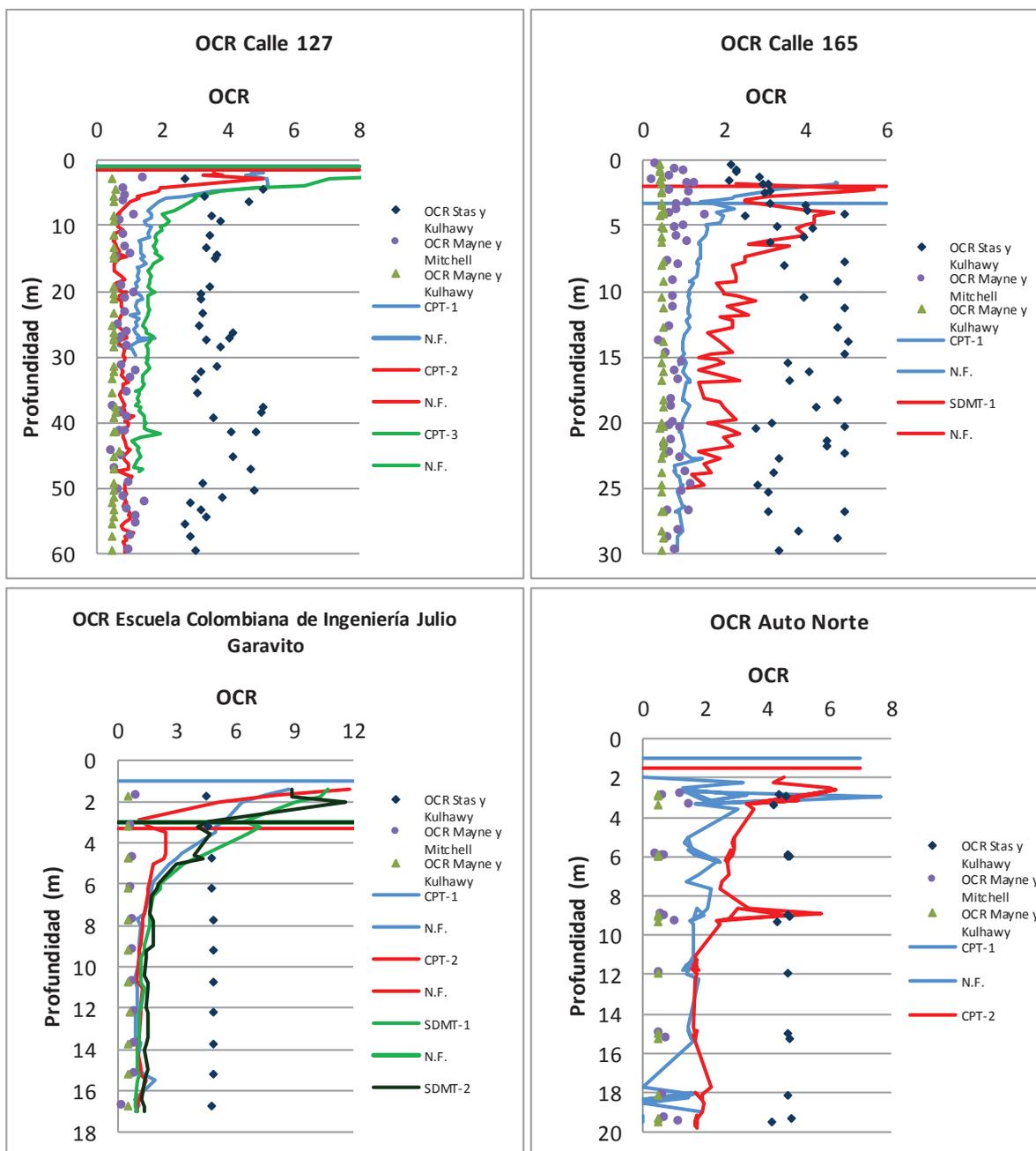


Figura 4. Variación del OCR a diferentes profundidades (elaboración propia, con base en Ingeniería y Georriesgos SAS).

### CORRELACIONES PROPIAS

De los datos recopilados de los cuatro puntos de estudio se hizo un análisis de los datos de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) y la relación de sobreconsolidación (OCR), apoyado en los datos obtenidos de los ensayos de campo ya mencionados. Lo anterior consiste en un análisis de regresión múltiple, que es una técnica ade-

cuada para investigar el efecto simultáneo sobre una variable dependiente llamada ( $X$ ) y una o más variables independientes llamadas ( $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ ) (Wonnacott & Wonnacott, 1972).

El modelo de regresión lineal tiene la forma de:

$$X = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \beta_2 Y_2 + E$$

Pero en este caso, como es una regresión múltiple y no se conoce la ecuación verdadera, debe ajustarse a una ecuación estimada de la siguiente forma:

$$X = b_0 + b_1 Y_1 + b_2 Y_2$$

Cuando se aplica el criterio de mínimos cuadrados para un buen ajuste en la regresión múltiple, se obtienen tres ecuaciones que hay que resolver; denominadas ecuaciones de estimación:

$$\sum y_1 x = b_1 \sum y_1^2 + b_2 \sum y_1 y_2$$

$$\sum y_2 x = b_1 \sum y_1 y_2 + b_2 \sum y_2^2$$

$$b_0 = \bar{X} - b_1 \bar{Y}_{.1} - b_2 \bar{Y}_{.2}$$

Donde se han usado las desviaciones convenientes:

$$y_1 = Y_1 - \bar{Y}_{.1}$$

$$y_2 = Y_2 - \bar{Y}_{.2}$$

$$x = X - \bar{X}$$

Para el desarrollo de esta técnica hay que tener en cuenta el coeficiente de determinación, que es una medida de bondad del ajuste del modelo y se representa con  $R^2$ , proporción de la suma de cuadrados total en  $X$ , explicada mediante el ajuste de la regresión, y la proporción o porcentaje de varianza total en  $X$  respecto a su media. Según Wonnacott & Wonnacott (1972), sus límites son los siguientes:

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

$$R^2 = \frac{\text{Varianza explicada}}{\text{Varianza total}}$$

Para las regresiones múltiples se debe considerar el  $R^2$  ajustado, cuya clasificación se puede ver a continuación (tabla 2).

**Tabla 2**  
Clasificación  $R^2$

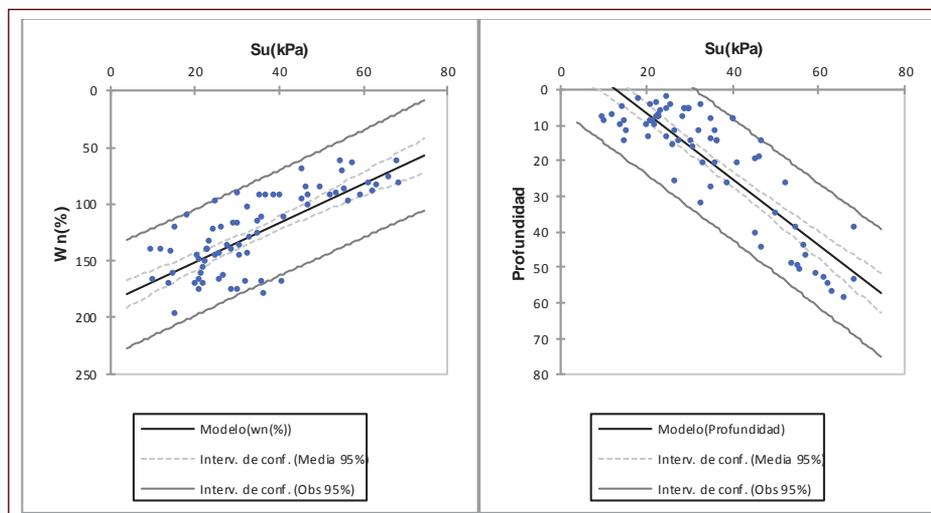
| Menor de 0,3 | 0,3 a 0,4 | 0,4 a 0,5 | 0,5 a 0,85 | Mayor de 0,85 |
|--------------|-----------|-----------|------------|---------------|
| Muy malo     | Malo      | Regular   | Bueno      | Sospechoso    |

Fuente: Tabla tomada de Palomo, 2011.

El nivel de confianza que se manejó para la regresión lineal múltiple fue del 95 %.

### Correlaciones para resistencia al corte no drenado ( $S_u$ )

Se desarrollaron correlaciones propias para el parámetro de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) a partir de los ensayos de laboratorio (humedades y límites de Atterberg) y los ensayos de campo (penetración de cono, denominado CPT, y dilatómetro sísmico, conocido como SDMT) en el área de estudio; teniendo en cuenta a su vez la profundidad. En la figura siguiente se ilustra un ejemplo de cómo se graficaron los datos para determinar una ecuación para cada uno de los parámetros evaluados, con una confiabilidad del 95 % (figura 5).



**Figura 5.** Correlación para  $S_u$  (elaboración propia, con base en Wonnacott & Wonnacott, 1972).

Para los parámetros evaluados en el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

| Ecuaciones para $S_u$ (kPa) a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 % |             |        |           |             |             |                                     |   |                               |
|---|-------------|--------|-----------|-------------|-------------|-------------------------------------|---|-------------------------------|
| Ensayo  | Parámetro   |        | Variables |             |             |                                     | Ecuación                                | Coefficiente de determinación |
| CPT   | $S_u$ (kPa) |        | Wn (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 40,65+0,59*P-0,143*Wn (%) | 0,79                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |   |                               |
|   | 9,7         | 68,64  | 64,4      | 198,5       | 2,4         | 59,3                                |   |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | LL (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 47,69+0,50*P-0,15*LL (%)  | 0,74                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |   |                               |
|   | 9,7         | 68,38  | 66,22     | 242,39      | 2,4         | 59,3                                |   |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | LP (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 51,72+0,53*P-0,45*LP (%)  | 0,78                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |   |                               |
|   | 9,81        | 78,56  | 16,5      | 121,97      | 3,2         | 54,25                               |   |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | IP (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 43,68+0,32*P-0,18*IP (%)  | 0,7                           |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |   |                               |
|   | 14,18       | 47,53  | 12,1      | 185         | 1,7         | 25,2                                |   |                               |
| $S_u$ (kPa)   |             | IL     |           | Profundidad |             | $S_u$ (kPa) = 57,92+0,44*P-37,72*IL | 0,77                                    |                               |
| Mínima  | Máxima      | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                     |   |                               |
| 9,7   | 78,55       | 0,3    | 1,03      | 3,33        | 57,3        |                                     |   |                               |

| Ecuaciones para $S_u$ (kPa) a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 % |             |        |           |             |             |                                     |  |                               |
|---|-------------|--------|-----------|-------------|-------------|-------------------------------------|--|-------------------------------|
| Ensayo  | Parámetro   |        | Variables |             |             |                                     | Ecuación                                   | Coefficiente de determinación |
| SDMT  | $S_u$ (kPa) |        | Wn (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 43,32+0,68*P-6,89E-02*Wn (%) | 0,73                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |  |                               |
|   | 29          | 55     | 103,3     | 314,46      | 4,05        | 23,75                               |  |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | LL (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 18,89+0,56*P+5,06E-02*LL (%) | 0,63                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |  |                               |
|   | 25          | 55     | 121,74    | 336,9       | 2,25        | 24,75                               |  |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | LP (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 14,86+0,20*P+0,28*LP (%)     | 0,68                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |  |                               |
|   | 23          | 50     | 33,3      | 98,61       | 2,4         | 24,75                               |  |                               |
|   | $S_u$ (kPa) |        | IP (%)    |             | Profundidad |                                     | $S_u$ (kPa) = 17,92+0,61*P+7,19E-02*IP (%) | 0,63                          |
|   | Mínima      | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                              |  |                               |
|   | 25          | 55     | 50,85     | 238,39      | 2,5         | 24,75                               |  |                               |
| $S_u$ (kPa)   |             | IL     |           | Profundidad |             | $S_u$ (kPa) = 49,41+0,65*P-28,19*IL | 0,85                                       |                               |
| Mínima  | Máxima      | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                     |  |                               |
| 23  | 55          | 0,35   | 1,03      | 6,2         | 24,75       |                                     |  |                               |

### Correlaciones para relación de sobreconsolidación (OCR)

Para este tipo de correlación se desarrollaron correlaciones propias para el parámetro de la relación de sobreconsolidación (OCR) para arcillas normalmente consolidadas (NC) entre 0-1 y para arcillas sebreconsolidadas (SC) entre 1-3, a partir de los ensayos de laboratorio (humedades y límites de Atterberg) y los

ensayos de campo (penetración de cono, CPT) y (dilatómetro sísmico, SDMT) en el área de estudio, teniendo en cuenta a su vez la profundidad. A continuación se muestra un ejemplo de cómo se graficaron los datos para determinar una ecuación para cada uno de los parámetros evaluados, con una confiabilidad del 95 % (figura 6).

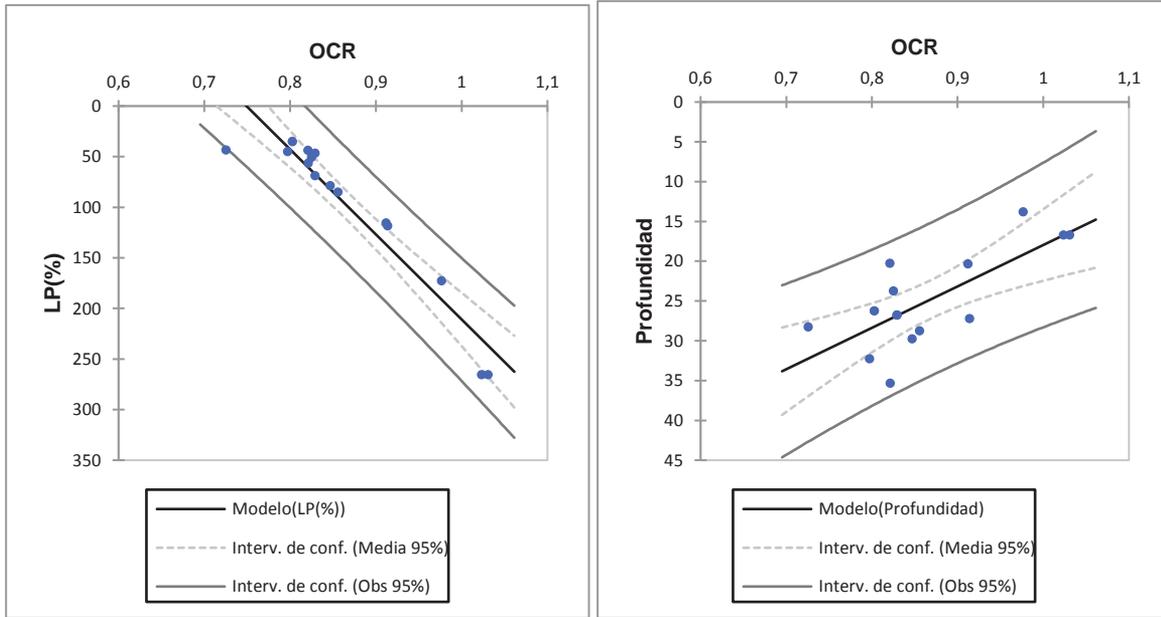


Figura 6. Correlación para OCR (elaboración propia, con base en Wonnacott & Wonnacott, 1972).

Para los parámetros evaluados en el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR), se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

| Ecuaciones para OCR (NC) entre 0-1, a partir de la humedad y los límites de Atterberg con una confiabilidad del 95 % |           |        |           |             |             |                                    |  |                               |
|--|-----------|--------|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| Ensayo   | Parámetro |        | Variables |             |             |                                    | Ecuación                                   | Coefficiente de determinación |
| CPT  | OCR (NC)  |        | Wn (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (NC) = 0,78+2,17E-06*P+7,12E-04*Wn (%) | 0,82                          |
|  | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|  | 0,8       | 1      | 71,4      | 333,46      | 10,7        | 59,3                               |  |                               |
|  | OCR (NC)  |        | LL (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (NC) = 0,14+7,25E-03*P+2,22E-03*LL (%) | 0,94                          |
|  | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|  | 0,55      | 1      | 134,05    | 336,9       | 11,3        | 27,2                               |  |                               |
|  | OCR (NC)  |        | LP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (NC) = 0,82-1,85E-03*P+9,65E-04*LP (%) | 0,9                           |
|  | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|  | 0,73      | 1      | 35,18     | 265,8       | 13,8        | 35,35                              |  |                               |
|  | OCR (NC)  |        | IP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (NC) = 0,58-2,12E-03*P+2,61E-03*IP (%) | 0,67                          |
| Mínima   | Máxima    | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                    |  |                               |
| 0,55   | 0,98      | 27,44  | 198,07    | 10,7        | 25,3        |                                    |  |                               |
| OCR (NC)   |           | IL     |           | Profundidad |             | OCR (NC) = 1,01+3,30E-03*P-0,32*IL | 0,76                                       |                               |
| Mínima   | Máxima    | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                    |  |                               |
| 0,66   | 1         | 0,35   | 1,03      | 8,25        | 55,3        |                                    |  |                               |

| Ecuaciones para OCR (SC) entre 1-3, a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 % |           |        |           |             |             |                                    |  |                               |
|---|-----------|--------|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| Ensayo  | Parámetro |        | Variables |             |             |                                    | Ecuación                                   | Coefficiente de determinación |
| CPT   | OCR (SC)  |        | Wn (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 4,43-4,74E-02*P-1,66E-02*Wn (%) | 0,72                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1         | 2,85   | 92,54     | 182,64      | 5,95        | 18,75                              |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | LL (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 4,09-1,70E-02*P-1,31E-02*LL (%) | 0,61                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,08      | 2,86   | 94,6      | 206,48      | 4,05        | 23,3                               |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | LP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 2,16+1,77E-03*P-1,16E-02*LP (%) | 0,64                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,03      | 1,74   | 43,97     | 101,39      | 5           | 25,2                               |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | IP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 3,47-4,12E-02*P-1,27E-02*IP (%) | 0,74                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1         | 2,86   | 54,4      | 184,61      | 3,2         | 20,25                              |  |                               |
| OCR (SC)  |           | IL     |           | Profundidad |             | OCR (SC) = 0,35-2,62E-02*P+2,49*IL | 0,79                                       |                               |
| Mínima  | Máxima    | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                    |  |                               |
| 1,01  | 2,96      | 0,44   | 0,97      | 3,75        | 25,2        |                                    |  |                               |

| Ecuaciones para OCR (SC) entre 1-3, a partir de la humedad y los límites de Atterberg, con una confiabilidad del 95 % |           |        |           |             |             |                                    |  |                               |
|---|-----------|--------|-----------|-------------|-------------|------------------------------------|--|-------------------------------|
| Ensayo  | Parámetro |        | Variables |             |             |                                    | Ecuación                                   | Coefficiente de determinación |
| SDMT  | OCR (SC)  |        | Wn (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 2,77-8,69E-03*P-4,21E-03*Wn (%) | 0,72                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,1       | 2,4    | 88,1      | 314,46      | 6,2         | 22,8                               |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | LL (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 2,55+2,53E-03*P-4,53E-03*LL (%) | 0,67                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,4       | 2,3    | 91,19     | 309,74      | 1,8         | 22,2                               |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | LP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 2,4-5,28E-03*P-6,86E-03*LP (%)  | 0,69                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,1       | 2,4    | 35,79     | 172,95      | 1,8         | 24,8                               |  |                               |
|   | OCR (SC)  |        | IP (%)    |             | Profundidad |                                    | OCR (SC) = 2,62-7,06E-04*P-4,95E-03*IP (%) | 0,74                          |
|   | Mínima    | Máxima | Mínima    | Máxima      | Mínima      | Máxima                             |  |                               |
|   | 1,3       | 2,4    | 61,4      | 238,97      | 1,8         | 24,8                               |  |                               |
| OCR (SC)  |           | IL     |           | Profundidad |             | OCR (SC) = 2,89+5,01E-03*P-1,46*IL | 0,69                                       |                               |
| Mínima  | Máxima    | Mínima | Máxima    | Mínima      | Máxima      |                                    |  |                               |
| 1,1   | 2,5       | 0,35   | 1,03      | 1,8         | 22,2        |                                    |  |                               |

## CONCLUSIONES

Con base en lo anterior, se concluyó lo siguiente:

Se han planteado una serie de ecuaciones fundadas en los datos de ensayos de laboratorio y campo, con el objetivo de poder caracterizar las arcillas en el sector comprendido entre la calle 127 y La Caro, en la ciudad de Bogotá.

Como base del trabajo de otros autores, como Skempton, Jamiolkowski, Mesri y Hansbo, para el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), y autores como Mayne y Kulhawy, Stas y Kulhawy, y Mayne y Mitchell, para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) se encontró que el uso de estas correlaciones presenta una dispersión importante, con las ecuaciones de los ensayos de campo (penetración

de cono (CPT) y dilatómetro sísmico (SDMT)) para la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) como las más satisfactorias y las menos adecuadas para su empleo en las arcillas pertenecientes a la zona en estudio.

Entre los datos de la calle 127, la calle 165, la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y la autopista Norte, se presenta una buena relación entre sus datos de resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ) vs. la profundidad, y la relación de sobreconsolidación (OCR) vs. la profundidad.

De acuerdo con el análisis estadístico de regresión múltiple realizado para las arcillas en el sector de estudio, para las correlaciones planteadas se utilizaron los ensayos de campo y ensayos sencillos de laboratorio para obtener correlaciones para  $S_u$ , OCR para arcillas normalmente consolidadas ( $N_c$ ) entre 0-1 y OCR para arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3.

De las ecuaciones planteadas para el área de estudio, se puede concluir que:

- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la resistencia al corte no drenado ( $S_u$ ), a partir de los datos de los ensayos de campo de penetración de cono (CPT) y dilatómetro sísmico (SDMT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.
- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) en arcillas normalmente consolidadas ( $N_c$ ) entre 0-1 y arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3 a partir de los datos de los ensayos de campo de penetración de cono (CPT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.
- En el área de estudio se encontró que para el cálculo de la relación de sobreconsolidación (OCR) en arcillas sobreconsolidadas ( $S_c$ ) entre 1-3 a partir de los datos de los ensayos de campo de dilatómetro sísmico (SDMT), se pueden tener en cuenta la humedad natural y los límites de Atterberg en relación con la profundidad para ecuaciones, con una confiabilidad del 95 %.

Se recomienda una investigación más profunda en este tema para plantear correlaciones no únicamente entre los resultados del CPT y el SDMT, sino entre los valores crudos de los datos de cada ensayo con  $S_u$  y OCR. Éstas no fueron posibles, ya que no existía un número significativo de ensayos de compresión confinada y consolidación unidimensional que permitieran esta actividad. Por ejemplo, un cálculo detallado de ciertas constantes dentro de cada ensayo para sus ecuaciones básicas puede ser un tema que hay que investigar durante futuras revisiones de este asunto.

## REFERENCIAS

- Keyhole Inc. (mayo de 2015). Google Earth. Holanda.
- Bañón Blázquez, L., & Beví García, J. (2000). *Manual de carreteras*, Vol. 2. Enrique Ortiz e Hijos.
- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones* (7.a ed.). México: Cengage Learning.
- Devincenzi, M., & Frank, N. (2004). *Ensayos geotécnicos in situ*. Ingeotest.
- F. H., K., & P.W., M. (1990). *Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*. Ithaca, Nueva York: Cornell University.
- Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmorresistente de edificaciones*. Bogotá: Fopae.
- Fenton, G. (1997). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. ASCE Geotechnical Safety and Reliability Committee.
- H., H., M.E., V., & P., C. (2007). Estimación de intervalos de confianza, pp. 3-30.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 1495. En *Normas Técnicas Colombianas*. Bogotá: Icontec.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2013). NTC 1522. Bogotá: Icontec.
- Invías (2013). I.N.V.E-126. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-125. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-127. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-151. Bogotá: Invías.
- Invías (2013). I.N.V.E-152. Bogotá: Invías.
- Lambe, W. (2004). *Mécanica de suelos*. México: Limusa.
- Marchetti, D., Marchetti, S., & Villalobos, F. (2013). El dilatómetro sísmico (SDMT) para ensayos de suelos *in situ*. *Obras y Proyectos* 13, pp. 20-29.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration tests: a unified approach. *Can. Geotech. J.* Vol. 46, pp. 1337-1355.
- Palomo, J. (2011). *Regresión lineal múltiple*. España: UPM.
- Villalobos, F., Marchetti, S., & Marchetti, D. (2013). El dilatómetro sísmico (SDMT) para ensayos en suelos *in situ*. *Obras y Proyectos* 13, pp. 20-29.
- Mayne, P. (2007). *NCHRP Synthesis 368 Cone Penetration Testing*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Wonnacott, T., & Wonnacott, R. (1972). *Introductory statistics for business and economics*. Nueva York: John Wiley & Sons.