

**DETERMINAR LA CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN  
LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO DE MUESTRAS INALTERADAS A  
PARTIR DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN MUESTRAS REMODELADAS  
Y VALORES N DE SPT**

**JOSÉ MAURICIO PÁEZ MACAREO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA**

**2018**

**DETERMINAR LA CORRELACIÓN DE LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN  
LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO DE MUESTRAS INALTERADAS A  
PARTIR DE ENSAYOS DE CORTE DIRECTO EN MUESTRAS REMODELADAS  
Y VALORES N DE SPT**

**JOSÉ MAURICIO PÁEZ MACAREO**

**Trabajo de grado para optar el título de Magíster en Geotecnia**

**Director:  
JOSÉ ALBERTO RONDÓN  
Magíster en Geotecnia**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN GEOTECNIA  
BUCARAMANGA**

**2018**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	19
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	20
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	21
2.1 ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN (SPT).....	21
2.1.1 Ensayo Normal de Penetración (SPT) y muestreo de suelo con tubo partido .....	21
2.1.2 Normalización del valor N de SPT .....	24
2.1.3 Correlaciones para ángulo de fricción en función de N de SPT .....	31
2.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO .....	32
2.2.1 Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD).....	32
2.2.2 Resistencia al Cortante .....	36
2.2.3 Ángulo de Fricción .....	41
2.2.4 Cohesión.....	42
2.3 SISTEMA DE UNIDADES Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS .....	43
3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA .....	44
3.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	44
3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	45
3.2.1 Flanco Occidental del Macizo de Santander.....	46
3.2.2 Flanco Oriental del Macizo de Santander .....	48
3.2.3 Área Central del Macizo de Santander .....	48
3.3 GEOMORFOLOGÍA.....	49
3.3.1 Vereda Casiano. ....	49

3.4 GEOLOGÍA REGIONAL.....	49
4. MÉTODO DE EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO.....	53
4.1 PROCEDIMIENTO DE LAS EXPLORACIONES .....	53
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO .....	58
4.2.1 Resultados de los ensayos de Granulometría, Límites y Humedad.....	58
4.2.2 Clasificación del suelo en estudio. ....	61
4.3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO .....	62
5. ANÁLISIS DE DATOS .....	63
5.1 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO .....	63
5.1.1 Cortes directos sobre muestras inalteradas.....	64
5.1.2 Cortes directos sobre muestras inalteradas.....	66
6. CALIBRACIÓN DEL CÁLCULO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DE N – SPT NORMALIZADO.....	68
6.1 CALCULO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DE N DE SPT CORREGIDOS POR ENERGÍA Y CONFINAMIENTO (N1)60 .....	68
6.2 CALIBRACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN OBTENIDO DE ENSAYOS SOBRE MUESTRAS REMOLDEADAS, EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD .....	74
7. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE CALCULO DEL PARÁMETRO DE CORTE COHESIÓN C, A PARTIR DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN. ....	79
8. CONCLUSIONES .....	82
9. RECOMENDACIONES.....	85
BIBLIOGRAFÍA.....	86

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de realización del ensayo SPT .....	22
Figura 2. Tomamuestras de tubo partido .....	23
Figura 3. Tipos de martillos.....	23
Figura 4. Resistencia a la penetración normalizada al 60% de la energía N60, función de la resistencia a la penetración N y la energía de la barra de perforación en % E <sub>Ri</sub> .....	24
Figura 5. Skempton 1986.....	25
Figura 6. Robertson and Wride .....	25
Figura 7. Recommended corrections for Standard Penetration Test(SPT) blow-count values, taken from Robertson and Wride (1997), as modified from Skempton (1986). .....	26
Figura 8. Resistencia a la penetración normalizada al 60% de la energía y corregida por confinamiento (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub> , función de la Resistencia a la penetración normalizada al 60% N <sub>60</sub> y el factor de corrección por confinamiento CN. ....	27
Figura 9. Factor de corrección por confinamiento, CN para varios autores. ....	28
Figura 10. Factor de corrección por confinamiento, CN según autores presentados en la X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, 1999Á. González. ....	29
Figura 11. Factor de eficiencia $e_1$ , función del mecanismo de liberación del martillo .....	30
Figura 12. Factor de eficiencia $e_2$ , en función del peso del yunque.....	30
Figura 13. Caja de corte directo.....	34
Figura 14. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb..	38
Figura 15. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb.....	38

Figura 16.El ángulo de reposo coincide con el ángulo de fricción en una arena seca .....	41
Figura 17. Unidades y cifras significativas recomendadas para el procesamiento de datos geotécnicos. ....	43
Figura 18. Ubicación de Sondeos y Apique .....	55
Figura 19. Comparación de los resultados estimados de ángulo de fricción en función de los valores de N1(60) de SPT con respecto a las metodologías de diferentes autores, con los obtenidos de los ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas y sus ajustes .....	71
Figura 20. Comparación de los resultados estimados de ángulo de fricción en función de los valores de N1(60) de SPT con respecto a las metodologías de diferentes autores, con los obtenidos de los ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas, y los calculados con la expresión Polinómica basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989 .....	73
Figura 21. Ángulos de fricción obtenidos sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función del cambio en su peso unitario .....	75
Figura 22. Pesos unitarios obtenidos sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función del ángulo de fricción.....	77
Figura 23. Esfuerzo normal $\sigma_n$ vs esfuerzo cortante $\sigma_T$ .....	80

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Localización del proyecto .....	44
Ilustración 2. Mapa estructural de Colombia. Falla Santa Marta-Bucaramanga ....	45
Ilustración 3. Distribución de fallas y de las fallas supuestas en la vecindad de la Falla de Bucaramanga. Macizo de Santander. Cordillera Oriental. ....	47
Ilustración 4. Mapa geológico del sitio en estudio.....	50
Ilustración 5. Geología del sitio en estudio .....	52
Ilustración 6. Perfil estratigráfico .....	62

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	<b>Pág.</b>
Fotografía 1. Área de estudio.....	54
Fotografía 2. Ensayos de SPT .....	56
Fotografía 3. Apique o calicata .....	57
Fotografía 4. Equipo de corte directo utilizado.....	63
Fotografía 5. Extracción de cubos de muestras inalteradas .....	64
Fotografía 7. Muestras y resultados de laboratorio.....	65
Fotografía 8. Muestreador de tubo partido.....	66
Fotografía 9. Reconstitución de muestras para corte directo.....	67

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Factor de eficiencia $e_3$ , en función de $m$ .....	31
Tabla 2. Expresiones utilizadas para calcular $\phi'$ a partir de SPT .....	31
Tabla 3. Valores de $N$ de SPT .....	56
Tabla 4. Resultados ensayos de caracterización .....	60
Tabla 5. Resumen de clasificaciones del suelo en estudio .....	61
Tabla 6. Número de sondeo y profundidad de muestra inalterada para ensayo de corte .....	65
Tabla 7. Resultados ensayos de corte directo sobre muestras inalteradas .....	66
Tabla 8. Resultados ensayos de corte directo sobre muestras reconstituidas .....	67
Tabla 9. Expresiones transformadas para calcular $\phi'$ a partir de $N_1(60)$ .....	68
Tabla 10. Regresiones utilizadas para evaluar la tendencia de ajuste a los modelos de correlación .....	69
Tabla 11. Resultados de ángulo de fricción obtenidos de las regresiones comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error .....	70
Tabla 12. Expresión obtenida basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989, y los valores corregidos $(N_1)_{60}$ .....	72
Tabla 13. Resultados de ángulo de fricción obtenidos de la expresión Polinómica basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989, comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error .....	72
Tabla 14. Resultados de ángulo de fricción en función del cambio en el peso unitario del suelo en estudio .....	74
Tabla 15. Ecuaciones obtenidas para evaluar el ángulo de fricción sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función de su peso unitario .....	76

Tabla 16. Ecuaciones obtenidas para evaluar el peso unitario sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función de su ángulo de fricción.....	76
Tabla 17. Ángulos de fricción obtenidos en función del peso unitario (factor $\Delta\delta$ ) y el ángulo de fricción en muestras reconstituidas, comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error .....	78
Tabla 18. Resultados de esfuerzos normales y esfuerzos cortantes obtenidos del ensayo de corte directo sobre muestras inalteradas.....	79
Tabla 19. Ecuaciones obtenidas para evaluar envolvente inferior y envolvente superior .....	81

## **LISTA DE ANEXOS**

**(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)**

ANEXO A. Ensayos de Laboratorio

ANEXO B. Tabulación de Resultados

## GLOSARIO

**Ensayo de Corte Directo:** Prueba de laboratorio que utiliza el método directo de corte para determinar la resistencia al corte de los suelos, de acuerdo con los criterios de falla Mohr-coulomb, la cual se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo<sup>1</sup>.

**Envolvente de falla:** combinación crítica de esfuerzos alcanzados, Representados En la práctica normal de Ingeniería, por una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos en el cual  $T=c + \sigma \tan \phi$ <sup>2</sup>.

**Esfuerzo Normal Nominal:** Es la fuerza normal (vertical) aplicada, dividida por el área inicial de la caja de corte<sup>3</sup>.

**Esfuerzo Cortante Nominal:** Es la fuerza de corte aplicada, dividida por el área de la caja de corte<sup>4</sup>.

**Desplazamiento lateral relativo:** Relación, en porcentaje, entre el desplazamiento horizontal y el diámetro o dimensión lateral del espécimen en la dirección del corte<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma I.N.V. E-154. Bogotá. 2013. E 154-1.

<sup>2</sup> SUÁREZ Jaime. Deslizamientos, Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p. 82.

<sup>3</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-154-13. Ensayo de corte directo en condición consolidado drenada (CD). Bogotá D.C., 2013. p. E 154-2.

<sup>4</sup> *Ibíd.*

<sup>5</sup> *Ibíd.*

**Angulo de Fricción:** ( $\phi$ ) Angulo cuya tangente es la relación entre el valor máximo del esfuerzo cortante que resisten el deslizamiento entre dos cuerpos sólidos en reposo respecto uno del otro y el esfuerzo normal a través de la superficie de contacto<sup>6</sup>.

**Cohesión:** la parte de la resistencia al corte de un suelo indicado por el termino ( $c$ ) en la ecuación de coulomb ( $T=c + \sigma \tan \phi$ ), intercepto de la envolvente de falla con el eje que representa el esfuerzo normal, en la gráfica de esfuerzos criterio Mohr-coulomb<sup>7</sup>.

**Ensayo Normal de Penetración SPT:** Método de exploración de suelos que consiste en hincar un tomamuestra de tubo partido, mediante el golpeo en caída libre de un martillo sobre un yunque, donde el número de golpes ( $N$ ), es la resistencia que ejerce él toma muestra a ser incido en el suelo<sup>8</sup>.

**Correlación:** Estudia el grado de asociación o dependencia entre dos variables. Es decir analizar hasta qué punto es significativa la dependencia de una variable de la otra<sup>9</sup>.

**Coefficiente de correlación:** Prueba estadística paramétrica que se aplica para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón<sup>10</sup>.

---

<sup>6</sup>ASTM D 653-01. Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluid. 2003. p. 2.

<sup>7</sup> Ibid. p. 7.

<sup>8</sup>ASTM D 1586-11. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils.2011.

<sup>9</sup> GORGAS GARCÍA, Javier; CARDIEL LÓPEZ, Nicolás y ZAMORANO CALVO, Jaime. Estadística Básica para Estudiantes de Ciencias. Universidad Complutense de Madrid, 2011. p. 190.

<sup>10</sup> ORTIZ URIBE, Frida Gisela. Diccionario de Metodología de la Investigación Científica. México. Limusa. 2004. p. 120

**Regresión:** Representación de la función que se ajusta a la nube de puntos del diagrama de dispersión. Estimación de una variable a partir de otra<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup> *Ibíd.*, p. 185

## RESUMEN

**TÍTULO:** Determinar la correlación de los parámetros obtenidos en los ensayos de corte directo de muestras inalteradas a partir de ensayos de corte directo en muestras remodeladas y valores N de SPT\*

**AUTOR:** José Mauricio Páez Macareo\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Esfuerzo cortante, Esfuerzo normal, Ángulo de fricción, Cohesión, SPT.

### DESCRIPCIÓN:

Con el objetivo de establecer una correlación, que permita brindar herramientas útiles y prácticas para determinar parámetros de corte directo (ángulo de fricción( $\phi$ ) y cohesión (c)), para suelos limo arenosos, comunes en Floridablanca – Santander, sector sur oriental, se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras recuperadas de las exploraciones de campo, ejecutadas a través de ensayos estándar de penetración SPT y excavación subsuperficial realizadas con sistema de calicatas u apiques.

Para la recuperación de muestras se utilizó muestreador estándar de tubo partido y excavación normal, recuperando muestras alteradas de los estratos de suelo, complementario a esto se hizo recuperación de muestras en tubos Shelby y tallado de bloque de suelo en apique para la extracción de muestras inalteradas.

Se recopilaron los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio al igual que los valores de resistencia a la penetración (número N de SPT), resultados de ensayos de caracterización y las metodologías de correlación postuladas en investigaciones de otros autores, estableciendo una correlación para ángulo de fricción( $\phi$ ) que ajusta la metodología de Peck, Hanson&Thornburn (1974), modificado por Wolff (1989) , para suelos limo arenosos, con valores de (N1)60, una correlación para ángulo de fricción( $\phi$ ) en función de parámetros de corte sobre muestras reconstituidas y valores de (N1)60 y una correlación para cohesión (c) en función a la tendencia de los resultados de laboratorio y los rangos de variación que establecen las envolventes de función.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela De Ingeniería Civil. Maestría en Geotecnia. Director: Msc. Jose Alberto Rondón

## ABSTRACT

**TITLE:** To determine the correlation of the parameters obtained in tests of direct cutting of undisturbed samples from direct cutting trialson remodeled samples and SPT N-values \*

**AUTHOR:** José Mauricio Páez Macareo\*\*

**KEYWORDS:** Shear Strength, Normal Stress, Friction Angle, Cohesion, SPT.

### DESCRIPTION

In order to establish a correlation that allows to provide useful and practical tools to determine direct cutting parameters (angle of friction ( $\phi$ ) and cohesion ( $c$ )) for loamy soils common in Floridablanca – Santander, south eastern sector; direct cut tests were performed on samples recovered from field explorations, executed through Standard Penetration Tests (SPT), and subsurface excavation made with pit system or apiques.

For the recovery of samples, a standard split tube sampler and regular excavation were used; recovering altered samples of the soil strata. In addition to the above, samples were recovered in Shelby tubes and, carved recovery of block of soil in apique was made for the extraction of undisturbed samples.

The results obtained from the laboratory tests were collected as well as: the SPT N-values, results of characterization tests and correlation methodologies postulated in other authors' research; establishing a correlation for angle of friction ( $\phi$ ) that fits the methodology of Peck, Hanson & Thornburn (1974), modified by Wolff (1989), for loamy soils with values of (N1)60, correlation for angle of friction ( $\phi$ ) depending on cutting parameters on reconstituted samples and values of (N1) 60, and a correlation for cohesion ( $c$ ) according to the tendency of the laboratory results and the ranges of variation that are established by the function envelopes.

---

\*Project of grade

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School Of Civil Engineering. MSc in Geotechnics. Director: MSc José Alberto Rondon

## INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo se han implementado ensayos de exploración del subsuelo, siendo el ensayo de SPT uno de los más utilizados en el ámbito geotécnico, lo cual se debe en gran parte a la posibilidad de recuperar muestras y al número de golpes o N de SPT obtenidos del ensayo, que permite generar una percepción rápida del estado del suelo.

Complementario a esto se han desarrollado ensayos de caracterización para determinar las propiedades mecánicas utilizando muestras alteradas e inalteradas, siendo aceptadas las propiedades obtenidas de ensayos inalterados, el problema surge cuando no podemos recuperar muestras inalteradas y es necesario utilizar muestras alteradas obtenidas del ensayo SPT, ya que en estos casos se realizan los ensayos utilizando métodos de remodelo, los cuales afectan en cierto grado las propiedades mecánicas del material ensayado.

Teniendo en cuenta que la determinación de parámetros es un pilar básico para el buen desarrollo, análisis y diseño de un proyecto geotécnico, es de vital importancia contar con parámetros confiables y acordes a la realidad, Siendo los parámetros obtenidos del ensayo de corte directo, unos de los más importantes y debido a la dificultad en algunos casos de contar con muestra inalterada para realizar el ensayo, se busca establecer una correlación que sirva como herramienta para determinar parámetros más reales como los que se pueden obtener con muestras inalteradas a partir de parámetros de corte directo en muestras remodeladas y valores de N de SPT tomados en el mismo material.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer una correlación, que permita encontrar los parámetros de corte directo en muestras inalteradas a través de parámetros obtenidos de cortes directos en muestras remoldeadas y el valor N de SPT.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el tipo o los tipos de suelos existentes en el sitio planteado para la exploración.
- Realizar la caracterización de los materiales encontrados en los diferentes sondeos y apiques.
- Procesar los datos y realizar el análisis de los resultados para determinar la correlación entre ellos para obtener los parámetros de corte.

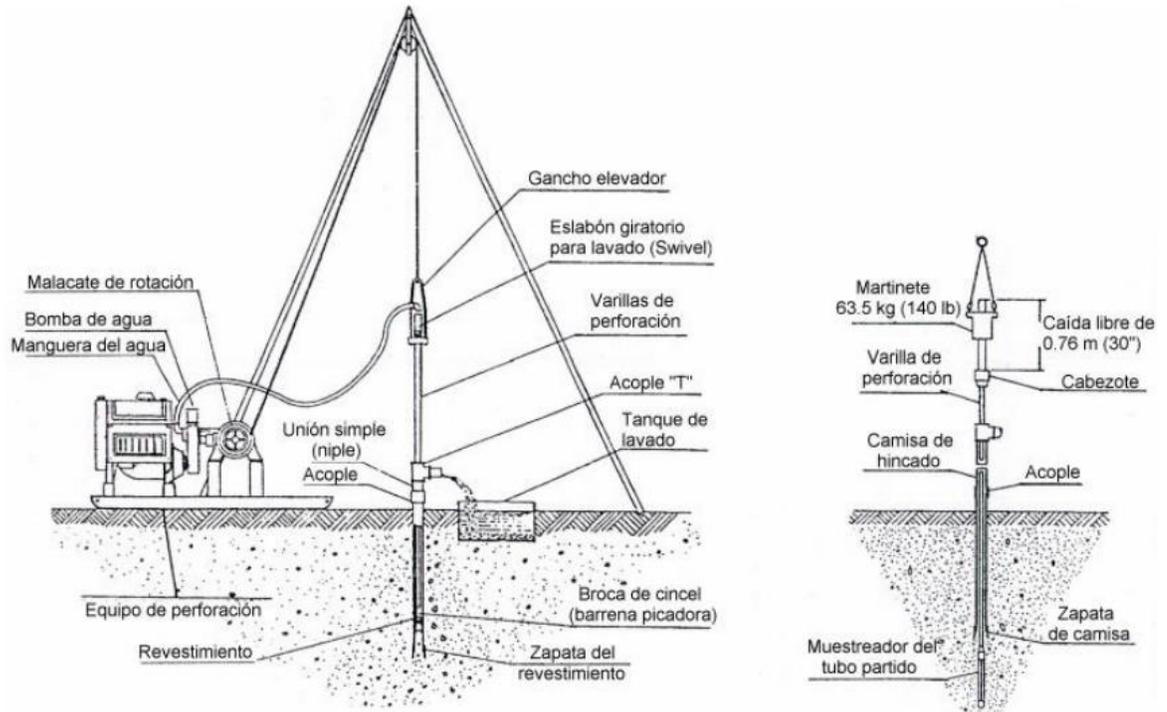
## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1 ENSAYO NORMAL DE PENETRACIÓN (SPT)

**2.1.1 Ensayo Normal de Penetración (SPT) y muestreo de suelo con tubo partido.** El ensayo normal de penetración SPT, consiste en hincar un tomamuestra o muestreador, en un estrato de suelo, para lo cual se martilla con una pesa de 140 Lb, sobre un cabezote o yunque, la pesa deberá tener movimiento de caída libre desde una altura de 30”.

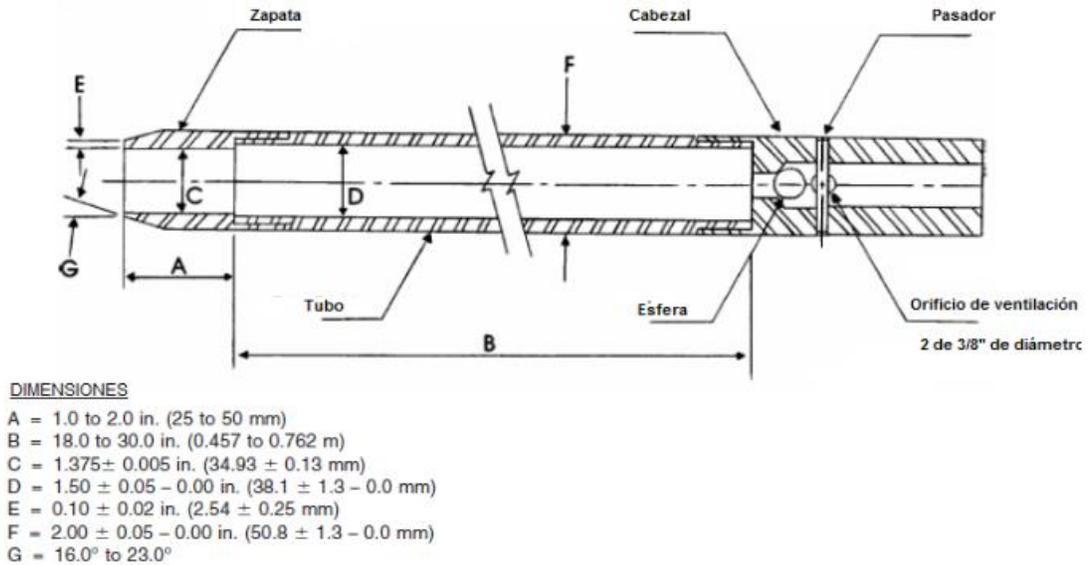
Se registran el número de golpes necesarios para hincar tramos de 6” hasta alcanzar 18”, el número N de SPT se define como la suma de los golpes necesaria para hincar los dos últimos tramos o 12” finales.

**Figura 1. Esquema de realización del ensayo SPT**



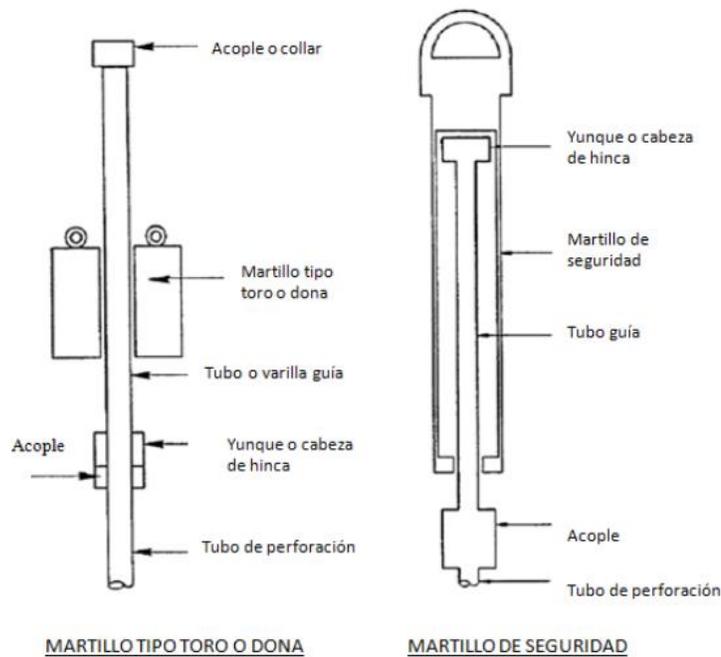
Fuente: DEVINCENZI, Marcelo; NORBERTO, Frank. Ensayos geotécnicos in situ su ejecución e interpretación, Igeotest, S.L. Figueras, Girona, 2004.

**Figura 2. Tomamuestras de tubo partido**



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-111-13. Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo con tubo partido. Bogotá D.C., 2013. p. E 111-6

**Figura 3. Tipos de martillos**



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-111-13. Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo con tubo partido. Bogotá D.C., 2013. p. E 111-8

**2.1.2 Normalización del valor N de SPT.** El ensayo de SPT, es realizado mediante un proceso mecánico, en el cual puede estar involucradas variables que originan pérdidas de energía en el momento de la percusión, al igual que los valores de N del ensayo estándar de penetración SPT estarán afectados por el estrato de suelo en el que se hinca, la profundidad y los esfuerzos geostáticos actuantes, para lo cual se recomienda la normalización del N, por energía y confinamiento

**Corrección por energía N60**

De acuerdo con la norma ASTM 6066, se tiene que el valor de resistencia a la penetración normalizado al 60% de la energía (N60), en función de N crudo del ensayo de SPT y la energía por tipo de equipo.

$$N_1 \cdot E_1 = N_2 \cdot E_2$$

$$N_1 = N_2 \cdot (E_2 / E_1)$$

$$N_{60} = N \cdot (E_2 / 60)$$

**Figura 4. Resistencia a la penetración normalizada al 60% de la energía N60, función de la resistencia a la penetración N y la energía de la barra de perforación en % ERi**

$$N_{60} = N_m \times (ER_i / 60) \tag{4}$$

where:

$N_m$  = measured N value, and

$ER_i$  = drill rod energy ratio, expressed as a percent, for the system used.

Fuente: Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential. ASTM D-6066

Skempton (1986), la eficiencia de la relación de energía, ER está sujeta a variaciones por, el tipo de partillo percutor, equipo y procedimiento, Skempton (1986), propone factores de eficiencia para la relación de energía ER.

### Figura 5. Skempton 1986

(Skempton, 1986).  $N_{60}$  is given as

$$N_{60} = \frac{E_m C_B C_S C_R N}{0.60}$$

Fuente: J. DAVID ROGERS. Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test, 2006 – The Geological society of America & Department of Geological Sciences & Engineering,

Donde:

$N_{60}$ , corrección de valor N por energía

$E_m$ , factor de energía por martillo

$C_B$ , factor según diámetro de la perforación

$C_S$ , factor por tipo de muestreador

$C_R$ , factor por longitud de tubería

N, número del ensayo estándar de penetración SPT

Robertson and Wride (1997), definió basado en la metodología de Skempton 1986, y factores de corrección modificados por Liao and Whitman (1986), el valor de N de SPT, corregido por energía y confinamiento como:

### Figura 6. Robertson and Wride

Robertson and Wride (1997)

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_R C_S$$

Fuente: J. DAVID ROGERS. Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test, 2006 – The Geological society of america & Department of Geological Sciences & Engineering

Donde:

(N1)60, corrección de valor N por energía y confinamiento

CN, Factor de corrección por confinamiento (con restricción de  $C_N < 2$ )

CE, Factor de corrección por energía de la barra.  $CE = ER/60\%$ , donde ER (relación de eficiencia) es la fracción o porcentaje de la energía del martillo de impacto SPT teórica realmente transmitida a la muestra, expresado como %<sup>12</sup>.

En la Figura 7, se definen los factores de corrección tomados de Robertson and Wride (1997), Modificado de Skempton (1986).

**Figura 7. Recommended corrections for Standard Penetration Test(SPT) blow-count values, taken from Robertson and Wride (1997), as modified from Skempton (1986).**

Factor	Equipment Variable	Term	Correction
Overburden pressure		$C_N$	$(P_a/\sigma'_{vo})^{0.5}$ but $C_N \leq 2$
Energy ratio	Donut hammer	$C_E$	0.5–1.0
	Safety hammer		0.7–1.2
	Automatic hammer		0.8–1.5
Borehole diameter	65–115 mm	$C_B$	1.0
	150 mm		1.05
	200 mm		1.15
Rod length	3–4 m	$C_R$	0.75
	4–6 m		0.85
	6–10 m		0.95
	10–30 m		1.0
	>30 m		<1.0
Sampling method	Standard sampler	$C_s$	1.0
	Sampler without liners		1.1–1.3

Fuente: J. DAVID ROGERS. Subsurface Exploration Using the Standard Penetration Test and the Cone Penetrometer Test, 2006 – The Geological society of America & Department of Geological Sciences & Engineering

<sup>12</sup> CETIN, K. O., *et al.* The Standard Penetration Test-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 12. 2004.

C<sub>N</sub> se define para un esfuerzo vertical de referencia de 1kg/cm<sup>2</sup>.

**Figura 8. Resistencia a la penetración normalizada al 60% de la energía y corregida por confinamiento (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>, función de la Resistencia a la penetración normalizada al 60% N<sub>60</sub> y el factor de corrección por confinamiento C<sub>N</sub>.**

$$(N_1)_{60} = C_N \times N_{60}$$

where:

C<sub>N</sub> = is the stress correction factor:

$$C_N = (\sigma'_{vref} / \sigma'_v)^n$$

where:

σ'<sub>vref</sub> = reference stress level,

σ'<sub>v</sub> = vertical effective stress at test depth, and

n = stress exponent

For σ'<sub>vref</sub> = 1 tsf (≈ kg<sub>f</sub>/cm<sup>2</sup><sub>1</sub> ≈ bar, ≈ atm)

$$C_N = (1/\sigma'_v)^n$$

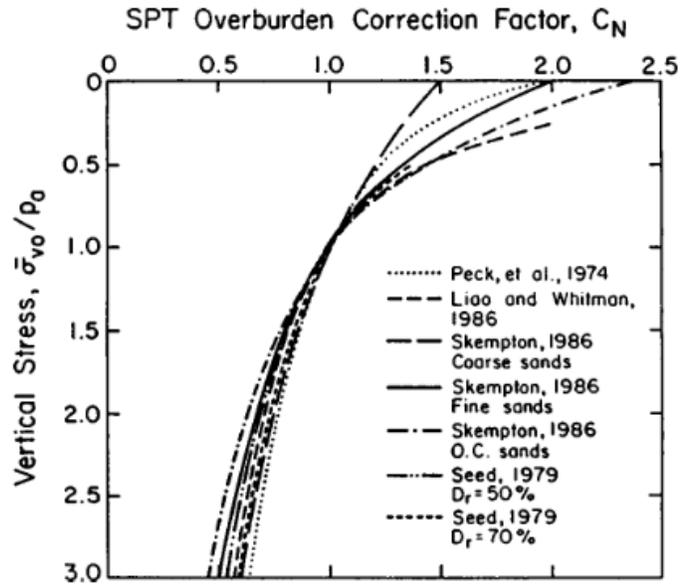
$$n = 0.5,$$

$$C_n = (1/\sigma'_v)^{-0.5} = \sqrt{(1/\sigma'_v)}$$

Fuente: Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential. ASTM D-6066

Existen otras propuestas de factores de corrección por confinamiento C<sub>n</sub>, se pueden observar en la Figura 9 y la Figura 10.

Figura 9. Factor de corrección por confinamiento,  $C_N$  para varios autores.



Fuente: Standard Practice for Determining the Normalized Penetration Resistance of Sands for Evaluation of Liquefaction Potential. ASTM D-6066

De acuerdo con la metodología desarrollada, por Á. González, “Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT,” en la X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, 1999. Se definen los coeficientes  $C_N$ .

**Figura 10. Factor de corrección por confinamiento, CN según autores presentados en la X Jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, 1999Á. González.**

Autor	Año	Ecuación
Terzaghi & Peck	1948	$C_N = \frac{\log(20/R_s)}{\log(20)}$
Meyerhof	1975	$C_N = \frac{1,7}{0,7 + R_s}$
Seed & Idriss	1983	$C_N = 1 - K \log(R_s)$
Schmertmann	1983	$C_N = \frac{32,5}{10,2 + 20,3R_s}$
Seed	1985	$C_N = 1 - 1,25 \log(R_s)$
Liao & Whitman	1986	$C_N = \sqrt{1/R_s}$
Skempton	1986	$C_N = \frac{2}{1 + R_s}$
González	1999	$C_N = \log(10/R_s)$

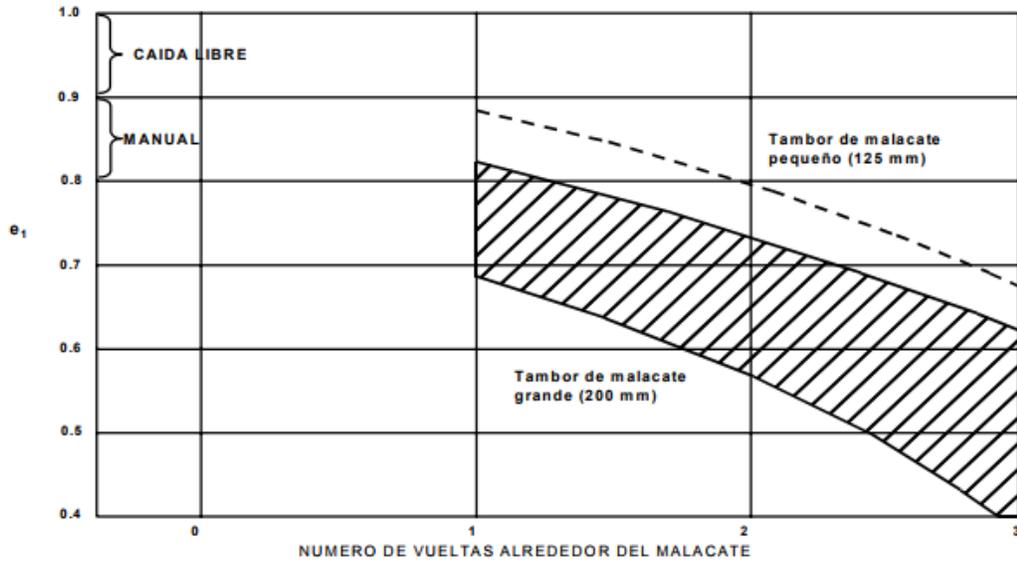
Fuente: modificado de J. E. CARMONA-ÁLVAREZ y J. C. RUGE-CÁRDENAS, Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos in situ, Tecno Lógicas, vol. 18, no. 35, p. 93-104, 2015.

Existen otras metodologías complementarias desarrolladas por otros autores para corregir Energía teórica de caída libre del martillo (  $E_t$  ), como función del peso del martillo  $W_m$  (63,5 kg; 140 lbf) y la altura de caída libre  $H$  (0,76m; 30”), y la ER relación de energía.

Bajo el principio claro de que la energía es afectada por diferencias en los equipos y procedimientos utilizados en la ejecución del ensayo SPT, por lo cual se detalla la metodología aplicada para la corrección en la Figura 11, Figura 12, y la Tabla 1. Teniendo como base la teoría de Skempton<sup>13</sup>.

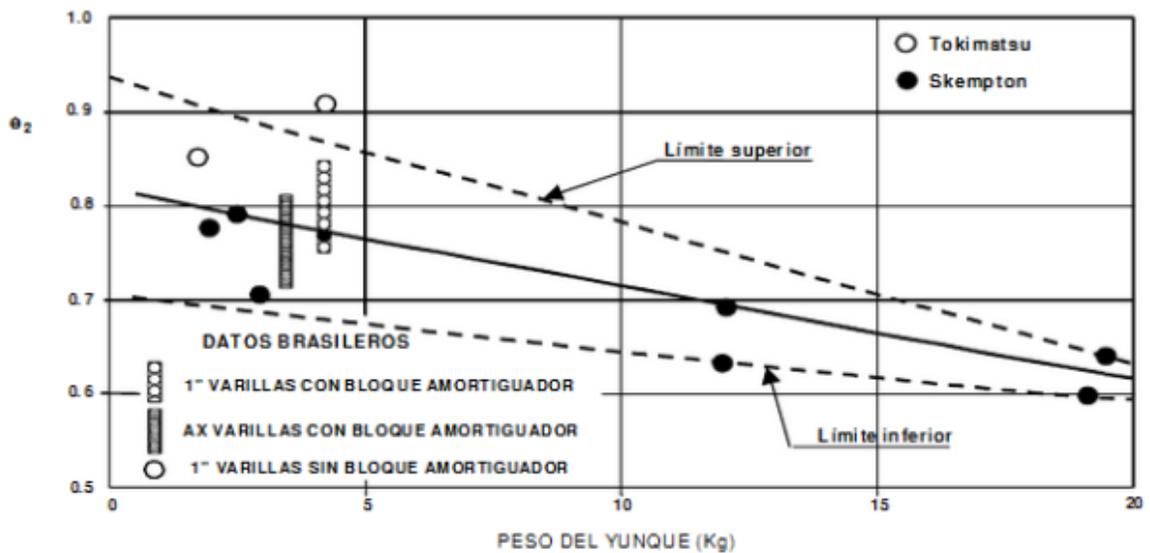
<sup>13</sup>SKEMPTON, A. W. Standar Penetration Test, Procedures and the Effect in Sand of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Agening and Over Consolidation. 1986. Geotechnique 36.

**Figura 11. Factor de eficiencia  $e_1$ , función del mecanismo de liberación del martillo**



Fuente: DÉCOURT, L., [y otros]. The standard penetration test: state of the art. Orlando, USA: ISOPT 1, 1988, p. 26.

**Figura 12. Factor de eficiencia  $e_2$ , en función del peso del yunque**



Fuente: DÉCOURT, L., [y otros]. The standard penetration test: state of the art. Orlando, USA: ISOPT 1, 1988, p. 27.

**Tabla 1. Factor de eficiencia  $e_3$ , en función de m**

m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
e3	0.33	0.55	0.7	0.8	0.85	0.9	0.9	1	1	1
Long. M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Fuente: DÉCOURT, L., [y otros]. The standard penetration test: state of the art. Orlando, USA: ISOPT 1, 1988.

**2.1.3 Correlaciones para ángulo de fricción en función de N de SPT.** Apartir de los valores corregidos de N de SPT, se puede correlacionar ángulos de fricción, a continuación se presentan las ecuaciones mas utilizadas (ver Tabla 2).

**Tabla 2. Expresiones utilizadas para calcular  $\phi'$  a partir de SPT**

ECUACIÓN	AUTOR
<b>PARA MATERIALES ARENOSOS</b>	
$\phi' = 27.1^\circ + 0.3 * N_{60} - 0.00054 * N_{60}^2$	Meyerhof & Peck (Tomada de HETIARACHCHI, H & BROWN, Timothy (2009))
$\phi' = 1.85^\circ \left( \frac{N_{172}}{0.01\sigma'_v + 0.7} \right)^{0.6} + 28 \sigma'_v (KPa)$	JNR "The building design standard" (Tomada de MAKOTO, Kamimura & THIEN K., Truong (2013))
$\phi' = 15^\circ + \sqrt{12 * N_{172}}$	Dunham (Tomada de MAKOTO, Kamimura & THIEN K., Truong (2013))
$\phi' = 15^\circ + \sqrt{15 * N_{172}}$	JRB Japan Road Bureau (Tomada de González (1999))
$\phi' = 27^\circ + 0.3 * N_{172}$	JNR- Japan National Railway (Tomada de González (1999))
$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{N_{60}}{32.5} \right)^{0.34}$	Schmertmann (Tomada de González (1999))
$\phi' = 15^\circ + \sqrt{20 * N_{172}}$	Kishida (Tomada de González (1999))
$\phi' = 26.25^\circ * \left( 2 - e^{-\frac{N_{145}}{62}} \right)$	Peck, Hanson y Thornburn (Tomada de González (1999))
$\phi' = 28.5^\circ + 0.25 * N_{145}$	Peck (Tomada de González (1999))

ECUACIÓN	AUTOR
$\varphi' = 28.5^\circ + (0.40(N1)_{60})$	Peck
$\varphi' = 20^\circ + \sqrt{15.4(N1)_{60}}$	Hatanaka & Uchida 1996
$\varphi' = 27.5^\circ + 9.2 \log[(N1)_{60}]$	Kulhawy and Chen 2007
$\varphi' = \text{Arc tan} \left[ \left( \frac{N_{60}}{12.2 + 20.3 \frac{\sigma_{vo}}{Pa}} \right)^{0.34} \right]$	Schmertmann 1975

Fuente: LEONI, Augusto J. Parametrización de Suelos. Facultad de Ingeniería U.N.L.P. p. 61

## 2.2 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

**2.2.1 Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD).** El procedimiento seguido para el ensayo de corte directo se basó en los lineamientos establecidos en la norma INV E – 154 – 13, y la norma ASTM D 3080/D3080-11.

### Generalidades del ensayo

La finalidad de los ensayos de corte, es determinar la resistencia de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que representen las que existen o existirán en un terreno producto de la aplicación de una carga.

En el ensayo de corte directo caben dos posibilidades de realización: El método de esfuerzo controlado y el método de deformación controlada. En el primero, la prueba se lleva acabo aplicando valores fijos de la fuerza tangencial al equipo, de modo que el esfuerzo aplicado tiene en todo momento un valor prefijado; en el segundo tipo, el equipo actúa con una velocidad de deformación constante la cual se mide con un micrómetro horizontal y la fuerza cortante resistente del suelo correspondiente a cualquier desplazamiento se mide en el equipo.

La ventaja de las pruebas por deformación unitaria controlada es que, en el caso de arena densa se observa y grafica la resistencia cortante pico (es decir, la falla) así como resistencias cortantes menores (es decir, un punto después de la falla llamado resistencia última). En las pruebas por esfuerzo controlado, sólo la resistencia cortante pico se observa y gráfica. Note que la resistencia cortante pico en las pruebas controladas por el esfuerzo sólo es aproximado, debido a que la falla ocurre a un nivel de esfuerzo situado entre el incremento de carga de prefalla y el incremento de carga de falla. No obstante, las pruebas de esfuerzo controlado probablemente simulan mejor las situaciones reales de campo que las pruebas controladas por deformación controlada<sup>14</sup>

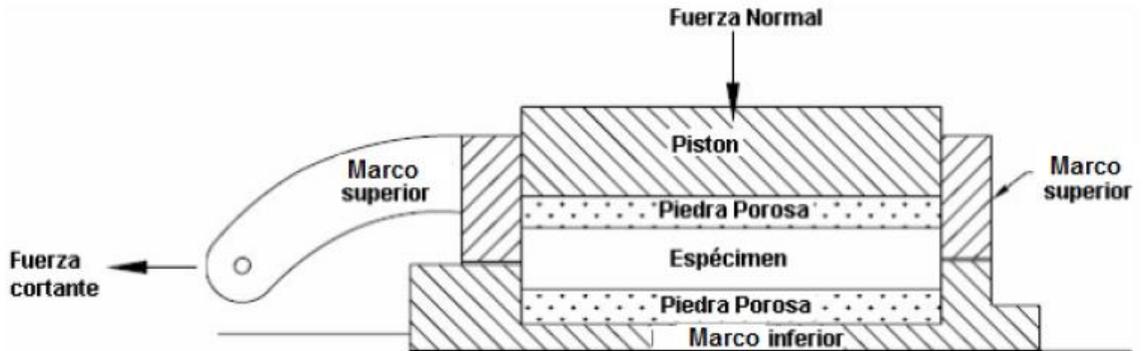
En general el ensayo consiste en colocar el espécimen del ensayo en un dispositivo de corte directo, aplicar luego un esfuerzo normal determinado, humedecer y/o drenar el espécimen del ensayo, consolidar el espécimen bajo el esfuerzo normal, desbloquear las mitades (marcos) de la caja de corte que contiene la muestra, y desplazar horizontalmente una mitad respecto de la otra a una velocidad constante de deformación mientras se miden la fuerza de corte y los desplazamientos normales y horizontales (Figura 13). La velocidad de corte debe ser lo suficientemente lenta para permitir la disipación prácticamente total del exceso de presión de poros.<sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> BRAJA, M Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica. International Thomson Editores, S.A. de C.V. una división de Thomson Learning, México D.F. 2012. p 213

<sup>15</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-154-13. Ensayo de corte directo en condición consolidado drenada (CD). Bogotá D.C., 2013. p. E 154-3

**Figura 13. Caja de corte directo**



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-154-13. Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD). Bogotá D.C., 2013. P. E 154-3

### **Preparación de las muestras inalteradas.**

Los especímenes se deben preparar a partir de muestras grandes inalteradas o de muestras obtenidas de acuerdo con la norma INV E-105 u otros procedimientos de muestreo inalterado con tubos. Los especímenes se deben manejar con cuidado para minimizar la alteración, los cambios en la sección transversal o la pérdida de humedad<sup>16</sup>.

### **Muestras fabricadas en el laboratorio.**

Los especímenes se pueden fabricar por reconstitución, o por compactación. Los especímenes reconstituidos se pueden moldear por amasado o impacto de capa, hasta que la masa acumulada del suelo colocada en la caja del corte queda compactada/reconstituida a un volumen conocido, o ajustando el número de capas, los golpes por cada capa y la energía por golpe. La parte superior de cada capa debe ser escarificada antes de la adición del material para la siguiente. Los límites entre capas compactadas se deben ubicar de manera que no coincidan con el plano

---

<sup>16</sup>Ibíd., p. E 154-8

de corte definido por las mitades de la caja de corte, a menos que este sea el objetivo establecido para un ensayo en particular<sup>17</sup>.

Los especímenes compactados se pueden preparar, mediante los equipos y procedimientos de compactación descritos en las normas INV E -141 e INV E-142, luego de lo cual se cortan y colocan en la caja de corte, como si se tratara de muestras inalteradas. El plano de cizalladura del espécimen de corte directo no deberá estar alineado con ninguno de los planos de compactación de la muestra<sup>18</sup>.

### **Procedimiento.**

El ensayo se realiza siguiendo los lineamientos establecidos en norma INV E – 154 - 13, y de acuerdo con esta se resume el procedimiento a seguir como se describe a continuación.

- Se ensambla la caja de corte con los marcos alineados y se bloquea para no permitir efectos de corte prematuros de la muestra.
- Se introduce la muestra de ensayo. Si la muestra es inalterada se colocan las piedras porosas húmedas sobre las superficies expuestas del espécimen en la caja de corte y se coloca ésta con el espécimen inalterado y la piedras porosas en la cubeta y se alinea la cubeta en el marco de carga.

Para el espécimen reconstituido se coloca y alinea el ensamble constituido por la caja de corte, la muestra, las piedras porosas y la cubeta en el marco de carga<sup>19</sup>.

- Se conecta el dispositivo de carga y se ajustan los deformímetros vertical y horizontal.
- Se toman las lecturas iniciales de los deformímetros.

---

<sup>17</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-154-13. Ensayo de corte directo en condición consolidado drenada (CD). Bogotá D.C., 2013. p. E 154-9, E 154-10

<sup>18</sup>Ibíd., p. E 154-11

<sup>19</sup>Ibíd., p. E 154-12

- Se colocan las pesas correspondientes al esfuerzo vertical que será aplicado y se permite la consolidación. Debido a la alta densidad de las muestras, estas no presentaron consolidación con la colocación de la carga.
- Se sueltan los marcos desbloqueándolos y separándolos, para permitir el corte de la muestra.
- Se programa el equipo de corte con la velocidad de aplicación de carga requerida y se aplica la fuerza de corte. Durante el corte, se registran los datos desplazamiento vertical, horizontal y carga.
- Terminado el ensayo, se remueve la muestra completa de la caja de corte y se seca en el horno para determinar la humedad final.

### 2.2.2 Resistencia al Cortante

#### Criterios de falla de Morh-Coulomb

Mohr (1900) presento una teoría sobre la ruptura de los materiales. Esta teoría afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal esfuerzo cortante, y no sólo por la presencia de un esfuerzo máximo normal o bien de un esfuerzo máximo cortante. Así entonces, la relación funcional entre un esfuerzo normal y un esfuerzo cortante sobre un plano de falla se expresa en la forma<sup>20</sup> (Figura 14 a):

$$\tau_f = f(\sigma)$$

Donde:

$\tau_f$  = esfuerzo cortante sobre el plano de falla

$\sigma$  = esfuerzo normal sobre el plano de falla

---

<sup>20</sup> BRAJA, Op. Cit. p. 207

La envolvente de falla definida por la anterior ecuación es una línea curva, como se muestra en la Figura 14b. Para la mayoría de los problemas de los problemas de mecánica de suelos, es suficiente aproximar el esfuerzo cortante sobre el plano de falla como una función lineal del esfuerzo normal (Coulomb, 1776). Esta relación se describe como<sup>21</sup>:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

$c$  = cohesión

$\phi$  = ángulo de fricción interna

La ecuación precedente se llama criterio de falla de Mohr-Coulomb.

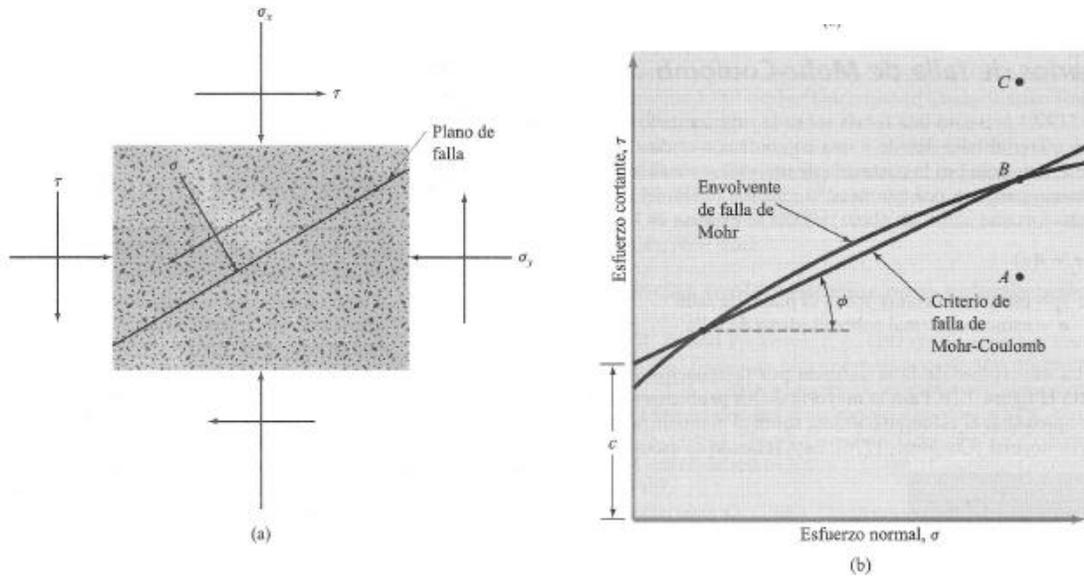
El significado de la envolvente de falla se explica como sigue: si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano en una masa de suelo son tales que son representados por el punto A en la Figura 14b, entonces no ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Si el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante sobre un plano son representados por el punto B (que se encuentra sobre la envolvente de falla), entonces ocurrirá una falla cortante a lo largo de ese plano. Un estado de esfuerzo sobre un plano representado por el punto C no existe porque éste quede por arriba de la envolvente de falla y la falla cortante ya habría ocurrido en el suelo<sup>22</sup>.

---

<sup>21</sup> *Ibíd.*, p. 207

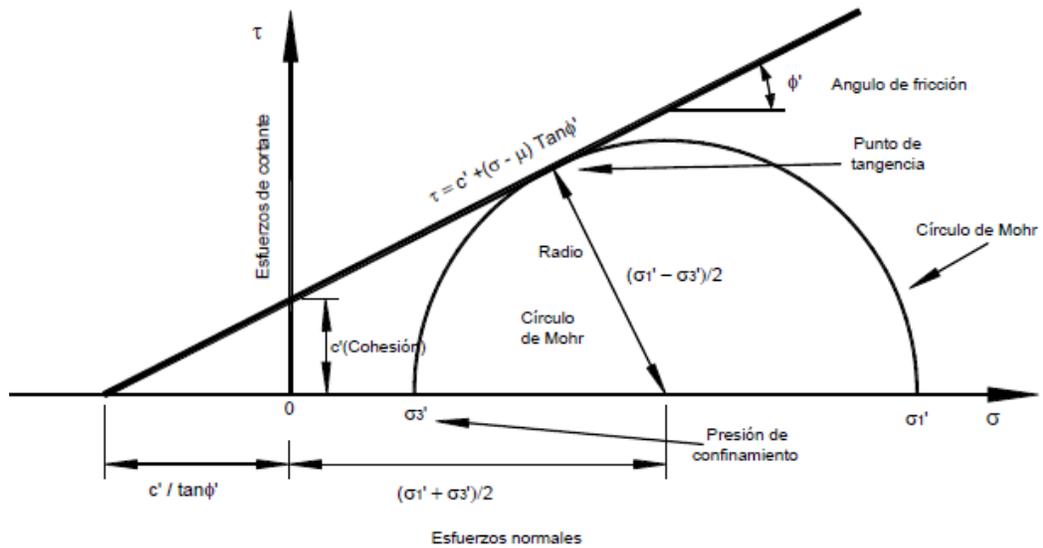
<sup>22</sup> *Ibíd.*, p. 209

**Figura 14. Envolvente de falla de Mohr y los criterios de falla de Mohr-Coulomb**



Fuente: BRAJA, M Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica. International Thomson Editores, S.A. de C.V. una división de Thomson Learning, México D.F. 2012.

**Figura 15. Representación gráfica de la ecuación de Coulomb**



Fuente: SUAREZ Jaime. Deslizamientos-Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p. 75

### **Ecuación de Coulomb para suelos saturados.**

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante, en un deslizamiento, se realiza utilizando las teorías de las resistencias de materiales.

Las rocas y los suelos al fallar al cortante, se comportan de acuerdo con las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación de Coulomb<sup>23</sup>:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'$$

Donde:

$\tau$  = *Esfuerzo de resistencia al corte*

$c'$  = *Cohesión o cementación efectiva*

$\sigma$  = *Esfuerzo normal total*

$\mu$  = *Presión de agua intersticial o de poros*

En la Figura 15 se muestra la representación gráfica de la ecuación de Coulomb. El análisis de la ecuación de Coulomb requiere conocer los parámetros de ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo que depende de las presiones internas o poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb, en el cual el factor  $\mu$  está restando al valor de la presión normal total.

A la presión resultante, se le conoce con el nombre de presión efectiva  $\sigma'$ .<sup>24</sup>

$$\sigma' \text{ (presión efectiva)} = \sigma - \mu$$

---

<sup>23</sup> SUÁREZ Jaime. Deslizamientos-Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p. 75

<sup>24</sup> *Ibíd.*, p. 76

Donde:

$\sigma'$  = ángulo de fricción para presiones efectivas

$c'$  = cohesión para presiones efectivas

### **Ecuación de Coulomb para suelos no saturados**

Cuando el grado de saturación es mayor del 85%, se puede utilizar la ecuación de Coulomb para suelos saturados. Sin embargo, para suelos con saturación menor al 85%, se deben aplicar los principios de la mecánica de suelos no saturados (Fredlund y Rahardjo, 1987).

Para el caso de suelos no saturados, la ecuación de Coulomb se expresa de la siguiente forma (Fredlund y Morgenstern 1977)<sup>25</sup>:

$$\tau = c' + (\sigma_n - \sigma_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b$$

Donde:

$\sigma_n$  = esfuerzo normal total

$u_a$  = presión en el aire de los poros

$u_w$  = presión en el agua de los poros, la cual comúnmente es negativa

$\phi^b$  = ángulo de fricción igual a la pendiente de la curva de succión matricial  $(u_a - u_w)$  contra resistencia la cortante  $\tau$  cuando  $(\sigma_n - u_a)$  se mantiene constante

El ángulo de fricción efectiva  $\phi'$  permanece igual para todos los valores de succión.

El valor de  $\phi^b$  es generalmente igual o menor que  $\phi'$  y se puede obtener en ensayos triaxiales o de corte directo no saturados (Huat y otros, 2005).

---

<sup>25</sup> SUÁREZ, Óp. Cit. p. 76

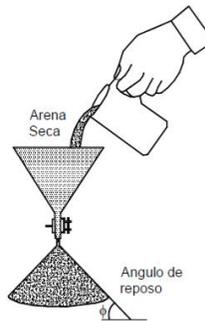
**2.2.3 Ángulo de Fricción.** El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \tan \phi$$

El ángulo de fricción en suelos granulares secos coincide con el ángulo de reposo  
Figura 16

Todos los suelos poseen fricción. Sin embargo, a los suelos arcillosos con fricción muy baja o despreciable, se les denomina suelos cohesivos<sup>26</sup> con  $\phi = 0$ .

**Figura 16. El ángulo de reposo coincide con el ángulo de fricción en una arena seca**



Fuente: SUÁREZ Jaime. Deslizamientos-Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. p. 77

El ángulo de fricción ( $\phi$ ) depende de una gran cantidad de factores; algunos de los más importantes son<sup>27</sup>:

---

<sup>26</sup> SUÁREZ Óp. Cit. p. 76

<sup>27</sup> Ibíd., p. 76

- Tipo de mineral constitutivo de las partículas.
- Tamaño de los granos o partículas. A mayor tamaño de las partículas, mayor es  $\phi$ .
- Forma de los granos o partículas. Para partículas angulosos  $\phi$  es mayor.
- Distribución de los tamaños de los granos o partículas. En los suelos bien gradados,  $\phi$  es mayor que el los suelos uniformes.
- Microestructura (organización de las partículas).
- Densidad.
- Permeabilidad (facilidad de drenaje)
- Presión normal o de confinamiento.
- Presión de preconsolidación.

**2.2.4 Cohesión.** La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas.

En los suelos particularmente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina friccionantes o “no cohesivos” ( $C=0$ ).

En los suelos no saturados, la tensión debida a la succión del agua en los poros, produce un fenómeno de adherencia entre partículas por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión “aparente” desaparece con la saturación<sup>28</sup>.

---

<sup>28</sup> SUÁREZ Óp. Cit. p. 77

## 2.3 SISTEMA DE UNIDADES Y CIFRAS SIGNIFICATIVAS

Para la geotecnia, se establece el sistema internacional de unidades SI, el cual define las unidades de las propiedades geotécnicas y sus cifras significativas así:

**Figura 17. Unidades y cifras significativas recomendadas para el procesamiento de datos geotécnicos.**

Geotechnical Property	Common Units		Expressed to Nearest Decimal or Significant Digits <sup>B</sup>
	SI	Inch-Pound	
<b>Index and Related Properties</b>			
Atterberg Limits			Nearest whole unit in %
Density, total/moist and dry	g/cm <sup>3</sup> , Mg/m <sup>3</sup> , kg/m <sup>3</sup>	slugs/ft <sup>3</sup> , lbm/ft <sup>3</sup> <sup>C</sup>	3 or 4 significant digits <sup>D</sup>
Effective particle diameter	mm	in.	2 or 3 significant digits
Percent passing (gradation)	%	%	Nearest 0.1
Percent/Relative Compaction	%	%	Nearest 0.1
Relative density	%	%	Nearest 0.1
Specific gravity			3 significant digits
Unit weight, total/moist and dry	kN/m <sup>3</sup>	lbf/ft <sup>3</sup>	3 or 4 significant digits
Void ratio or porosity			2 or 3 significant digits
Water content	%	%	Nearest 0.1 <sup>E</sup>
<b>Engineering and Related Properties</b>			
Angle of shear resistance	degrees	degrees	Nearest 0.1
Axial strain	%	%	3 significant digits <sup>F</sup>
Coefficient of consolidation	cm <sup>2</sup> /s, m <sup>2</sup> /yr	ft <sup>2</sup> /day, ft <sup>2</sup> /yr	2 significant digits
Cohesion	kN/m <sup>2</sup> , kPa	psi,ksf	2 significant digits
Compression indexes	ratio of ( $\Delta e$ , $\Delta \epsilon_u$ , $\Delta \epsilon_v$ ) to ( $\Delta$ stress or $\Delta$ log stress)		2 or 3 significant digits, but $\leq 4$ decimal places
Hydraulic head	cm or m of H <sub>2</sub> O	in. or ft of H <sub>2</sub> O	3 significant digits
Hydraulic conductivity	cm/s, m/day, m/y	ft/day, ft/y	2 or 3 significant digits
Moduli	kN/m <sup>2</sup> , kPa	psi, ksf	3 significant digits
Percent consolidation	%		Nearest 0.1
Pore pressure parameters			3 significant digits <sup>F</sup>
Preconsolidation stress	kN/m <sup>2</sup> , kPa	psi, ksf	2 significant digits
Stress or pressure	kN/m <sup>2</sup>	psi, ksf	3 significant digits <sup>F</sup>
Velocity	m/s	ft/s	3 significant digits

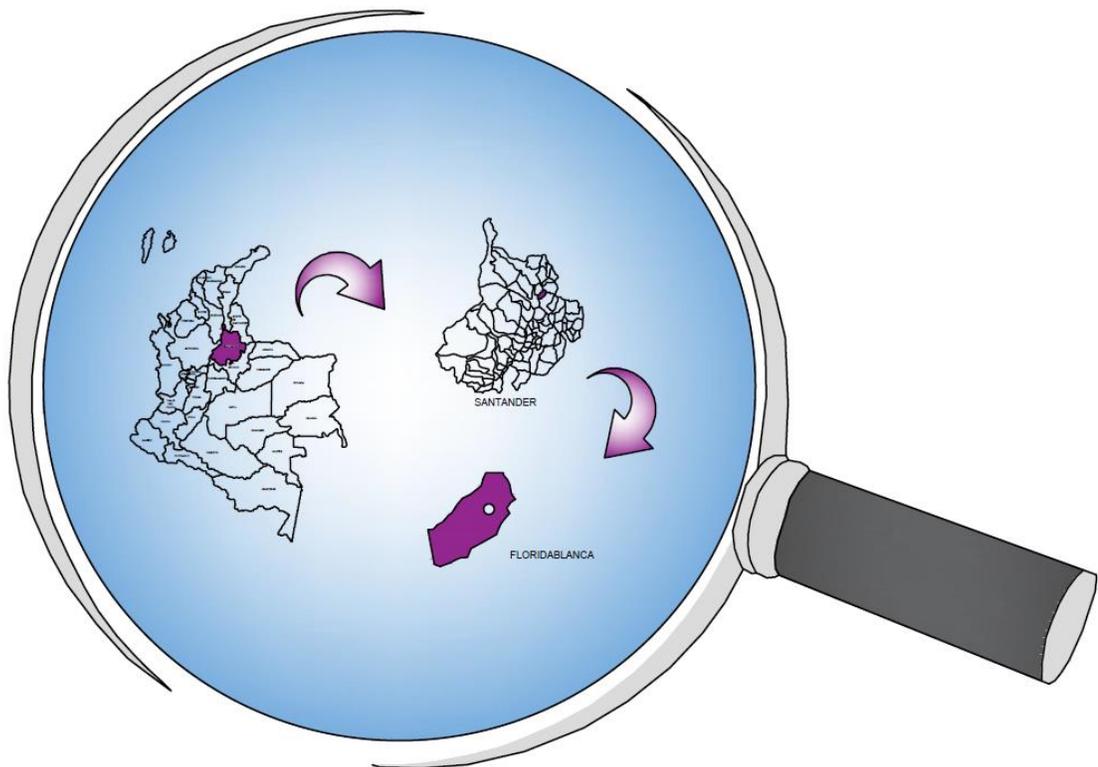
Fuente: Standard Practice for Using Significant Digits in Geotechnical Data. ASTM D-6026

### 3. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

#### 3.1 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El área de estudio se localiza en el departamento de Santander, municipio Floridablanca, que cuenta con una extensión de 97 Km<sup>2</sup>, y 263.095 habitantes. Esta área se sitúa al sur oriente del área urbana del municipio de Floridablanca, en la vereda Casiano, límites entre Floridablanca y Piedecuesta.

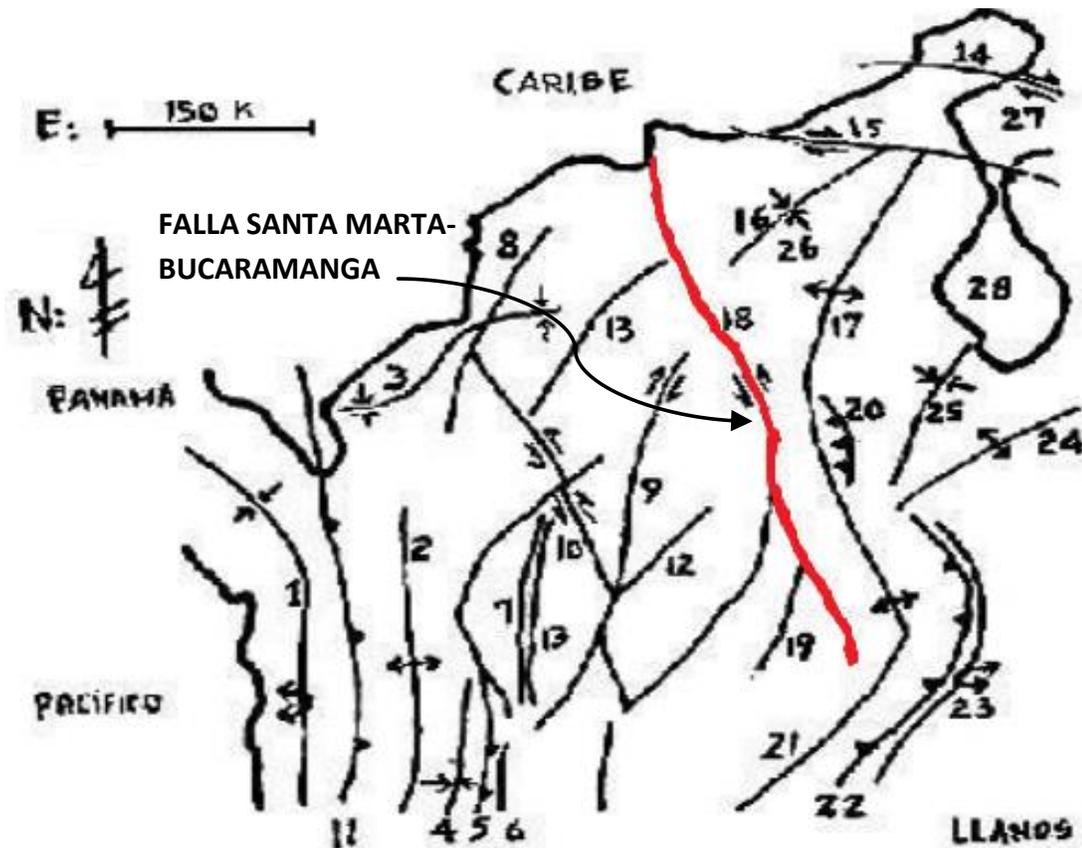
**Ilustración 1. Localización del proyecto**



### 3.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La geología estructural se encuentra en una longitud de 600 Km, al norte el aluvión que la cubre expresa topográficamente su actividad cuaternaria. Según perforaciones esta falla de dirección sudeste es una falla rumbo izquierdo con un desplazamiento de 110 Km, lo que explica la curvatura de la Cordillera Oriental<sup>29</sup>. Como se observa en la Ilustración 2.

Ilustración 2. Mapa estructural de Colombia. Falla Santa Marta-Bucaramanga



Fuente: Manual de Geología para Ingenieros

<sup>29</sup> DUQUE-ESCOBAR, G. EnergyDynamics of SPT. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 2011

La falla de Bucaramanga divide el área estudiada en dos grandes provincias estructurales: el Macizo de Santander al este y la región de la Mesa-meseta-cuenca al oeste.

En la parte norte del Macizo de Santander, rocas sedimentarias que originalmente, cubrieron el macizo, están preservadas en franjas remanentes alargadas, limitadas en un lado por fallas de dirección norte o noroeste. Sobre el flanco oeste del macizo, los bloques levantados están sobre los lados occidentales de las fallas, mientras que, sobre el oriental, los mismos bloques se hallan sobre los lados orientales. Esto da la impresión que durante el fallamiento posterior al cretáceo, la parte central del macizo se hundió o se asentó con relación a las áreas de los flancos.

En la parte sur del Macizo de Santander, fallas de dirección norte y noreste son prominentes. Aquí dos grandes áreas de rocas sedimentarias están preservadas en lo que parece ser cuencas estructurales o áreas complejamente falladas que se hundieron y luego fueron elevadas a sus actuales posiciones<sup>30</sup>.

**3.2.1 Flanco Occidental del Macizo de Santander.** Las fallas de dirección noreste son notables en la mitad sur de la zona III, particularmente en el área inmediata al este de la falla de Bucaramanga, Son más jóvenes o casi contemporáneos con ésta, porque donde la cortan la desplazan generalmente en un sentido lateral derecho y pocas veces en sentido lateral izquierdo. Las fallas con desplazamiento lateral derecho, ocurren cerca del El Playón y varias fallas pequeñas, están en el sur, encontrándose una en Rionegro. El desplazamiento mayor, por lo menos de 750 m, ocurre a lo largo de la falla de Suratá, en Bucaramanga.

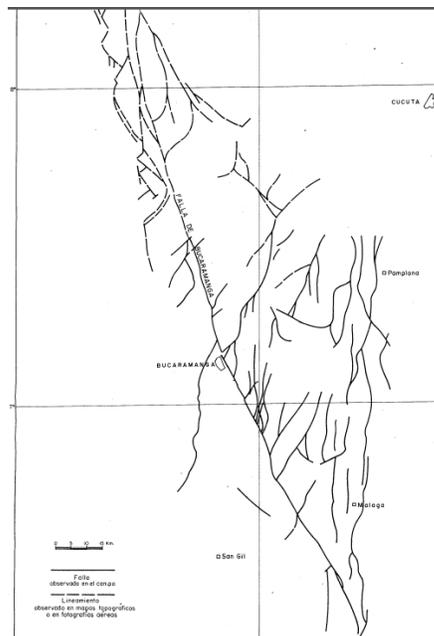
---

<sup>30</sup> DWIGHT E. Y RICHARD GOLDSMITH, J.C. Mapa Geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga. 1973.

Otras de dirección noreste con desplazamiento lateral derecho, ocurren cerca de Piedecuesta y de Cepitá en la falla río Perchiquez. El sentido del desplazamiento es menos evidente en otros sitios, tales como a lo largo de la falla río Manco y de la falla río Umpalá. Movimiento lateral izquierdo de pequeño desplazamiento ocurrió en la falla de Sevilla, justamente al norte de los Curos. Este mismo pudo también haber ocurrido en dos fallas entre Rionegro y el Playón; pro la presencia de cubierta aluvial en los sitios críticos impide comprobarlo.

En algunas de estas fallas aparentemente hay también involucrado movimiento vertical. En la del norte de Piedecuesta desplaza la cuarzomonzonita de la Corcova en sentido opuesto al que efectúa la falla de Bucaramanga<sup>31</sup>.

**Ilustración 3. Distribución de fallas y de las fallas supuestas en la vecindad de la Falla de Bucaramanga. Macizo de Santander. Cordillera Oriental.**



Fuente: Instituto Colombiano de Geología y Minería. INGEOMINAS

<sup>31</sup> Ibid.

**3.2.2 Flanco Oriental del Macizo de Santander.** Fallas mayores de dirección norte se extienden desde el borde norte hasta el área de Soatá. La mayoría parece ser normales, algunas tienen grandes desplazamientos que ponen en contacto rocas del Paleozoico inferior o del precámbrico, con rocas del terciario. En ciertos lugares, el fallamiento muestra patrones imbricados con segmentos entrecruzados de dirección norte y noreste. El patrón de las fallas post-cretáceas en el área de Pamplona-Mutiscua es el levantamiento de las rocas más antiguas en los lados norte y este. El fallamiento pre-cretáceo ocurrió al norte de Mutiscua en las fallas Mutiscua y Sulasquilla y al sureste de Chitagá, en la de este mismo nombre. En las Mutiscua y Chitagá el movimiento pre-cretáceo fue opuesto al de las fallas post-cretáceas colocando estratos del Devónico y Pérmico a Carbonífero al lado oriental en contacto con rocas del pre-Devónico en el oeste<sup>32</sup>.

**3.2.3 Área Central del Macizo de Santander.** En esta área, donde las altitudes van de 3.000 a 4.500, las rocas están menos meteorizadas y mejor expuestas y, en consecuencia, la estructura en muchos sitios está mejor definida que en las áreas de los flancos.

En la parte norte del macizo, donde predominan las rocas metamórficas del pre-Devónico, las orientaciones de las fallas varían de noreste a noroeste, con las direcciones norte noreste más comunes que las otras. En la mitad sur un área con rocas sedimentarias principalmente que van del Devónico al Terciario, los rumbos de los plegamientos y la mayor parte de las fallas mayores, caen dentro de un campo angosto de norte a noroeste. Fallas cortas, transversales de rumbo noreste a este, son numerosas en la parte oriental de esta área, pero no representan movimientos mayores.

---

<sup>32</sup> Ibid.

### 3.3 GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología del área en estudio guarda estrecha relación, con la historia y evolución geológica de la Cordillera Oriental, que tuvo su origen en la transgresión del Jurásico hasta principios del Cretáceo. Durante el levantamiento y posterior a éste, intervinieron fenómenos de orogénesis, tectonismo, vulcanismo y erosión que construyeron y modelaron una gran variedad de geoformas.

**3.3.1 Vereda Casiano.** Sector sin problemas de estabilidad, con pendientes cortas, convexas, conforma una amplia gama de pisos térmicos que van del cálido al frío, relieve ligeramente ondulado a escarpado. Los escarpes se han originado por combinación de fenómenos de tectonismo, fallamientos y erosión geológica.

### 3.4 GEOLOGÍA REGIONAL

**Peb:** Nombre propuesto por (Dwight E. y Richard Goldsmith, 1973)<sup>33</sup>, para el conjunto de rocas cristalinas de edad Precámbrico que aflora al oriente del Área Metropolitana. Se localiza al oriente del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, siendo su límite occidental fallado en dirección N30°W; de acuerdo a Mancera y Salamanca<sup>34</sup>, los mejores afloramientos se encuentran al oriente del cementerio Las Colinas, el barrio Pan de Azúcar, sobre la vía que conduce a las antenas de RCN, al oriente del barrio Los Alares y en el carreteable de la vereda Vericute (municipio de Floridablanca).

---

<sup>33</sup> *Ibíd.*

<sup>34</sup> CDMB. Amenaza de Inundación y Erosión en el río de Oro. 2005

Dicha unidad forma parte del Macizo de Santander, el cual se distingue por presentar relieve marcadamente sobresaliente por su elevada topografía, pendientes abruptas (entre 25° y 40°) y un patrón de drenaje dendrítico a subdendrítico y subparalelo.

Esta unidad consta de rocas metamórficas de alto grado, con fábrica orientada y textura gruesa a media. Entre Floridablanca y Piedecuesta la foliación tiene orientación variable, indicativo de perturbaciones tectónicas severas, aunque con ligera tendencia hacia el noreste en la dirección del buzamiento de la foliación. Está compuesta, principalmente, de neis semipelítico, neishornbléndico, anfibólita y esquisto; incluye también zonas de migmatitas<sup>35</sup> y es posible la existencia de rocas cataclásticas, cerca de los planos de las fallas principales. También se han detectado pequeñas cantidades de mármol.

#### Ilustración 4. Mapa geológico del sitio en estudio



Fuente: Ingeominas

<sup>35</sup> WARD, W. E. Geología del cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona. 1973

Se encuentran dos tipos de neis: Uno de color blanco a rosado, constituido esencialmente por plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico<sup>36</sup>. Debido a su aspecto masivo y a la ausencia de estratificación<sup>37</sup>, suponen un origen ígneo intrusivo primario y lo clasifican como Ortoneis. El otro es un paraneis, de color gris verdoso y alternancia de bandas máficas, principalmente anfibólicas y bandas félsicas cuarzo-feldespáticas.

De los minerales constituyentes el único que se conserva casi inalterado es el cuarzo y la muscovita; esta última se presenta en láminas muy finas. Los feldespatos y ferromagnesianos, por lo general, se encuentran en estado de meteorización alta.

La mayoría de afloramientos del Neis de Bucaramanga se encuentran parcialmente saprolitizados, en estado de meteorización entre moderada y alta. Esta unidad litológica, en especial dentro de una franja aproximada de unos 500 metros paralela al sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, se presenta intensamente fracturada y es altamente susceptible a fenómenos de remoción en masa que involucran saprolito y fragmentos de roca de tamaño diverso. Los desprendimientos ocurren en las laderas o cortes de talud y la roca superficial descompuesta es variable en espesor, con un promedio entre 3 y 8 metros<sup>38</sup>. Ilustración 5.

---

<sup>36</sup> ALIRIO, C. E. Geología y Geotecnia de la Zona Oriental del Área Metropolitana de Bucaramanga, Sector Morrónico-Floridablanca. Tesis de Grado. 1991.

<sup>37</sup> WARD, Óp. Cit.

<sup>38</sup> DWIGHT E. Y RICHARD GOLDSMITH, J.C. Mapa Geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga. 1973.

### Ilustración 5. Geología del sitio en estudio



Fuente: Ingeominas

Hacia el oriente del sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta, y sobre las cotas alrededor de 1400 y 1600 m.s.n.m, el Neis de Bucaramanga se presenta intruído por una masa de origen ígneo denominada Cuarzomonzonita de La Corcova (JRcg). Ward et al. (1973)<sup>39</sup>, le han asignado al Neis de Bucaramanga una edad de 940-945 m.a, debido a que puede reflejar el ciclo de Orogenia del Pre-Cámbrico.

Neis de Bucaramanga intensamente fracturado con meteorización moderada a alta en el corte de una carretera veredal, al oriente de Piedecuesta, cerca al sistema de fallas Bucaramanga - Santa Marta donde se presentan desprendimientos de roca y suelo.

---

<sup>39</sup> WARD, Óp. Cit.

#### **4. MÉTODO DE EXPLORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO**

Las exploraciones de campo se realizaron a través de un apique o calicata, y pruebas de penetración estándar SPT distribuidos en el área de estudio.

Una vez extraídas las muestras se procede a la identificación, caracterización y evaluación de las propiedades mecánicas del suelo en estudio mediante ensayos de laboratorio.

##### **4.1 PROCEDIMIENTO DE LAS EXPLORACIONES**

Las actividades de campo inician con un reconocimiento del área de estudio que equivale aproximadamente a 1200 m<sup>2</sup>, con el fin de identificar y localizar los sitios de exploración.

**Fotografía 1. Área de estudio**



Fuente: COLSUELOS S.A.S

**Figura 18. Ubicación de Sondeos y Apique**



Fuente: COLSUELOS S.A.S

Seguidamente se procede a la ejecución de nueve ensayos de penetración estándar o sondeos, con una variación en profundidad entre 6,0 y 7,0 metros. Se recuperó muestra de estos sondeos utilizando tubos Shelby y toma muestra de cuchara partida. De estas exploraciones se obtuvieron datos de valores de N de SPT, estos se pueden observar en la Tabla 3.

## Fotografía 2. Ensayos de SPT



Tabla 3. Valores de N de SPT

PROFUNDIDA D (m)	N - SPT								
	SONDE O 1	SONDE O 2	SONDE O 3	SONDE O 4	SONDE O 5	SONDE O 6	SONDE O 7	SONDE O 8	SONDE O 9
0,5	10	12	5	9	10	10	7	8	9
1	14	9	7	10	11	12	9	8	10
1,5	15	11	10	12	13	13	12	13	12
2	12	16	12	13	14	13	12	16	14
2,5	8	18	12	13	13	11	10	17	13
3	10	11	13	11	11	11	11	13	11
3,5	11	8	18	12	10	11	11	13	12
4	14	11	17	14	13	14	13	14	14
4,5	15	13	15	14	14	14	22	16	15
5	27	18	18	21	22	23	23	20	22
5,5	34	22	20	25	27	29	23	25	26
6	39	24	28	30	31	33	28	26	30
6,5	-	24	23	27	29	30	28	29	28
7	-	28	30	28	30	27	31	29	30

Paralelamente se realizó un apique o calicata, con una profundidad de 6,0 metros, con sección circular entibado, el cual en su diámetro inicial correspondió a 1,5 metros y su diámetro final 0,8 metros, de donde se recuperaron muestras alteradas e inalteradas.

### **Fotografía 3. Apique o calicata**



Fuente: COLSUELOS S.A.S

Consecutivamente se determinaron los ensayos para la caracterización y estimación de las propiedades mecánicas del suelo en estudio, los cuales fueron: humedad, granulometría, límites, y ensayo de corte directo en muestras alteradas e inalteradas.

Finalmente se procedió a la recopilación, evaluación y análisis de los datos obtenidos de los ensayos de campo, y los ensayos de laboratorio.

## **4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO**

A continuación, se presentan los datos consolidados y analizados de los resultados obtenidos de los ensayos de humedad, granulometría y límites realizados a las muestras extraídas de los nueve sondeos, que permitieron clasificar el suelo como un limo inorgánico con arena, de consistencia compacta, pero a medida que aumentaba la profundidad se hizo dura, húmedo, y de color rojizo.

### **4.2.1 Resultados de los ensayos de Granulometría, Límites y Humedad**

#### **Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.**

La determinación cuantitativa de los tamaños de las partículas del suelo en estudio se fundamentó en el ensayo INV E -123 – 13, que describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices. Este ensayo permite identificar los porcentajes de grava, arena y finos presentes en el suelo de estudio.

El ensayo consiste en tomar una muestra representativa del suelo que dependerá del tamaño máximo de partícula, lo retenido se debe pesar y se separa en una serie de fracciones, usando los tamices que sean necesarios, dependiendo de la muestra o de las especificaciones aplicables al material que se está ensayando; después pesamos lo retenido por cada tamiz. Para finalmente calcular el porcentaje de suelo retenido por cada tamiz, y construir la curva de distribución granulométrica.

Los informes de resultados se presentan en el ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO.

### **Determinación de Límites de Atterberg**

De acuerdo con los lineamientos de las normas INV E – 125-13 e INV E – 126 – 13, se determinó el límite líquido y el límite plástico respectivamente. Estos ensayos contribuyen en la caracterización de la fracción fina del suelo en estudio.

En resumen, el método para determinar el límite líquido consiste en procesar la muestra de suelo para remover cualquier porción retenida en el tamiz 425  $\mu\text{m}$  (No. 40). El límite líquido se determina mediante tanteos, en los cuales una porción de la muestra se esparce sobre una cazuela de bronce que se divide en dos partes con un ranurador, permitiendo que esas dos partes fluyan como resultado de los golpes recibidos por la caída repetida de la cazuela sobre una base normalizada. El límite líquido multipunto, Método A, requiere 3 o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados se dibujan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido.<sup>40</sup>

En límite plástico en resumen se determina presionando de manera repetida una pequeña porción de suelo húmedo, de manera de formar rollos de 3,2 mm (1/8”) de diámetro, hasta que su contenido de agua se reduce a un punto en el cual se produce el agrietamiento y/o desmoronamiento de los rollos. El límite plástico es la humedad más baja con la cual se pueden formar rollos de suelo de este diámetro, sin que ellos se agrieten o desmoronen.<sup>41</sup>

Los informes de resultados se presentan en el ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO.

---

<sup>40</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-125-13. Determinación del límite líquido de los suelos. Bogotá D.C., 2013. p. E 125-2, E 125-3

<sup>41</sup>INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. Bogotá D.C., 2013. p. E 125-2, E 125-3

## Humedad

La norma de referencia para la determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) que se empleo es la INV E – 122 – 13.

En resumen, el método consiste en llevar una muestra del material húmedo a un horno a  $110\pm 5^{\circ}$  C ( $230\pm 9^{\circ}$  F) y se seca hasta alcanzar una masa constante. Se considera que la masa perdida a causa del secado es agua y que la masa remanente corresponde a la muestra seca. El contenido de agua se calcula relacionando la masa de agua en la muestra húmeda con la masa de la muestra seca.<sup>42</sup>

Los informes de resultados se presentan en el ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO.

## Resultados de caracterización del suelo en estudio

Los resultados de los ensayos de caracterización se resumen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resultados ensayos de caracterización**

GRANULOMETRÍA			PROPIEDADES ÍNDICE			
Grava %	Arena %	Fino %	Humedad Natural	L.L. %	L.P. %	I.P. %
0,0	44,9	55,10	20,20	42,40	26,5	15,90
0,0	49,9	50,10	19,90	45,40	37,5	7,90
0,3	49,6	50,10	21,40	42,40	36,6	5,80
0,0	48,9	51,10	21,20	45,50	37,1	8,40
0,5	48,6	50,90	21,00	45,30	38,2	7,10
0,5	43,3	56,20	19,50	46,60	39,4	7,20

<sup>42</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Norma INV E-122-13. Determinación en el laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-cemento. Bogotá D.C., 2013. p. E 122-3

GRANULOMETRÍA			PROPIEDADES ÍNDICE			
Grava %	Arena %	Fino %	Humedad Natural	L.L. %	L.P. %	I.P. %
0,1	40,9	59,00	21,70	41,00	31,1	9,90
0,1	44	55,90	20,30	42,30	27,5	14,80
0,0	43,8	56,20	21,50	43,00	29,9	13,10

**4.2.2 Clasificación del suelo en estudio.** Los ensayos de caracterización permitieron clasificar el suelo en estudio como un limo inorgánico con arena (ML) a una profundidad entre 0,50 y 4,50 metros.

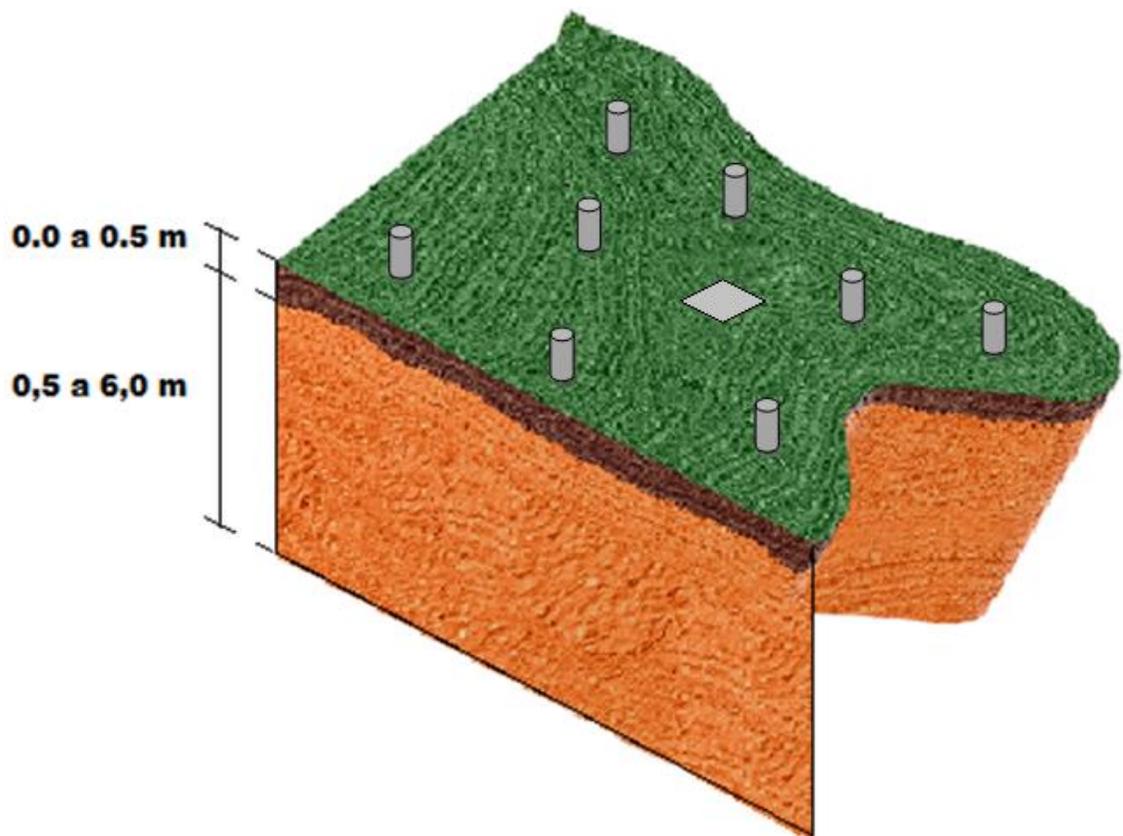
**Tabla 5. Resumen de clasificaciones del suelo en estudio**

Profundidad (m)	Sondeo No.	DESCRIPCIÓN		
		Clasificación SUCS	Clasificación AASHTO	Tipo de suelo
0,05-1,50	1	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
1,50-3,00	2	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
3,00-4,50	3	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
4,50-6,00	4	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
0,00-1,50	5	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
1,50-3,00	6	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
3,00,-4,50	7	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
4,50-6,00	8	ML	A-4	Limo inorgánico con arena
3,00-4,50	9	ML	A-4	Limo inorgánico con arena

### 4.3 PERFIL ESTRATIGRÁFICO

De acuerdo al examen visual de las muestras y los ensayos de caracterización se encontraron bien definidos dos estratos: el primero superficial el cual está constituido por material orgánico y capa vegetal de aproximadamente 0,50 m, el segundo estrato está definido hasta la profundidad máxima de las exploraciones y corresponde a un material limo arenoso, color rojizo, con densidad media y consistencia dura, ver Ilustración 6.

**Ilustración 6. Perfil estratigráfico**



## 5. ANÁLISIS DE DATOS

### 5.1 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Se procesaron las muestras recuperadas de las exploraciones de campo realizadas en el predio finca el porvenir, en las que se obtuvieron muestras alteradas e inalteradas, se realizaron los ensayos de corte directo a las muestras, utilizando el equipo de nombre Maquina de corte directo, modelo 2000100, serial 201-230215 ver Fotografía 4, de la empresa Colsuelos S.A.S con certificado de calibración ONAC N° CFA-17-6119.

**Fotografía 4. Equipo de corte directo utilizado**



**5.1.1 Cortes directos sobre muestras inalteradas.** Los ensayos de corte directo se realizamos de muestras recuperadas, con tubo Shelby, de bancos o cubos de suelo moldeados y extraídos del apique ver Fotografía 5, al igual de muestras en la que se hincó directamente grupos de 3 moldes sobre una superficie perfilada y plana ver Fotografía 6.

**Fotografía 5. Extracción de cubos de muestras inalteradas**



**Fotografía 6. Moldes hincados int-situ**



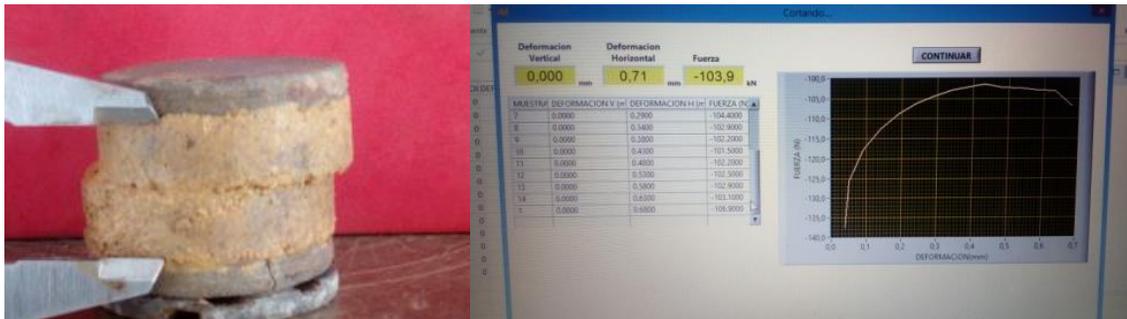
Se tomaron 30 muestras inalteradas en los 9 sondeos realizados, distribuidos en la profundidad de exploración.

**Tabla 6. Número de sondeo y profundidad de muestra inalterada para ensayo de corte**

SONDEO	PROF (m)
s1	6,0
s2	2,5
s3	3,5
s4	5,0
s5	1,5
s6	5,5
s7	4,5
s7	7,0
s9	5,0
s9	6,0

Se realizaron los ensayos y se procesó la información, en el ANEXO A ENSAYOS DE LABORATORIOS se encuentran los datos obtenidos del ensayo, con estos se determinan los parámetros de ángulo de fricción  $\phi^\circ$ , y cohesión.

**Fotografía 7. Muestras y resultados de laboratorio**



**Tabla 7. Resultados ensayos de corte directo sobre muestras inalteradas**

Sondeo	Prof. (m)	Peso unitario (KN/m3)	Ángulo de fricción ( $\phi^\circ$ )	Cohesión (KN/m2)
s2	2,5	19,12294	37,0	15,2
s5	1,5	19,20139	37,2	14,9
s4	5,0	19,28965	37,5	19,3
s7	4,5	19,31907	37,7	16,8
s9	5,0	19,34849	38,2	19,8
s3	3,5	20,00554	39,0	14,5
s9	6,0	20,33896	39,8	14,3
s7	7,0	20,34681	39,9	13,3
s6	5,5	20,44684	40,1	18,3
s1	6,0	20,49587	40,2	18,2

**5.1.2 Cortes directos sobre muestras inalteradas.** Los ensayos de corte directo se realizaron de muestras recuperadas con muestreador estándar de tubo partido Fotografía 8; y del material extraído del apique, se constituyeron muestras con material normalizado, como se observa en la Fotografía 9.

**Fotografía 8. Muestreador de tubo partido**



### Fotografía 9. Reconstitución de muestras para corte directo



Se reconstituyeron 36 muestras, utilizando el material recuperado de los ensayos de exploración, dichas muestras se reconstituyeron, bajo condiciones controladas para obtener pesos unitarios específicos. En la Tabla 8 se detallan los resultados.

**Tabla 8. Resultados ensayos de corte directo sobre muestras reconstituidas**

N° Ensayo	Peso unitario (KN/m3)	Ángulo de fricción ( $\varphi^\circ$ )	Cohesión (KN/m2)
11	16,671	27,7	6,5
12	16,671	27,8	8,2
13	16,671	27,8	7,6
14	17,652	29,5	11,3
15	17,652	31,0	9,6
16	17,652	32,7	10,8
17	18,633	34,1	13,8
18	18,633	34,4	14,0
19	18,633	34,9	13,3
20	19,613	35,7	14,9
21	19,613	35,4	13,6
22	19,613	35,4	14,6

## 6. CALIBRACIÓN DEL CÁLCULO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DE N – SPT NORMALIZADO

### 6.1 CALCULO DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN A PARTIR DE N DE SPT CORREGIDOS POR ENERGÍA Y CONFINAMIENTO (N1)60

Existen varios métodos para el cálculo del ángulo de fricción equivalente, estos varían de acuerdo al autor, en su gran mayoría se realiza la estimación del ángulo de fricción equivalente en función del número N de SPT corregido por energía y confinamiento, pero estas estimaciones difieren en su mayoría una de otra en la corrección por energía, por esta razón se recopilaron las principales correlaciones y se transformaron de tal forma que todas quedaran en función de un mismo valor de N de SPT corregido, que para el caso particular de este proyecto será el valor de (N1)60. Se realizó la transformación de las correlaciones de acuerdo a la método de transformación de ÁLVARO J. GONZÁLEZ G-1999- Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT- X jornadas geotécnicas de la ingeniería colombiana, las correlaciones utilizadas se presentan en la Tabla 9. Se tabularon los resultados de las correlaciones ver ANEXO B. Tabulación de datos.

**Tabla 9. Expresiones transformadas para calcular  $\varphi'$  a partir de N1(60)**

Autor	Año	Ecuación	Transformada
Terzaghi & Peck	1948	$\varphi' = 28.5^\circ + 0.25 * N1_{45}$	$\varphi' = 28.5^\circ + 0.333 * N1_{60}$
Peck et. Al.	1953	$\varphi' = 26.25^\circ * \left[ 2 - \left( e^{-\frac{N1_{45}}{62}} \right) \right]$	$\varphi' = 26.25^\circ * \left[ 2 - \left( e^{-\frac{N1_{60}}{46.5}} \right) \right]$
Kishida	1969	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{20 * N1_{72}}$	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{16.666 * N1_{60}}$

Autor	Año	Ecuación	Transformada
Schmertmann	1970	$\varphi' = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{N1_{60}}{32.5} \right)^{0.34} \right]$	$\varphi' = \tan^{-1} \left[ \left( \frac{N1_{60}}{32.5} \right)^{0.34} \right]$
JNR (Japan National Railway)	1999	$\varphi' = 27^\circ + 0.30 * N1_{72}$	$\varphi' = 27^\circ + 0.25 * N1_{60}$
JRB (Japan Road Bureau)	1986	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{15 * N1_{72}}$	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{12.5 * N1_{60}}$
Hatanaka & Uchida	1996	$\varphi' = 20^\circ + \sqrt{20 * N1_{72}}$	$\varphi' = 20^\circ + \sqrt{16.666 * N1_{60}}$
Montenegro & González	2014	$\varphi' = 12.79^\circ + \sqrt{25.86 * N1_{72}}$	$\varphi' = 12.79^\circ + \sqrt{21.55 * N1_{60}}$
Dunham	2013	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{12 * N1_{72}}$	$\varphi' = 15^\circ + \sqrt{10 * N1_{60}}$

Fuente: CARMONA-ÁLVAREZ, J. E. y RUGE-CÁRDENAS, J.C. “Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos *in situ*”, *Tecno Lógicas*, vol. 18, No. 35, pp. 93-104, 2015. Modificada por autor.

Los resultados se muestran en la Figura 19, en la cual se observan los datos calculados para ángulos de fricción equivalente en función del número (N1)60 de SPT y los resultados reales medidos de ángulos de fricción, a partir de las cuales se obtienen las siguientes ecuaciones.

**Tabla 10. Regresiones utilizadas para evaluar la tendencia de ajuste a los modelos de correlación**

Tipo	Ecuación	R^2
Exponencial	$\varphi' = 34,818e^{0,0047*((N1)60)}$	0,6868
Potencial	$\varphi' = 27,291*((N1)60)^{0,1129}$	0,7297
Lineal	$\varphi' = 0,1804*((N1)60) + 34,624$	0,6903

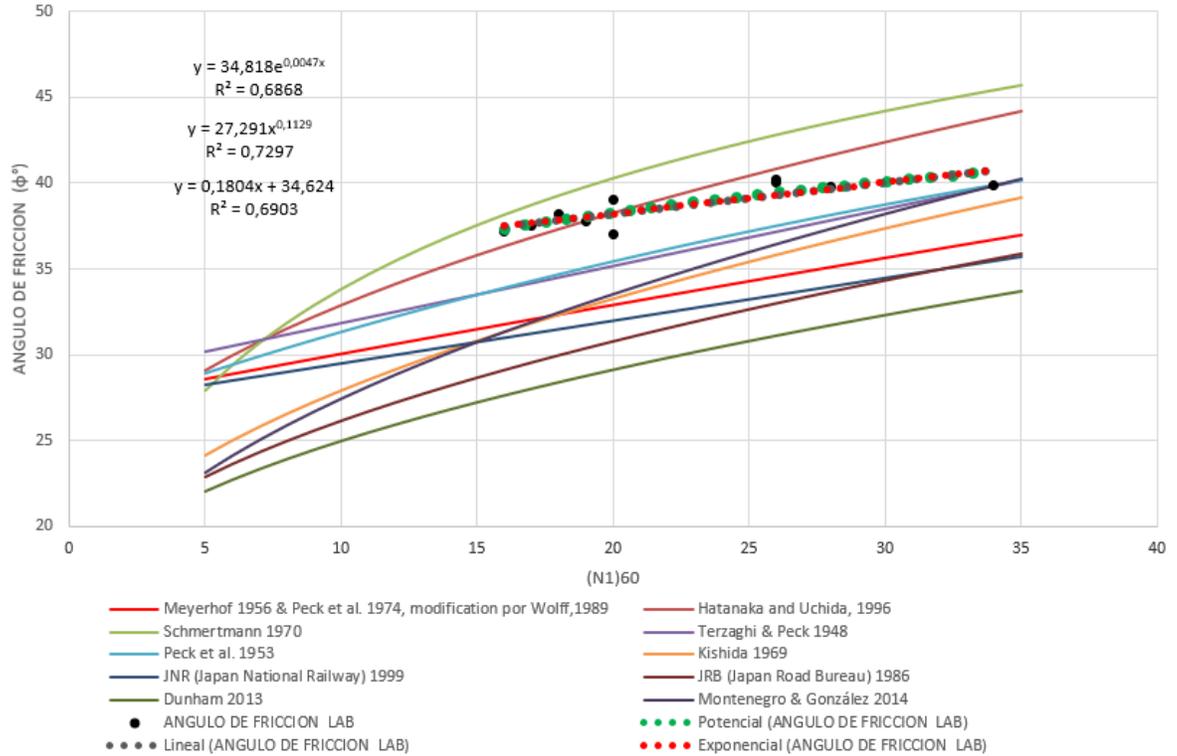
Se realizó una comparación entre los datos que se obtienen de las tres expresiones y se determinó el porcentaje de error, respecto a los parámetros reales, los resultados se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11. Resultados de ángulo de fricción obtenidos de las regresiones comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error**

(N1)60	Ángulo de fricción $\varphi^\circ$	Potencial	% Error	Exponencial	%Error	Lineal	% Error
20	37,0	38,3	-3,4	38,2	-3,3	38,2	-3,3
16	37,2	37,3	-0,3	37,5	-0,9	37,5	-0,8
17	37,5	37,6	-0,1	37,7	-0,5	37,7	-0,4
19	37,7	38,1	-0,9	38,1	-0,9	38,1	-0,9
19	38,2	38,1	0,4	38,1	0,4	38,1	0,4
20	39,0	38,3	1,9	38,2	2,0	38,2	2,0
28	39,8	39,8	0,1	39,7	0,2	39,7	0,3
34	39,9	40,6	-1,8	40,9	-2,4	40,8	-2,1
26	40,1	39,4	1,6	39,3	1,8	39,3	1,8
26	40,2	39,4	1,9	39,3	2,1	39,3	2,1

Las expresiones que se obtuvieron, presentan errores estimados máximos de 3,5 %, con respecto a los valores esperados.

**Figura 19. Comparación de los resultados estimados de ángulo de fricción en función de los valores de N1(60) de SPT con respecto a las metodologías de diferentes autores, con los obtenidos de los ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas y sus ajustes**



Se analizó la tendencia de las regresiones encontradas, que se asocian a un comportamiento de tendencia según la expresión de Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989, basándose en esta, se realizó un ajuste a la ecuación para conseguir disminuir los porcentajes de error, los resultados se muestran en la Figura 20, donde se presentan los valores corregidos de SPT (N1)60, y los ángulos de fricción reales y equivalentes, a partir de la Figura 20 se obtiene la siguiente expresión:

**Tabla 12. Expresión obtenida basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989, y los valores corregidos (N1)60**

Tipo	Ecuación	R <sup>2</sup>
Polinómica	$\varphi = 30,1 + 0,5*((N1)60) - 0,0054*((N1)60)^2$	0,9773

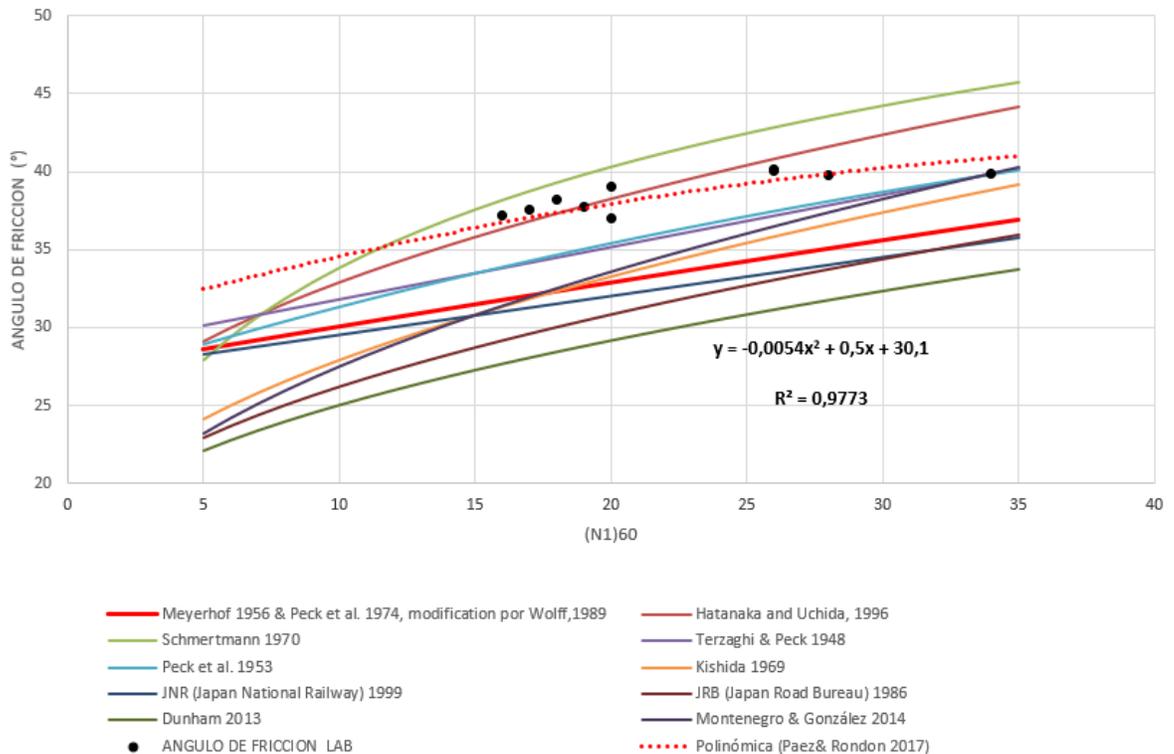
Se realizó una comparación entre los datos obtenidos de las expresiones y se determinó el porcentaje de error, respecto a los parámetros reales, los resultados se presentan en la Tabla 13.

**Tabla 13. Resultados de ángulo de fricción obtenidos de la expresión Polinómica basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989, comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error**

(N1)60	Ángulo de fricción $\varphi^\circ$	Ajuste	Polinómica $\varphi^\circ$	%Error
20	37,0		37,9	-2,4
16	37,2		36,7	1,3
17	37,5		37,0	1,3
19	37,7		37,7	0,2
19	38,2		37,7	1,5
20	39,0		37,9	2,8
28	39,8		39,9	-0,1
34	39,9		40,9	-2,4
26	40,1		39,4	1,5
26	40,2		39,4	1,8

Las expresiones que se obtuvieron, presentan errores estimados máximos de 2,4 %, con respecto a los valores esperados.

**Figura 20. Comparación de los resultados estimados de ángulo de fricción en función de los valores de N1(60) de SPT con respecto a las metodologías de diferentes autores, con los obtenidos de los ensayos de laboratorio sobre muestras inalteradas, y los calculados con la expresión Polinómica basada en Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificada por Wolff 1989**



Se concluye que la nueva expresión de tipo Polinómica de segundo orden, se ajusta mejor al comportamiento de los datos como se puede observar en la Figura 20, y los porcentajes de error calculados son menores como se registran en la Tabla 13. Además, esta se basó en una metodología usualmente aplicada en Santander, utilizando la expresión de Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modification por Wolff

1989, y ajustada en función de los valores de (N1)60 y ángulos de fricción ( $\varphi^\circ$ ) reales obtenidos de los ensayos sobre muestras inalteradas, para materiales limo arenosos – del sector oriental de Floridablanca Santander.

## 6.2 CALIBRACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN OBTENIDO DE ENSAYOS SOBRE MUESTRAS REMOLDEADAS, EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD

Se realizaron ensayos de corte directo sobre muestras reconstituidas o remodeladas, en material limo arenoso recuperado de las exploraciones, se reconstituyeron las muestras controlando el peso unitario de las pastillas de corte, determinando la variabilidad de los parámetros de corte con los cambios en el peso unitario, los resultados se observan en la Figura 21, los datos de ángulo de fricción  $\varphi$  en función del cambio en su peso unitario se presentan en la Tabla 14.

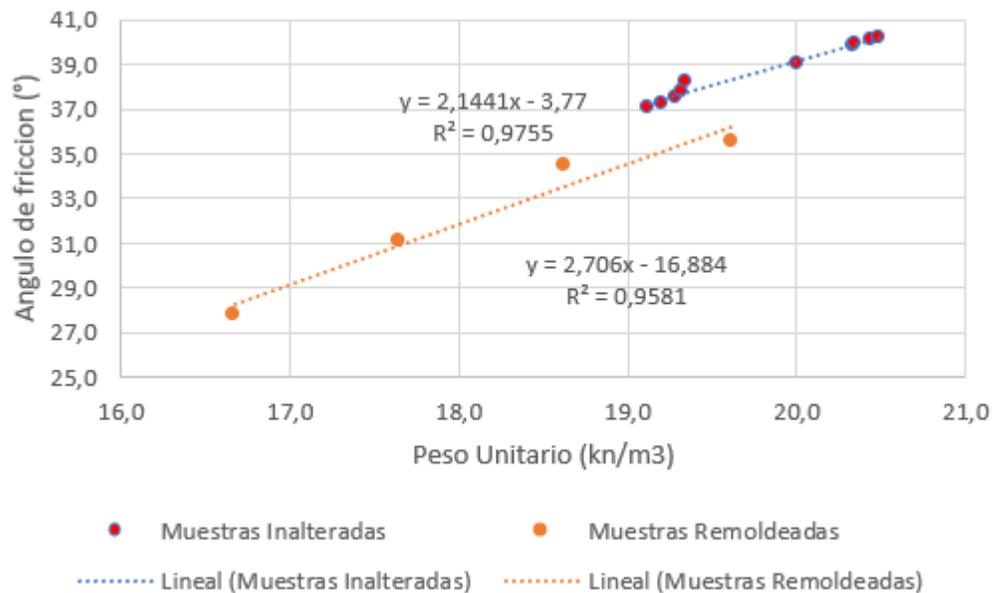
**Tabla 14. Resultados de ángulo de fricción en función del cambio en el peso unitario del suelo en estudio**

Peso unitario (KN/m <sup>3</sup> )	Ángulo de fricción $\varphi^\circ$
16,671	27,7
16,671	27,8
16,671	27,8
17,652	29,5
17,652	31,0
17,652	32,7
18,633	34,1
18,633	34,4
18,633	34,9

Peso unitario (KN/m3)	Ángulo de fricción $\varphi^\circ$
19,613	35,7
19,613	35,4
19,613	35,4

Se realizaron tres ensayos de corte directo para un peso unitario en común, para estandarizar la variabilidad que aporta el factor humano y los equipos, se determinó que el ángulo de fricción, es afectado por los cambios en el peso unitario, se identifica un aumento en los esfuerzos cortantes máximos en relación con el aumento de los pesos unitarios.

**Figura 21. Ángulos de fricción obtenidos sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función del cambio en su peso unitario**



Se graficaron los resultados obtenidos de los ángulos de fricción de los ensayos de corte directo sobre muestra inalterada y los promedios de los ángulos para cada uno de los pesos unitarios reconstituidos, a partir de esta gráfica se obtiene las siguientes expresiones:

**Tabla 15. Ecuaciones obtenidas para evaluar el ángulo de fricción sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función de su peso unitario**

Tipo	Ecuación	R <sup>2</sup>
Lineal (Muestras inalterada)	$\varphi = 2,1441 \cdot \delta - 3,77$	0,9755
Lineal (Muestras reconstituidas)	$\varphi = 2,706 \cdot \delta - 16,884$	0,9581

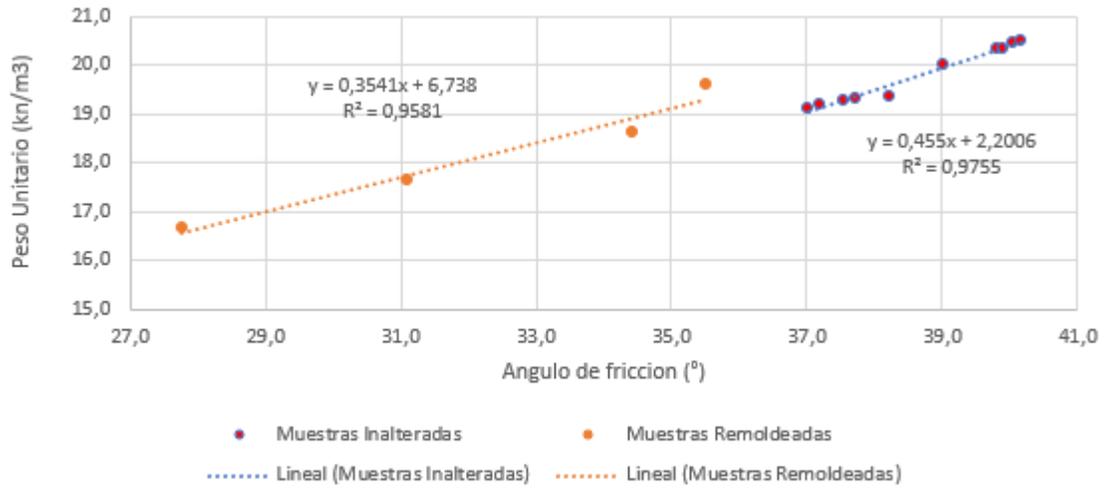
En ocasiones no es posible recuperar muestra inalterada de las exploraciones de campo, es por eso, que es una práctica común, realizar ensayos de corte directo sobre muestras reconstituidas, con el fin de determinar parámetros de corte acorde al comportamiento de los parámetros obtenidos de ensayos sobre las muestras inalteradas, se desarrolló la siguiente metodología.

Primero se realizaron regresiones a los datos reales obtenidos de los ensayos de laboratorio ver Figura 22, y se obtuvieron las siguientes expresiones:

**Tabla 16. Ecuaciones obtenidas para evaluar el peso unitario sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función de su ángulo de fricción**

Tipo	Ecuación	R <sup>2</sup>
Lineal (Muestras inalterada)	$\delta_i = 0,455 \cdot \varphi_i - 2,2006$	0,9755
Lineal (Muestras Remoldeadas)	$\delta_r = 0,3541 \cdot \varphi_r - 6,738$	0,9581

**Figura 22. Pesos unitarios obtenidos sobre muestras inalteradas y muestras reconstituidas en función del ángulo de fricción**



Donde:

$\phi_i$  (°) = Ángulo de fricción en muestra inalterada

$\delta_i$  (kN/m<sup>3</sup>) = Peso unitario real a la profundidad del estrato deseado

$\phi_r$  (°) = Ángulo de fricción en muestra reconstituida

$\delta_r$  (kN/m<sup>3</sup>) = Peso unitario de la muestra reconstituida

$\Delta\delta$  (kN/m<sup>3</sup>) = Delta de peso unitario ( $\delta_r - \delta_i$ )

En función del factor  $\Delta\delta$ , se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi_i = 0,77824 \phi_r - 2,1978 \Delta\delta + 9,9723$$

Se realizó una comparación entre la media de datos obtenidos con la expresión anterior y los parámetros reales, para cada valor se determinó el porcentaje de error, estos resultados se presentan en la Tabla 17. Los cálculos se muestran en ANEXO B. Tabulación de resultados.

**Tabla 17. Ángulos de fricción obtenidos en función del peso unitario (factor  $\Delta\delta$ ) y el ángulo de fricción en muestras reconstituidas, comparados con los ángulos de fricción esperados y su porcentaje de error**

DATOS REALES			RESULTADOS	
Peso unitario	(KN/m3)	Ángulo de fricción $\varphi^\circ$	Media de Resultados $\varphi^\circ$	Error (%)
19,123		37,0	37,2	-0,46
19,201		37,2	37,4	-0,45
19,290		37,5	37,6	-0,05
19,319		37,7	37,6	0,28
19,348		38,2	37,7	1,36
20,006		39,0	39,1	-0,31
20,339		39,8	39,9	-0,15
20,347		39,9	39,9	0,05
20,447		40,1	40,1	-0,13
20,496		40,2	40,2	-0,08

Para utilizar la expresión anterior se debe contar con información básica, se necesita tener un ensayo de corte sobre muestra reconstituida y de las exploraciones de campo los pesos unitarios, comparación aplicable al suelo analizado que es un material limo arenoso, cuya caracterización se presenta en la Tabla 5.

## 7. CALIBRACIÓN DEL MÉTODO DE CALCULO DEL PARÁMETRO DE CORTE COHESIÓN C, A PARTIR DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN.

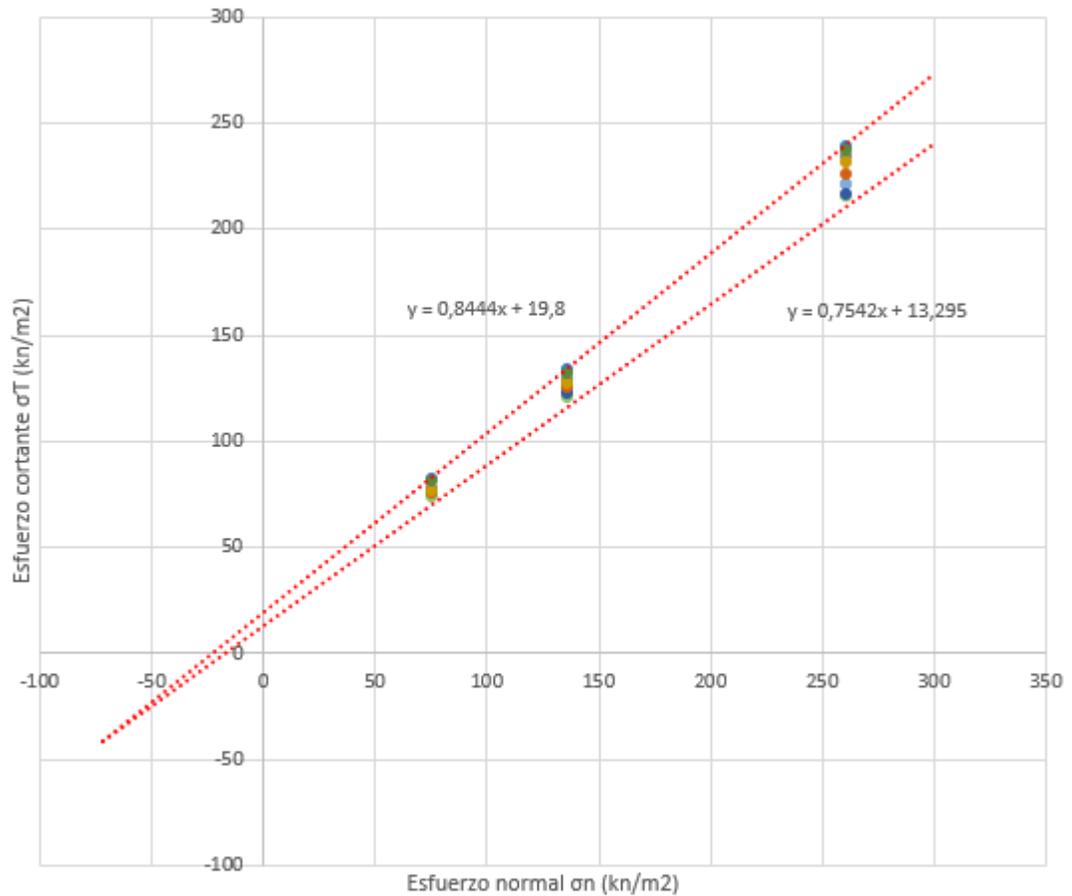
Se realizó el cálculo del parámetro de corte, cohesión en (KN/m<sup>2</sup>), utilizando como punto base en intercepto de las envolventes de función, que contienen a la tendencia de resultados de los ensayos de corte directo inalterado, generando un punto en común de esfuerzos cortantes  $\sigma_T$  y esfuerzos normales  $\sigma_n$ , se puede observar en la Figura 23, los valores tabulados corresponden a los esfuerzos cortantes y normales máximos obtenidos de los ensayos de corte directo ver ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO, se resumen los datos Tabla 18.

**Tabla 18. Resultados de esfuerzos normales y esfuerzos cortantes obtenidos del ensayo de corte directo sobre muestras inalteradas**

NÚMERO DE ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN MUESTRAS INALTERADAS	ESFUERZOS NORMALES (KN/m <sup>2</sup> )		
	75,4	136,0	260,8
	ESFUERZOS CORTANTE (KN/m <sup>2</sup> )		
	PASTILLA 1	PASTILLA 2	PASTILLA 3
CORTE 1	74,6	122,3	220,5
CORTE 2	72,9	119,5	215,4
CORTE 3	77,7	124,6	221,1
CORTE 4	74,1	120,1	214,8
CORTE 5	76,7	122,4	216,5
CORTE 6	75,6	124,7	225,9
CORTE 7	77,6	128,6	233,5
CORTE 8	76,1	126,7	230,7
CORTE 9	82,0	133,2	238,6
CORTE 10	81,3	132,0	236,3

El parámetro de corte directo, cohesión (kN/m<sup>2</sup>) se encuentran en el rango entre 13 y 20 kN/m<sup>2</sup>, el punto de corte de la envolvente de funciones se define en el esfuerzo normal  $\sigma_n$  (-72,117), y en el esfuerzo cortante  $\sigma_T$  (-41,096).

**Figura 23. Esfuerzo normal  $\sigma_n$  vs esfuerzo cortante  $\sigma_T$**



Se definen las envolventes de función como:

**Tabla 19. Ecuaciones obtenidas para evaluar envolvente inferior y envolvente superior**

Nombre	Tipo	Ecuación
Envolvente Inferior	Lineal	$y = 0,7542x + 13,295$
Envolvente Superior	Lineal	$y = 0,8444x + 19,8$

A partir de esta gráfica se obtiene la siguiente expresión:

$$C(\text{kN/m}^2) = 72,117 \cdot \tan(\varphi_i) - 41,096$$

## 8. CONCLUSIONES

- El perfil de suelo encontrado en el área en estudio se encuentra dividido en dos horizontes, el primer horizonte o estrato se encuentra aproximadamente hasta una profundidad de 0,5 metros , en el que se encuentra material o suelo de origen orgánico compuesto por limos arenosos de consistencia firmes de color café oscuro, a continuación se identifica un segundo horizonte u estrato el cual inicia aproximadamente a los 0,5 metros de profundidad hasta alcanzar las profundidades máximas de exploración, en este horizonte se encuentran limos arenosos de consistencia rígida de color marrón claro.
- Los parámetros de ángulos de fricción obtenidos de los ensayos de corte directo realizados en el laboratorio presentan un comportamiento creciente o directamente proporcional con el aumento de número N de SPT o( número N de la resistencia a la penetración estándar) este crecimiento es más claro en los ensayos de corte en muestras reconstituidas, y esto se debe a que las muestras reconstituidas se realizan bajo condiciones controladas, caso contrario sucede con los ensayos realizados en muestras inalteradas las cuales pueden verse afectadas por factores intrínsecamente relacionados con la formación, reología y localización del perfil de suelo analizado, por tal razón los parámetros de Angulo de fricción obtenidos de ensayos en muestras inalteradas presentan un aumento del Angulo de fricción directamente proporcional al aumento de número N pero su comportamiento puede ser más heterogéneo.
- Se observó que los resultados de los ángulos de fricción con respecto al número N de spt no se ajusta a ninguna de las metodologías propuestas por los autores como se observa en la figura 20, pero si se detectó un comportamiento asimilable al comportamiento que describe la metodología según Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modificado por Wolff 1989.

- La ecuación  $\varphi = 30,1 + 0,5 * (N_1)_{60} - 0,0054 * (N_1)_{60}^{12}$  encontrada al aplicar al ajuste a la metodología de Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modification por Wolff 1989, nos genera resultados en el cálculo de ángulo de fricción con porcentajes de error menores que los encontrados al hacer regresiones potenciales, exponenciales, lineales, obteniendo una reducción con respecto a estas tres regresiones de aproximadamente 1%, ver tabla 11 y 13.
- Como se evidencia en la figura 21 se puede decir que el ángulo de fricción es directamente proporcional al aumento del peso unitario del material o muestra que se ensaya en el test del ensayo de corte directo.
- De acuerdo con los resultados de la tabla 17, en la que se describen los porcentajes de error, utilizando la ecuación  $\varphi = 0,77824\varphi_r - 2,1978\Delta\delta + 9,9723$  para el cálculo de ángulo de fricción en función del ángulo de fricción obtenido de ensayos sobre muestras remoldeadas y el delta de densidades se obtienen porcentajes de error de aproximadamente 1,4%, esto significa que se obtiene 1% menos de error del que se puede llegar a tener con la ecuación adaptada de de Meyerhof 1956 & Peck et al. 1974, modification por Wolff 1989, pero está a diferencia de la de Meyerhof y Peck, requiere como información previa conocer el ángulo de fricción o tener resultados de un ensayo de corte directo sobre muestra reconstituida y conocer la densidad a la profundidad deseada para calcular el ángulo de fricción.
- La ecuación encontrada para el cálculo de cohesión  $C = 72,117 * \tan(\varphi) - 41,096$ , correlaciona valores de cohesión muy similares a los obtenidos de ensayos de corte sobre muestras inalteradas, se obtienen resultados en un rango esperado, aun cuando algunos resultados presentan un porcentaje de error alto, con respecto a los valores obtenidos de los ensayos de corte directo inalterado, esto se genera debido a que los resultados del parámetro cohesión de los

ensayos de corte directo inalterado fluctúan, es decir que la cohesión no necesariamente describe un comportamiento creciente a medida que aumenta el ángulo de fricción, al igual que se puede determinar que la cohesión tampoco necesariamente aumenta con el aumento del peso unitario, es decir que la cohesión involucra otros factores externos como lo puede ser el porcentaje de finos o su índice de plasticidad. El aumento en el número n de penetración de spt, a veces es debido al aumento del material granular presente en el estrato, a mayor material granular se espera una menor cohesión, pero esto no aplica en todos los casos debido a que en ocasiones el aumento del n no se produce por el aumento en el porcentaje del material granular, si no por el aumento de su peso unitario, lo que hace que sea un estrato más compacto o denso. Independientemente si aumenta o no el porcentaje de material granular, es por esta razón que la cohesión no tiene un comportamiento directamente proporcional al N de SPT.

## 9. RECOMENDACIONES

- De acuerdo a la investigación realizada se recomienda utilizar para los materiales limo arenosos de la zona sur oriental de Floridablanca, de clasificación USCS: ML con características similares a las presentadas en la caracterización del estudio, se utilice la ecuación  $\varphi = 30,1 + 0,5 * (N_1)_{60} - 0,0054 * (N_1)_{60}^{12}$ .
- Si se cuenta con ensayos de corte directo realizados sobre muestras alteradas, se recomienda que se ajuste el parámetro de ángulo de fricción con la ecuación  $\varphi = 0,77824\varphi_r - 2,1978\Delta\delta + 9,9723$ , donde se define el ángulo de fricción en función del ángulo de fricción de ensayos con muestra reconstituidas y el delta de densidad.

## BIBLIOGRAFÍA

ALIRIO, C. E. Geología y Geotecnia de la zona oriental del área metropolitana de Bucaramanga, sector Morrórico-Floridablanca. Tesis de Grado. Bucaramanga, Santander, Colombia. 1991.

ASTM D 1586-11. Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils. 2011.

ASTM D 653-01. Standard Terminology Relating to Soil, Rock, and Contained Fluid. 2003. p. 2.

BRAJA, M Das. Fundamentos de ingeniería geotécnica. International Thomson Editores, S.A. de C.V. California state. 2012.

CDMB. Amenaza de Inundación y Erosión en el río de Oro. Bucaramanga. 2005

Duque-Escobar, G. Manual de Geología para Ingenieros. Manizales. 2016

Dwight E. y Richard Goldsmith, J. C. Mapa geológico de Colombia, cuadrángulo H-12 Bucaramanga. 1973

GORGAS GARCÍA, Javier; CARDIEL LÓPEZ, Nicolás y ZAMORANO CALVO, Jaime. Estadística Básica para Estudiantes de Ciencias. Universidad Complutense de Madrid, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas INV E-111-13. Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo con tubo partido. Bogotá D.C., 2013

CARMONA-ÁLVAREZ, J. E. y RUGE-CÁRDENAS, J.C. Análisis de las correlaciones existentes del ángulo de fricción efectivo para suelos del piedemonte oriental de Bogotá usando ensayos in situ, Tecno Lógicas, vol. 18, No. 35, pp. 93-104, 2015.

ORTIZ URIBE, Frida Gisela. Diccionario de Metodología de la Investigación Científica. México. Limusa. 2004. p. 1

PALACIOS, S. J. Energy dynamics of SPT. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1979

SKEMPTON, A. W. Standar Penetration Test, procedures and the effects in sand of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation.USA. 1986

SKEMPTON, A. W. Standar Penetrarion Test, Procedures and the Effect in Sand of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Agening and Over Consolidation. 1986.

SUÁREZ Jaime. Deslizamientos-Análisis Geotécnico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

WARD, W. e. Geología del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona. Bogotá. 1973