UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS COHESIÓN (C) Y ÁNGULO DE FRICCIÓN (Ø) OBTENIDOS CON ENSAYOS TRIAXIALES UU Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL CPT (FS y QC)

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR: KEVIN STALYN GUANINA OTO

TUTOR: FREDDY ISRAEL RODRÍGUEZ BADILLO

Quito - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Kevin Stalyn Guanina Oto con documento de identificación N°1753351210; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de marzo del 2025

Atentamente,

Kevin Stalyn Guanina Oto
1753351210

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESINA

Yo, Kevin Stalyn Guanina Oto con documento de identificación N°1753351210; expreso mi voluntad y por medio del presente documente cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de Investigación: "Correlación entre las propiedades geomecánicas cohesión (c) y ángulo de fricción (ø) obtenidos con ensayos triaxiales uu y los parámetros de resistencia del cpt (fs y qc)", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente de derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de marzo del 2025

Atentamente,

Kevin Stalyn Guanina Oto
1753351210

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABJO TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N°1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS COHESIÓN (C) Y ÁNGULO DE FRICCIÓN (Ø) OBTENIDOS CON ENSAYOS TRIAXIALES UU Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL CPT (FS Y QC), realizado por Kevin Stalyn Guanina Oto con documento de identificación N°1753351210, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de marzo del 2025

Atentamente,

Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc.
1720094026

CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS COHESIÓN (C) Y ÁNGULO DE FRICCIÓN (Ø) OBTENIDOS CON ENSAYOS TRIAXIALES UU Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL CPT (FS Y QC)

CORRELATION BETWEEN GEOMECHANICAL PROPERTIES COHESION (C) AND FRICTION ANGLE (Ø) OBTAINED FROM UU TRIAXIAL TESTS AND CPT RESISTANCE PARAMETERS (FS AND QC)

Kevin Guanina-Oto[1], Freddy Rodríguez-Badillo[2]

Resumen

El siguiente estudio se realizó con el objetivo de establecer correlaciones entre las propiedades geomecánicas cohesión (C) y ángulo de fricción interna (Ø) en función de los parámetros de resistencia de cono (qc) y fricción (fs) obtenidos de con sondeos CPT (Cone Penetration Test) en suelos mixtos (arena y limos); con el fin de evaluar dichos parámetros geomecánicos (C, Ø) logrando una optimización en costos y optimización de diseños geotécnicos. Con puntos de exploración definidos, se realizó sondeos con el ensayo CPT para obtener los valores de resistencia ya mencionados. Posteriormente, se tomaron muestras de suelo inalteradas, las cuales fueron sometidas a ensayos triaxiales UU en el laboratorio de mecánica de suelos, con el objetivo de determinar los parámetros geomecánicos. A continuación, se emplearon métodos de regresión lineal para analizar la relación entre las variables obtenidas en el campo y en el laboratorio. En los resultados, se presentó las ecuaciones encontradas con las correlaciones y análisis estadísticos de datos.

Palabras Clave: Ángulo de fricción, cohesión, Cone Pentration Test (CPT), correlaciones estadísticas, suelos de Quito, ensayos Triaxial UU.

Abstract

The following study was conducted to establish correlations between the geomechanical properties of cohesion (C) and friction angle (Ø) bases on the cone resistance (qc) and friction (fs) parameters obtained from the Cone Penetration Test (CPT) in mixed soil (sand and silts). The aim was to evaluate these geomechanical parameters (C, Ø), archieving cost reduction and optimization in various geotechnical designs.

Once the exploration point were defined, CPT test were conducted to obtain resistance values (qc) and (fs). Subsequently, undisturbed soil samples were collected and subjected to UU triaxial tests (unsatured) in the soil mechanics laboratory to determine the geomechanical parameters (C) and (Ø). Next, linear regression methods were employed to analyze the relationship between the variables obtained in the field and those determined in the laboratory.

The results presented the equations derived from correlations and along with a detailed analysis of statistical data.

Keywords: Internal friction angle, cohesion, Cone Penetration Test (CPT), statistical correlations, soils of Quito, UU triaxial tests.

[1] Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: kguanina@est.ups.edu.ec
[2] Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador
Autor para correspondencia: frodriguezb1@ups.edu.ec

1. Introducción

En la actualidad, la obtención de parámetros geomecánicos como el ángulo de fricción interna (Ø) y la cohesión (C) es fundamental para caracterizar el comportamiento de los suelos. Las pruebas de penetración CPT han demostrado ser una herramienta eficaz para estimar estos parámetros de manera indirecta mediante correlaciones empíricas. Entre las correlaciones más relevantes, Robertson en el año 1986 realizó una correlación entre la resistencia de cono (qc) y cohesión (C) para suelos cohesivos como arcillas y limos, utilizando una variable de corrección que indica el tipo de suelo y el índice de plasticidad [1], por su parte, Kulhawy y Focht en el año 1988 propusieron un método para encontrar el ángulo de fricción interna (Ø) a partir de la resistencia de fricción lateral (fs) en suelos granulares, como arenas y gravas, utilizando una relación empírica que utiliza las experiencias en proyectos de ingenierías geotécnicos [2], finalmente, Mayne en el año 2000 planteó una correlación entre la resistencia de cono (qc) y el ángulo de fricción (Ø), tomando en cuenta la reacción de la densidad y el tipo de arena [3].

Este estudio busca abordar la necesidad de desarrollar correlaciones específicas para suelos mixtos, compuestos por arenas y limos, a partir de datos obtenidos mediante pruebas de penetración con cono (CPT) y ensayos triaxiales no consolidados no drenados (UU). Aunque existen avances significativos en la interpretación de los parámetros de resistencia del CPT, como la resistencia de cono (qc) y la resistencia de fricción lateral (fs), no se dispone de correlaciones que permitan estimar el ángulo de fricción interna (Ø) y la cohesión (C) en este tipo de suelos.

El objetivo principal de este estudio es proponer ecuaciones confiables, desarrolladas mediante análisis estadísticos que incluyen regresiones lineales múltiples, para facilitar la estimación de los parámetros geomecánicos en suelos mixtos. Estas ecuaciones están diseñadas para mejorar la caracterización de estos suelos y ampliar su aplicabilidad en proyectos de ingeniería geotécnica, ofreciendo herramientas más precisas para su análisis y diseño.

2. Muestras de suelo y Métodos

2.1. Sitios de exploración

En la Figura 1, se indica los puntos de exploración donde se realizaron la serie de ensayos CPT y la toma de muestras para el laboratorio de mecánica de suelos, que se seleccionaron con la microzonificación de Quito tomando en cuenta a la zona en la que se encuentra y el tipo de suelo.

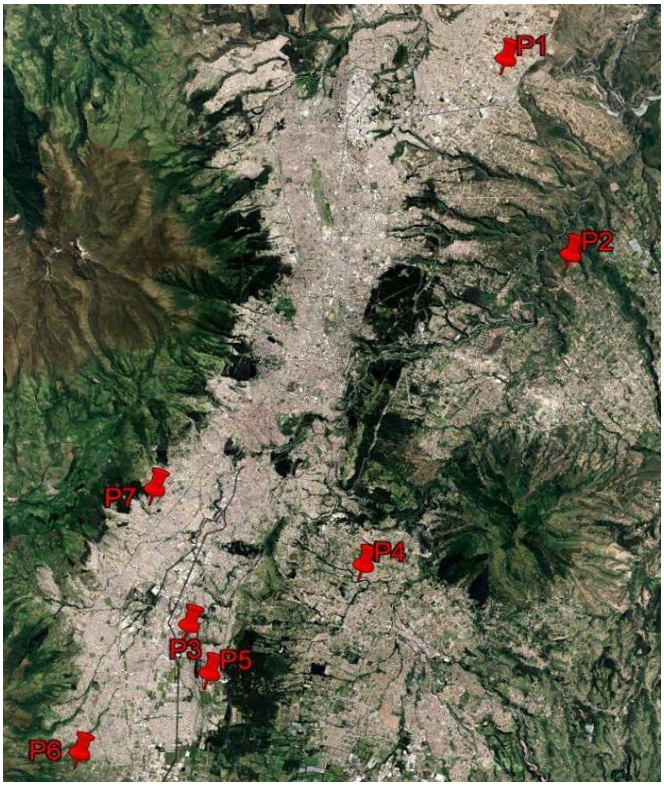


Figura 1. Ubicación de perforaciones.

En la Tabla 1 se detalla los puntos de exploración ubicados en diferentes zonas de Quito.

Tabla 1: Ubicación de los puntos de exploración

No	Sector	Latitud [°]	Longitud [°]	Código
1	Calderón	-0.093	-78.424	P1
2	Tumbaco	-0.165	-78.401	P2
3	Guajalo	-0.302	-78.536	P3
4	Conocoto	-0.281	-78.475	P4
5	La Cocha	-0.320	-78.528	P5
6	Paquisha	-0.349	-78.573	P6
7	La Biloxi	-0.252	-78.548	P7

2.2. Metodología

2.2.1. Ensayos CPT

El presente ensayo, consiste en penetrar un cono al suelo hasta llegar a la profundidad deseada, en este caso 2 m, con el objetivo de proporcionar datos de resistencia del suelo [4]. Este ensayo se realiza utilizando un equipo especializado que consta de las siguientes partes principales:

- **Cono:** Es la punta metálica cónica, diseñada para medir la resistencia de cono (qc) y fricción (fs) al penetrar el suelo.
- **Marco CPT:** Parte que se le posiciona en el suelo como base para nivelación del equipo CPT.
- **Torre CPT:** Es la sección encargada de guiar la penetración del cono al suelo, compuesta por manivelas y cadenas que facilitan y controlan al proceso de la penetración.
- **Anclajes:** Elemento que fija la torre CPT al suelo.
- **Barra de sujeción:** Es la encargada de fijar los anclajes con el CPT
- **Varillas:** Son tubos que se unen al cono, permitiendo un mayor alcance en la perforación.

En la Figura 2 se observa la ejecución del ensayo CPT con sus partes.

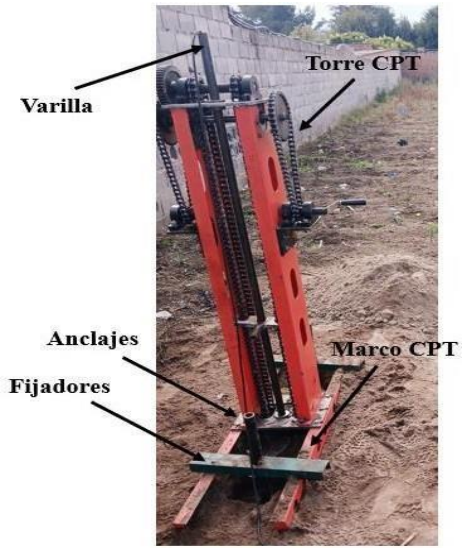


Figura 2. Equipo Cone Pentration Test (CPT) y sus partes.

El ensayo midió los siguientes parámetros: resistencia de cono (qc) y fricción lateral (fs) en kilopascales.

La metodología es:

- Se realizó una limpieza del suelo superficial como: pasto, rocas, ramas, escombros o vegetación densa para la nivelación del equipo y evitar que exista obstáculos al penetrar el cono al suelo.
- Posteriormente, se realizó tres perforaciones con el barreno de motor: una perforación central, con una profundidad aproximada de entre 40 a 50 cm, donde se introdujo el cono del CPT y midió los parámetros de resistencia; y dos perforaciones adicionales, ubicados a una distancia de 30 cm a cada lado de la perforación central para anclar el CPT, con la misma profundidad, como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Perforaciones realizadas con el barreno de motor, para la instalación del equipo del CPT.

- Se colocó dos marcos como soportes, paralelos a las tres perforaciones, y sobre ellos se instala el equipo CPT, fijándolo con pernos. Una vez nivelado y centrado a la guía de la perforación central, se procedió a introducir los anclajes en cada una de las perforaciones laterales hasta alcanzar una profundidad de 1,5 m. Posteriormente, se insertó la barra de

sujeción en cada anclaje, de forma perpendicular fijando al equipo CPT, tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Sistema de CPT, anclado y nivelado al suelo.

- Con acoples que unen al cono CPT y las varillas, para tener un mayor alcance en la profundidad, se introdujo en medio de la torre CPT, posteriormente, girando las manivelas se introdujo el cono, y mediante un sistema de adquisición de datos se transmite a una Tablet los valores de (qc) y (fs) cada 0,01m tal como observa en la Figura 5.

Figura 5. Proceso de medición de datos del CPT.

2.2.2. Parámetros del suelo obtenidos a partir de datos CPT.

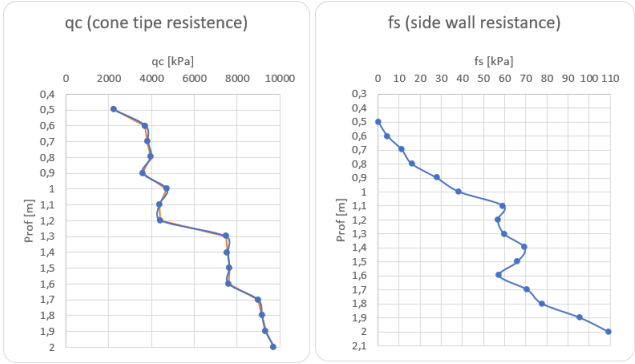


Figura 6. Graficas de resistencia qc y fs del CPT.

Con las gráficas del qc y fs obtenidos, tal como se muestra en la Figura 6, se procedió a calcular datos adicionales utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\gamma}{\gamma w} = \left[0.27 * [\log Rf] + 0.36 \left[\log\left(\frac{qc}{pa}\right)\right] + 1.236\right] * \frac{Gs}{2.65} \qquad (1)$$

$$Rf = \frac{fs}{qc} * 100\% \qquad (2)$$

Donde:

- γ (t/m3): peso específico.
- Rf (%): relación de fricción.
- Pa (100 kPa): presión atmosférica.
- Gs: gravedad especifica.

$$Qt = \frac{qc - \sigma vo}{\sigma' vo} \qquad (3)$$

$$Ic = [(3.47 - \log(Qt))^2 + (\log(Fr) + 1.22)^2]^{0.5} \qquad (4)$$

$$Fr = \frac{fs}{qc - \sigma vo} * 100 \qquad (5)$$

Donde:

- *Qt*: resistencia de punta de cono normalizada.
- σ_{vo} (t/m2): esfuerzo vertical inicial total.
- σ'_{vo} (t/m2): esfuerzo vertical inicial efectiva.
- *Ic:* índice del tipo de comportamiento del suelo.
- *Fr:* relación de fricción normalizada.

La Tabla 2 se indica el tipo y el comportamiento del suelo. El cual puede clasificarse en función del valor de Ic [5].

Tabla 2: Tabla de tipo de comportamiento del suelo

Zona	Tipo de comportamiento del suelo	Ic
1	Sensible, de grano fino	N/A
2	Suelos orgánicos - arcillosos	>3.6
3	Arcillas - arcilla limosa a arcilla	2.95-3.6
4	Mezclas de limo: limo arcilloso a arcilla limosa	2.6-2.95
5	Mezclas de arena: arena limosa a limo arenoso	2.05-2.6
6	Arenas: arena limpia a arena limosa	1.31-2.05
7	Arena de grava a arena densa	<1.31
8	Arena muy dura a arena arcillosa	N/A
9	Muy rígido, de grano fino	N/A

2.2.3. Obtención de muestras inalteradas.

Para la toma de muestras inalteradas, se excavaron calicatas de 2,0 x 1,0 x 2 m, tal como se muestra la Figura 7, de donde se extrajeron las muestras inalteradas con forma cúbica de 30 cm. Las muestras se envolvieron con plástico film y se sellaron completamente, como se observa en la Figura 8, evitando la pérdida de humedad del suelo. Estas muestras se transportaron al laboratorio de mecánica de suelos en condiciones controladas para evitar alteraciones.

Figura 7. Calicata para la toma de muestras.

Figura 8. Muestra cubica sellada con plástico film.

2.2.4. Ensayos triaxiales UU (no consolidado no drenado).

El siguiente ensayo consiste en aplicar una carga axial a una muestra cilíndrica con una relación de altura-diámetro especifica de dos. La probeta se coloca a una cámara presurizada con agua que representa a la presión de confinamiento (σ_3). Durante el ensayo, la carga axial se incrementó de forma constante y controlada hasta la rotura de la muestra, lo que permitió obtener los datos necesarios para el cálculo de los parámetros geomecánicos del suelo [6]. En la Figura 9 se muestra el ensayo Triaxial UU.

Figura 9. Ensayo triaxial UU (no consolidado no drenado).

Para este ensayo, se realizó la siguiente metodología, siguiendo las recomendaciones descritas en el artículo [6] sobre el procedimiento de laboratorio para muestras de suelo.

- Con las muestras inalteradas obtenidas anteriormente, se procedió a tallar tres probetas por cada muestra inalterada [7], utilizando un molde cilíndrico con un diámetro de 7 cm y una altura de 14 cm. Posteriormente, se los selló con funda plástica transparente para evitar la pérdida de humedad hasta la realización del ensayo, tal como se observa en la Figura 10.

Figura 10. Tallado de probetas para el ensayo Triaxial UU.

- Se tomaron datos de la probeta tallada utilizando un calibrador, como los diámetros, la altura y el peso con una balanza analítica. Luego, con el tubo succionador con un diámetro de 38,1 mm [8] y la membrana en su interior, se colocó sobre al espécimen.
- Con la probeta ya preparada, se procedió a instalarla en el equipo Triaxial. En el cabezal inferior se colocó una piedra porosa, seguida de un papel filtro, y sobre ellos se colocó la probeta con la membrana. Posteriormente, se selló con ligas en los extremos de la membrana en la parte inferior. En la parte superior se realizó el mismo procedimiento, colocando un papel filtro, seguido de una piedra porosa y, finalmente, el cabezal superior, asegurada con los anillos de goma, como se observa en la Figura 11. Luego, se verifico que todo este limpio, y se montó la celda triaxial alrededor de la probeta, ajustándola cuidadosamente para evitar cualquier tipo de filtración, como se puede apreciar en la Figura 9.

Figura 11. Sellado del espécimen en el equipo Triaxial.

- Con la probeta instalada en el equipo, se procedió a llenar la celda con agua y a aplicar una presión de confinamiento (σ_3). Una vez estabilizada dicha presión, se inició el ensayo, durante el cual se aplica una carga axial mediante un pistón en contacto con la tapa superior de la muestra hasta que esta falle, como se muestra en la Figura 12. El equipo triaxial está equipado

con sensores de carga que miden la carga axial, y con un transductor de desplazamiento que mide la deformación vertical. Estos sensores están conectados a una computadora con un software especializado, que proporciona los datos de carga axial en Newtons [N] y la deformación vertical en milímetros [mm]. Este procedimiento se realiza con las tres probetas para una presión de confinamiento de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa.

Figura 12. Falla de la muestra.

- Con los datos de la carga axial y la deformación vertical obtenidos durante el ensayo triaxial UU, se llevaron a cabo los siguientes cálculos:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{Lo} * 100 \quad (6)$$

$$Ac = \frac{Ao}{(1 - \frac{\varepsilon}{100})} \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{P}{Ac} \quad (8)$$

Donde:

- ε (%): deformación unitaria.
- ΔH (mm): deformación vertical.
- Lo (mm): Altura inicial de la probeta.
- Ac (cm^2): Área corregida de la probeta.
- Ao (cm^2): Área inicial de la probeta.
- P (kg): Carga Axial.
- σ (kg/cm^2): Esfuerzo de compresión.

Con el esfuerzo de compresión calculado y la deformación unitaria, se obtiene el gráfico esfuerzo-deformación, como se indica en la Figura 13. A partir de este gráfico, se identifica el esfuerzo desviador (σ_d), que corresponde al esfuerzo de compresión máxima, utilizado para el cálculo del esfuerzo mayor principal ($\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d$) y el esfuerzo menor principal o presión de confinamiento (σ_3).

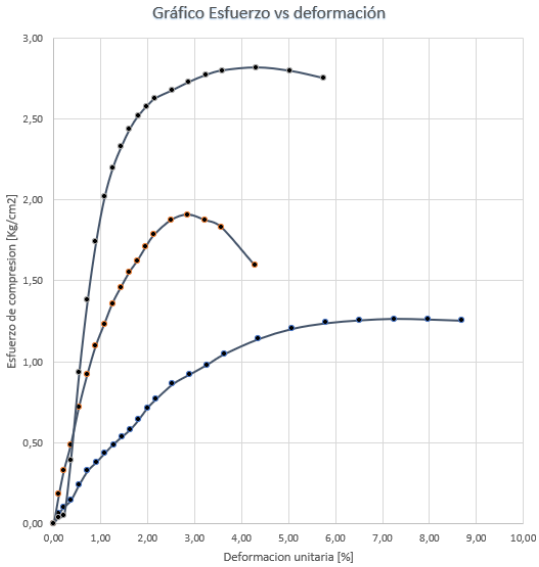


Figura 13. Gráfico esfuerzo-deformación.

- Con los datos del σ_1 y σ_3, se calcula el radio ($r = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$) y el centro ($c = (\sigma_3 + r)$) para trazar los círculos de Mohr [6]. Posteriormente, se dibujan estos círculos en la gráfica esfuerzo cortante-esfuerzo normal (σ_n, □). A partir de los círculos, se traza una evolvente de falla que conecta las tangentes de los mismo. Esta envolvente permite determinar los parámetros geomecánicos, como la cohesión (C) y el Angulo de fricción interna (Ø), tal como se muestra en la Figura 14.

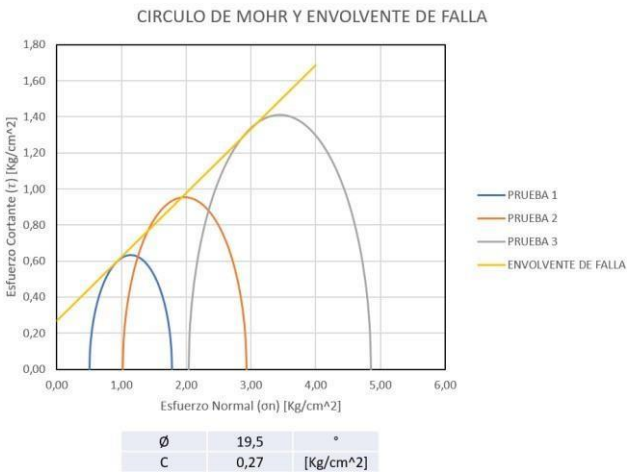


Figura 14. Gráfico Esfuerzo cortante-Esfuerzo normal, círculos de Mohr y envolvente de falla.

2.2.5. Análisis de datos.

A partir de los datos obtenidos en los ensayos, presentados en el anexo 1 (parámetros de resistencia del CPT), el anexo 2 (parámetros geomecánicos obtenidos con triaxial UU) y el anexo 3 (datos adicionales calculados con los parámetros del CPT), se desarrolló el análisis con la metodología descrita a continuación:

- Con los parámetros de resistencia qc y fs, así como los datos adicionales obtenidos con el CPT (Resistencia de cono (qc), resistencia de fricción (fs), peso específico (γ), relación de fricción (Rf), índice de comportamiento del suelo (Ic), resistencia de punta de cono normalizada (Qt) y relación de fricción normalizada (Fr)) y los parámetros geomecánicos del suelo Cohesión (C) y ángulo de fricción (Ø) obtenidos mediante los triaxiales UU, previamente ordenados en una hoja de cálculo, se ingresaron los datos en el software estadístico para obtener las correlaciones.
- Con los datos ya ingresados en el software, se seleccionaron las técnicas de regresión lineal múltiple para obtener una ecuación significativa, utilizando las variables dependientes y las variables independientes detalladas en la Tabla 3.

Tabla 3: Variables dependiente e independientes.

Tipo de variables	Descripción
Dependientes	Cohesión (C) Angulo de fricción (Ø)
Independientes	Resistencia de cono (qc), resistencia de fricción (fs), peso específico (γ), relación de fricción (Rf), índice de comportamiento del suelo (Ic), resistencia de punta de cono normalizada (Qt) y relación de fricción normalizada (Fr)

2.2.5.1. Regresión lineal múltiple.

$$Y = \beta 0 + \beta 1 * X1 + \beta 2 * X2 + \cdots + \beta n * Xn + \varepsilon \qquad (9)$$

Este método de regresión permite modelar la relación entre una variable dependiente Y en función de dos o más variable independientes X1, X2,…, Xn. El objetivo es determinar cuáles y cuántas de estas variables independientes se relaciona mejor con la variable dependiente, utilizando el intercepto β0 y coeficientes de regresión β1, β2,…, βn [9].

2.2.5.2. Verificación y validación de correlaciones.

Para evaluar si las correlaciones realizadas, como la regresión lineal múltiple, cumple con los supuestos establecidos, se llevó a cabo las siguientes verificaciones:

- Los residuos representan el error o la diferencia entre los datos reales y los valores predichos por el modelo. Se verifica que estos residuos no manifiesten un patrón, como la formación de una curva o un comportamiento repetitivo. Si los residuos están distribuidos de forma aleatoria, se considera que el modelo es adecuado [10].
- La mayoría de los residuos o errores deben ser valores pequeños, con solo unos pocos

muy grandes. Para verificar esto, se utiliza una gráfica conocida como Q-Q Plot, que compara los errores observados con una línea perfecta, permitiendo evaluar su distribución.

- Para la prueba de independencia de los residuos, se verifico que exista una independencia entre ellos, es decir que no estén relacionados entre sí. Esto se evalúa mediante la prueba de Durbin-Watson, cuyo valor cercano a 2 significa que los residuos son independientes. En cambio, valores cercanos a 0 o 4 indican que los residuos están relacionados [11].
- La multicolinealidad se refiere a la situación en la que dos o más variables predictoras están fuertemente relacionadas entre sí, lo que puede generar confusión en el modelo. Para verificar esto, se utiliza la herramienta VIF (Factor de inflación de la varianza). Un VIF menor a 5 indica que las variables utilizadas están adecuadamente correlacionadas, mientras que un valor mayor sugiere que una variable esta redundante o es muy similar a otra. En este caso, se debe eliminar la variable redundante o ajustar el modelo para mejorar su precisión [12].
- Cada variable predictora en el modelo tiene un coeficiente que indica su importancia. Para verificar si un coeficiente es importante, se utiliza una prueba de hipótesis. La hipótesis nula establece que el coeficiente de la variable es igual a cero, lo que significa que la variable no tiene efecto significativo en el modelo. La prueba de hipótesis se realiza utilizando el t de Student, que calcula la relación entre el coeficiente estimado y su error estándar. Si el valor p asociado al t de Student es menor a $\alpha = 0.05$, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que la variable es importante para el modelo. En cambio, si el valor p es mayor a $\alpha = 0.05$, no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que la variable no aporta significativamente al modelo y puede ser eliminada [13].
- Se utilizo el R^2, que mide la proporción de la variabilidad total en la variable dependiente explicada por el modelo de regresión. Su valor varía entre 0 y 1, donde un R^2 cercano a 1 indica que el modelo tiene un buen ajuste con los datos observados. Sin embargo, para evitar el sobreajuste del modelo, se utiliza un R^2 ajustado, que penaliza el uso de variables innecesarias o irrelevantes [14].
- Para la aplicación de técnicas estadísticas paramétricas, uno de los supuestos más importantes es que los datos sigan una distribución normal. Con el fin de verificar este supuesto, se realizaron diferentes pruebas de normalidad. Primero, se examinó la distribución de los datos mediante gráficos de histograma y diagramas Q-Q (quantile-quantile), que permiten observar visualmente si los datos se ajustan a una distribución normal. Si los resultados de estas pruebas fueron significativos ($p < 0.05$), se rechazó la hipótesis nula de normalidad, lo que indicaría que los datos no siguen una distribución normal [15].

3. Resultados y Discusión

A partir de los datos obtenidos en los ensayos, presentados en el anexo 4, se realizaron análisis estadísticos para la predicción de los parámetros geomecánicos cohesión (C) y Ángulo de fricción interna (Ø), en el siguiente apartado, se presentan los hallazgos principales.

3.1. Análisis estadístico de datos con el software.

3.1.1. Análisis de Regresión lineal múltiple.

Se presentan los resultados obtenidos del análisis de regresión lineal múltiple aplicados a los datos de los ensayos CPT y triaxiales UU. Se obtuvieron dos modelos que relaciona los parámetros de qc y fs con las variables dependientes correspondientes, buscando determinar la relación

de estos parámetros con la cohesión (C) y el ángulo de fricción (Ø).

3.1.1.1. Análisis para el ángulo de fricción.

A continuación, en la tabla 4, se presenta la ecuación obtenida mediante la regresión lineal múltiple:

Tabla 4: Correlación obtenida entre las variables independientes y dependientes para el ángulo de fricción.

Ángulo de fricción
Ø = 9,78519 + 0,0187759* qc [kPa] - 0,167544*fs [kPa] + 3,22851*Rf [%] - 0,568842*Qt

Donde:

- Ø: Ángulo de fricción interna (grados).
- qc: Resistencia de cono (kPa)
- fs: Resistencia de fricción (kPa)
- Rf: Relación de fricción (%)
- Qt: Resistencia de punta de cono normalizada.

Tabla 5: Resultados de modelo de regresión para el ángulo de fricción.

Variable predictora	Coeficiente de β	Error Estándar	Valor t-student	Valor -P	Intervalos de confianza (95%)
Intercepto (β0)	9.78519	3.868	2.530	0.127	[-6.86, 26.43]
qc	0.0187759	0.0078	2.401	0.138	[-0.01, 0.05]
fs	-0.167544	0.090	-1.860	0.204	[-0.55, 0.22]
Rf	3.22851	1.930	1.673	0.236	[-5.07, 11.53]
Qt	-0.568842	0.273	-2.087	0.172	[-1.74, 0.60]

De acuerdo con la tabla 5, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple, entre el ángulo de fricción (Ø) y las variables predictoras (qc, fs, Rf y Qt). Aunque los valores -p individuales son mayores que (α=0.05), esto no significa que el modelo no sea útil. Además, se puede observar que los coeficientes de qc (0.0187759) y Rf (3.22851) sugiere que, si qc y Rf aumenta, entonces el ángulo de fricción podría aumentar. Por otro lado, los coeficientes negativos de fs y Qt, indican que a medida que estos valores aumentan, el ángulo de fricción disminuye.

Tabla 6: Análisis de varianza (ANOVA) para el ángulo de fricción.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	G. L	Cuadrado medio	Valor -F	Valor -p
Modelo	655.588	4	163.897	16.41	0.005
Residuo	19.9805	2	9.990		
Total	675.569	6			

En la tabla 6, de acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) se obtuvieron los siguientes datos, el valor –F de 16.41 y el valor –p de 0.005 el mismo que es menor al 0.05 lo que a su vez evidencia que este modelo tiene validez.

Tabla 7: Calidad del ajuste del modelo para el Ángulo de fricción.

Métrica	Valor
R^2	97.04 %
R^2 ajustado	91.127%
Error Estándar de la estimación	3.161
Durbin-Watson	1.67

En la tabla 7, se observa un R^2 para el ajuste del modelo del ángulo de fricción, el mismo que indica un valor de 97.042% de variabilidad así también, se observa un R^2 ajustado con un valor de 91.127% lo que da como resultado que tiene una capacidad explicativa positiva. Así mismo el error estándar de estimación tiene un valor de 3.161 lo que determina que es un valor aceptable y por otra parte el valor estadístico Durbin-Watson es de 1.67 cuyo valor es cercano a 2 determinando que este modelo es válido.

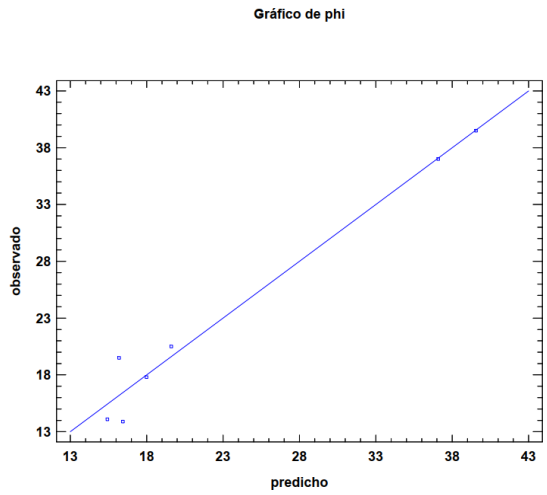


Figura 15. Gráfico de Phi, observado vs predicho.

En la Figura 15, se puede observar que los valores de ángulo de fricción se ajustan de manera moderada a la tendencia general y predice adecuadamente estos valores.

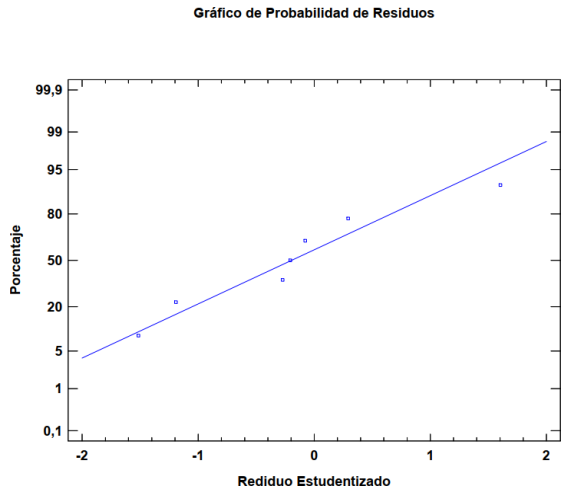


Figura 16. Gráfico de probabilidad de residuos del ángulo de fricción.

Según la Figura 16, el modelo de regresión utilizado genera residuos que se asignan de manera normal. Esto indica que el modelo se ajusta bien a los datos y que los supuestos de normalidad de los residuos, son necesarios para realizar inferencias estadísticas, se cumplen de manera aproximada.

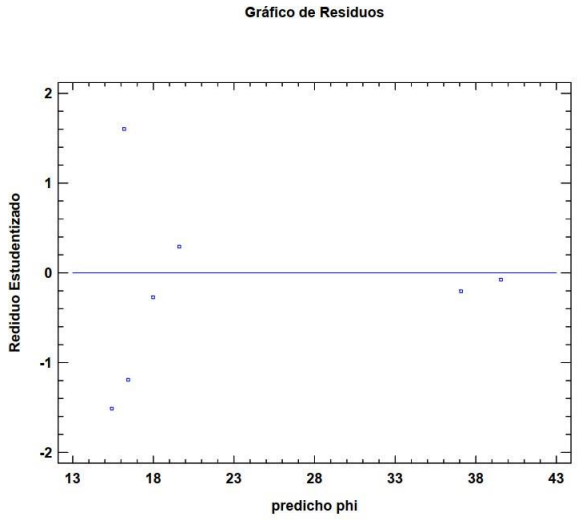


Figura 17. Gráfico de residuos del ángulo de fricción.

En la figura 17, se observa que la distribución aleatoria de los residuos y la ausencia de patrones, sugieren que el modelo está capturando la relación entre las variables de manera adecuada. Esto aumenta la confianza en los resultados del análisis de regresión y permite realizar inferencias estadísticas válidas.

3.1.1.2. Análisis para la cohesión.

A continuación, en la tabla 8, se presenta la ecuación obtenida mediante la regresión lineal múltiple:

Tabla 8: Correlación obtenida entre las variables independientes y dependientes para la cohesión.

Cohesión
C = -16,3774 + 10,0254* γ [t/m3]+ 0,000869711*qc [kPa] - 0,0347028*fs [kPa] + 0,304655*Rf [%]

Donde:

- C: Cohesión (t/m^2)
- γ: Peso específico del suelo (t/m^3)
- qc: Resistencia de cono (kPa)
- fs: Resistencia de fricción (kPa)
- Rf: Relación de fricción (%)

Tabla 9: Resultados de modelo de regresión para la cohesión.

Variable predictora	Coeficiente de β	Error Estándar	Valor t-student	Valor -P	Intervalos de confianza (95%)
Intercepto (β0)	-16.3774	11.976	-1.368	0.305	[-67.90, 36.14]
γ	10.0254	7.030	1.426	0.289	[-20.22, 40.27]
qc	0.000869711	0.00004	24.452	0.002	[-0.0007, 0.001]
fs	-0.0347028	0.017	-1.936	0.193	[-0.111, 0.04]
Rf	0.304625	0.155	1.965	0.188	[-0.36, 0.97]

En la tabla 9, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple, entre la cohesión (C) y las variables predictoras (γ, qc, fs, y Rf). Aunque la mayoría de valores -p individuales son mayores que (α=0.05), esto no quiere decir que no sea apropiado. Además, se puede observar que los coeficientes positivos de γ, qc y Rf sugieren que, si estos valores aumentan, entonces la cohesión incrementaría. Por otro lado, el coeficiente negativo de fs, indican que a medida que este valor aumenta, la cohesión disminuye.

Tabla 10: Análisis de varianza (ANOVA) para la cohesión.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor -F	Valor -p
Modelo	81.642	4	20.410	395.86	0.0025
Residuo	0.103	2	0.051		
Total	81.745	6			

En la tabla 10, de acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) se obtuvieron los siguientes datos, el valor –F de 395.86 que es un valor significativamente alto dando como valor de –p el 0.0025 el mismo que es menor al 0.05 lo que a su vez evidencia que este modelo tiene validez.

Tabla 11: Calidad del ajuste del modelo para la cohesión.

Métrica	Valor
R^2	99.87 %
R^2 ajustado	99.622%
Error Estándar de la estimación	0.227
Durbin-Watson	1.37

Por otro lado, en la tabla 5 se observa un R^2 para el ajuste del modelo de la cohesión, el mismo que indica un valor de 99.874% de variabilidad así también se observa un R^2 ajustado con un valor de 99.622% lo que da como resultado que tiene una capacidad explicativa positiva. Así mismo el error estándar de estimación tiene un valor de 0.227 lo que determina que es un valor muy bajo, este indica que existe una alta precisión en la predicción y por otra parte el valor estadístico Durbin-Watson es de 1.37 cuyo valor es cercano a 2 determinando que este modelo es válido.

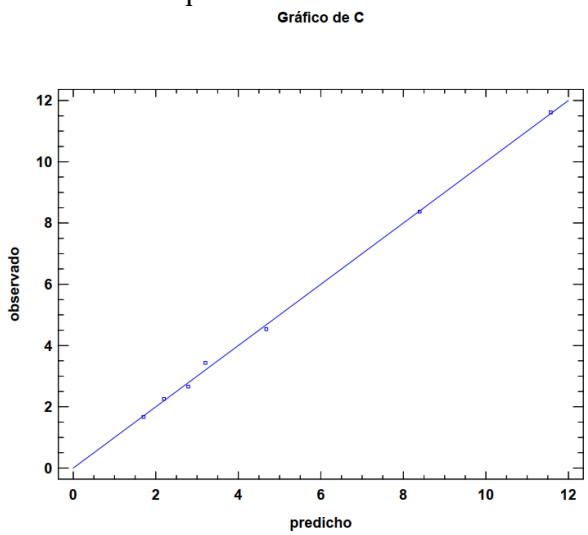


Figura 18. Gráfico de la cohesión, observado vs predicho.

En la Figura 18, sugiere que las predicciones se ajustan bien al modelo. Los puntos cercanos a la línea diagonal indican que los valores predichos están cerca de los valores reales.

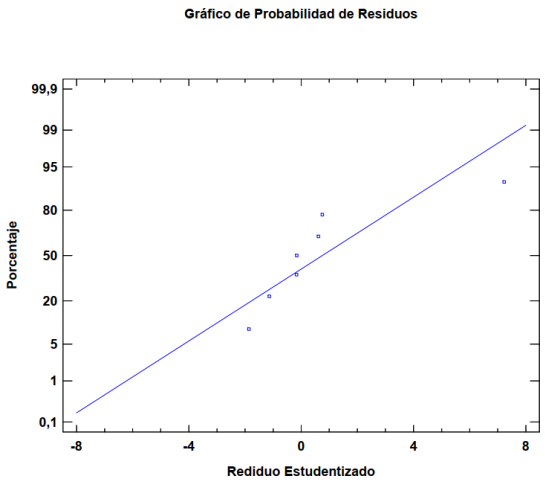


Figura 19. Gráfico de probabilidad de residuos de la Cohesión.

Basándonos en la Figura 19, se puede ver que el modelo de regresión utilizado genera residuos que se distribuyen de manera normal. Esto es un indicativo de que el modelo se ajusta bien a los datos y que los supuestos de normalidad de los residuos, necesarios para realizar inferencias estadísticas, se cumplen de manera aproximada.

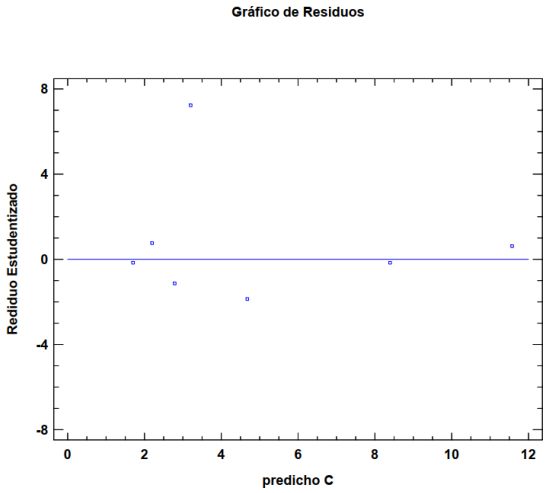


Figura 20. Gráfico de residuos de la Cohesión.

En la Figura 20 se puede observar, la distribución aleatoria de los residuos y la ausencia de patrones sugieren que el modelo está capturando la relación entre las variables de manera adecuada. Los supuestos de normalidad y homocedasticidad se cumplen de manera aproximada: Esto aumenta la confianza en los resultados del análisis de regresión y permite realizar inferencias estadísticas válidas.

4. Conclusiones

Los análisis estadísticos realizados indican que los modelos de regresión lineal múltiple desarrollados son válidos para la predicción de los parámetros geomecánicos: ángulo de fricción interna (Ø) y cohesión (C). Esto se respalda en los valores de R^2, cercanos al 100% (97.042% y 99.874%), los cuales explican una gran parte de la variabilidad de datos en los modelos.

Los valores ajustados de R^2 (91.127% y 99.622%) y los bajos errores estándar de estimación (0.227 y 3.161) demuestran que los modelos tienen una capacidad explicativa positiva y una alta precisión en la predicción de los parámetros geomecánicos. Adicionalmente, los valores de Durbin-Watson (1.37 y 1.67) confirman la ausencia de autocorrelación en los residuos, validando así la independencia de las observaciones.

Aunque la mayoría de los interceptos presentan valores -p mayores a 0.05, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula, es decir, que $\beta = 0$, se interpreta que estos valores no son importantes y podrían eliminarse del modelo, Sin embargo, su inclusión es importante para mantener la validez general del modelo, ya que excluirlos forzaría al modelo a pasar por el origen, lo que podría hacer que R^2 disminuya.

Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) refuerzan la validez de los modelos. Los altos valores F (395.86 y 16.41) y los valores -p significativamente bajos (<0.05) indican que los modelos son estadísticamente significativos y que existe una relación entre las variables independientes y dependientes.

Los gráficos de dispersión muestran que los modelos son razonablemente buenos para predecir los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción (Ø), aunque existe una ligera dispersión que podría mejorarse con ajustes adicionales. Los gráficos de probabilidad y de residuos confirman que los residuos se distribuyen de manera normal y aleatoria, lo que cumple los supuestos necesarios para la inferencia estadística.

Los tipos de suelos seleccionados, clasificados como SM (Arena limosa) y ML (Limo arcilloso), son suelos mixtos que presentan características

particulares como heterogeneidad y variabilidad. A pesar de esto, mostraron correlaciones fuertes entre los valores obtenidos en el campo (ensayo CPT) y en el laboratorio (ensayo Triaxial UU).

Las correlaciones presentan ciertas limitaciones, ya que dependen de los tipos de suelos, en este caso suelos mixtos, y el valor de qc obtenido. Este valor no debe sobrepasar qc_{max}=12482 [kPa], que corresponde a uno de los suelos ensayados y está cercano al rechazo del CPT con el que se hizo este estudio.

Los resultados obtenidos demuestran que los modelos pueden ser utilizados para estimar los parámetros geomecánicos cohesión (C) y ángulo de fricción (Ø en función de los datos obtenidos de ensayos CPT.

Referencias

[1] P. K. Robertson, "In-situ testing and its application to foundation engineering," in *Proccedings of the Canadian Geotechnical Conference*, Canadian Geotechnical Society, 1986, pp. 485-491.

[2] F. H. Kulhawy and J. A. Focht, "Estimating soil properties for foundation design," *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Ground Anchors, Ed. McGraw-Hill Book Company, 1988, pp. 380-401.

[3] P. K. Robertson y R. G. Campanella, "Interpretation of Cone Penetration Tests (CPTs) in Sands," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 1983, pp. 151-159.

[4] P. K. Robertson, in *Interpretation of cone penetration tests – a unified approach*, Canadian Geotechnical Journal, 2009, pp. 1337-1355.

[5] P. K. Robertson and K.L. Cabal, "Soil Profiling and Soil Type," in *Guide to* Cone *Penetration Testing for Geo-Environmental Engineering*, 2nd ed, Gregg Grilling & Testing, Inc., 2010, pp. 27-32

[6] Mecánica Científica S.A., *Aparatos para Ensayos de Materiales - Instrumentación Científica*, Central Madrid, C/ Fundidores 14, Polígono Industrial Los Ángeles, 28906 Getafe, Madrid, España, disponible en: https://mecacisa.com

[7] K. H. Head, "Volume 3: Effective Stress Testing," in *Manual of laboratory testing*, 2nd ed., Whittles Publishing, 1998, pp. 15-40.

[8] UNE (Asociación Española de Normalización), "UNE-EN ISO 17892-8," in *Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 8: Ensayo triaxial sin consolidación y sin drenaje (ISO 17892-8:2018)*, Madrid, España, 2019.

[9] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, "Charpet 3: Multiple Linear Regression," in *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed, Hoboken NJ, USA: Wiley, 2012, pp. 134-152.

[10] D. C. Montgomery, E. A. Peck, and G. G. Vining, "Charpet 3.6: Multiple Regression Model for the patient satisfaction data," in *Introduction to Linear Regression Analysis*, 5th ed, Hoboken NJ, USA: Wiley, 2012, pp. 194-196.

[11] D. C. Montgomery and G. C. Runger, in *Applied Statistics and Probability for Engineer*, 6 th ed., John Wiley and Sons, 2014, pp. 342-345.

[12] A. M. Mood, F. A. Graybill, and D. C. Boes, in *introduction to the Theory of Statistics*, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 1974, pp. 300–310.

[13] J. Neter, W. Wasserman, et. Al, in *Applied Statistical Models*, 5th ed., McGraw-Hill, 2004, pp. 591-604.

[14] R. L. Ott and M. Longnecker, An *Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*, 6th ed., Belmont, CA, USA: Brooks/Cole, 2010.

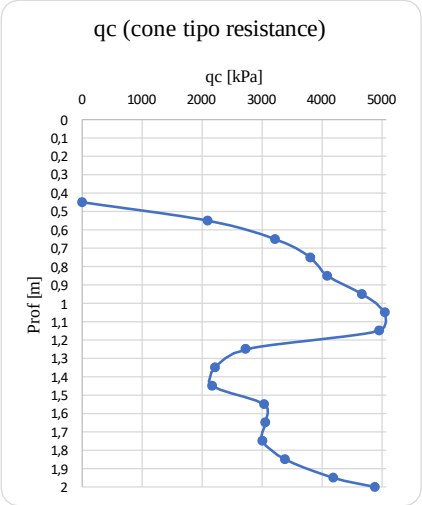
[15] A. Author, *Estadística avanzada para investigadores*, 3rd ed., Ciudad: Editorial ABC, 2015, pp. 45-50.

Anexos

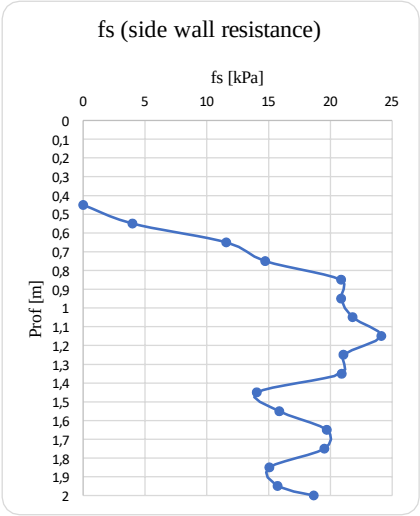
Anexo 1: Ensayos CPT

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **12/10/2024**
UBICACIÓN: **CALDERON CALLE CARAN PASAJE ÑAHUE**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,45	0
0,55	2091
0,65	3214
0,75	3806
0,85	4086
0,95	4667
1,05	5050
1,15	4952
1,25	2724
1,35	2216
1,45	2168
1,55	3036
1,65	3053
1,75	3005
1,85	3384
1,95	4188
2	4880

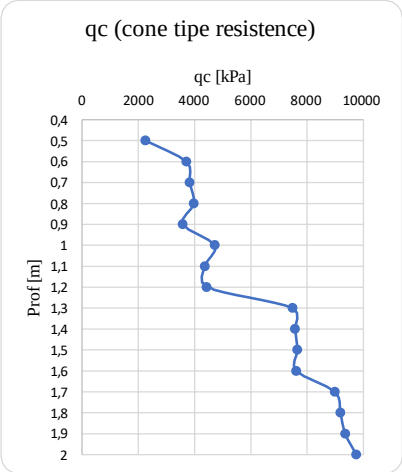


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,45	0
0,55	4
0,65	11,6
0,75	14,73
0,85	20,87
0,95	20,87
1,05	21,8
1,15	24,13
1,25	21,07
1,35	20,93
1,45	14,07
1,55	15,87
1,65	19,73
1,75	19,53
1,85	15,07
1,95	15,73
2	18,67

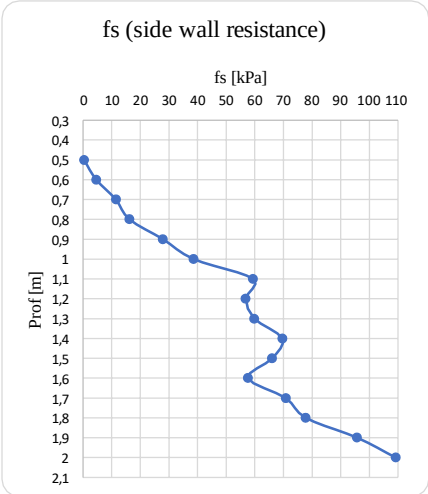


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **12/10/2024**
UBICACIÓN: **COLLAQUI, GUADALUPANA OE9-262**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipe resistance) [kPa]
0,5	2252
0,6	3705
0,7	3821
0,8	3970
0,9	3575
1	4716
1,1	4359
1,2	4420
1,3	7479
1,4	7567
1,5	7645
1,6	7607
1,7	8978
1,8	9173
1,9	9345
2	9739

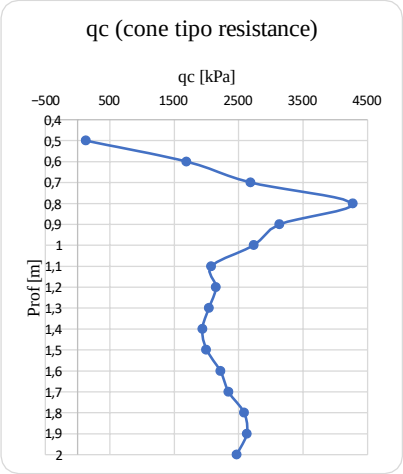


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	0,33
0,6	4,6
0,7	11,47
0,8	16,2
0,9	27,93
1	38,6
1,1	59,4
1,2	56,87
1,3	59,8
1,4	69,6
1,5	66,07
1,6	57,6
1,7	70,8
1,8	77,8
1,9	95,73
2	109,2

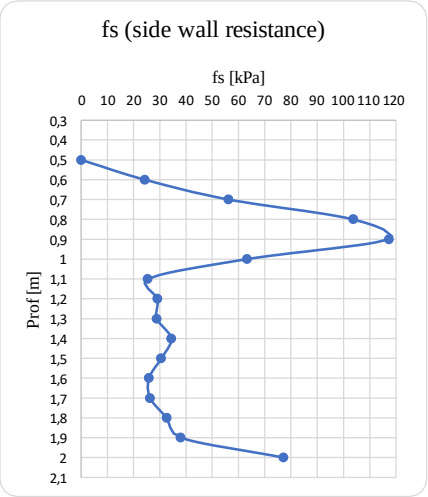


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **16/10/2024**
UBICACIÓN: **GUAJALO, VALLES DEL SUR**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,5	133
0,6	1691
0,7	2687
0,8	4272
0,9	3131
1	2733
1,1	2072
1,2	2149
1,3	2038
1,4	1936
1,5	1999
1,6	2216
1,7	2342
1,8	2584
1,9	2625
2	2471

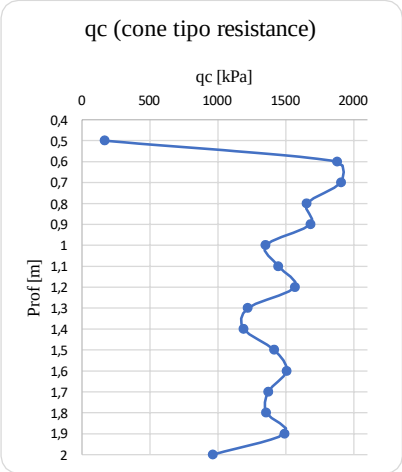


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	0
0,6	24,27
0,7	56,2
0,8	103,73
0,9	117,27
1	63,33
1,1	25,33
1,2	29,13
1,3	28,87
1,4	34,4
1,5	30,6
1,6	25,87
1,7	26,33
1,8	32,6
1,9	37,87
2	77,2

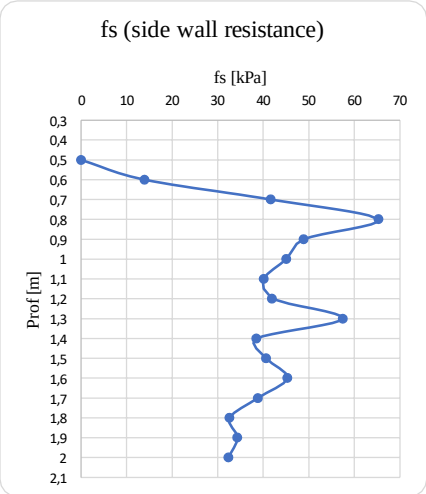


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **17/10/2024**
UBICACIÓN: **CONOCOTO, CALLE Z, PG9F+HQ5 QUITO**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,5	166
0,6	1878
0,7	1905
0,8	1653
0,9	1680
1	1350
1,1	1445
1,2	1567
1,3	1220
1,4	1189
1,5	1414
1,6	1504
1,7	1369
1,8	1355
1,9	1491
2	962

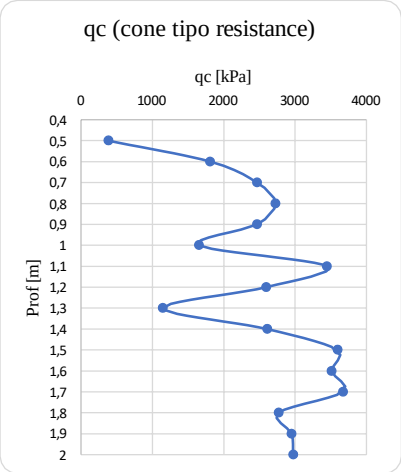


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	0
0,6	13,93
0,7	41,67
0,8	65,27
0,9	48,87
1	45,07
1,1	40,13
1,2	41,93
1,3	57,47
1,4	38,53
1,5	40,67
1,6	45,33
1,7	38,8
1,8	32,6
1,9	34,33
2	32,33

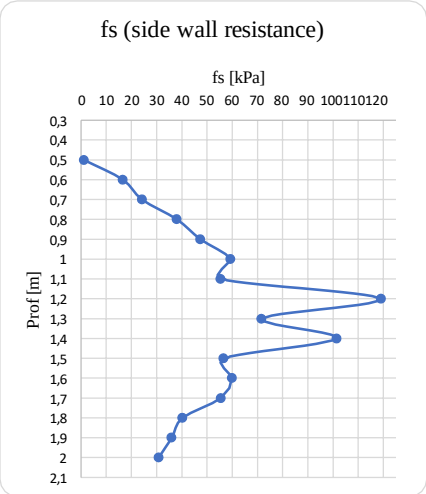


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **17/10/2024**
UBICACIÓN: **CALLE LA COCHA BARRIO PRADOS DEL CONDE**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,5	383
0,6	1810
0,7	2467
0,8	2726
0,9	2468
1	1652
1,1	3447
1,2	2595
1,3	1146
1,4	2609
1,5	3594
1,6	3514
1,7	3674
1,8	2768
1,9	2949
2	2974

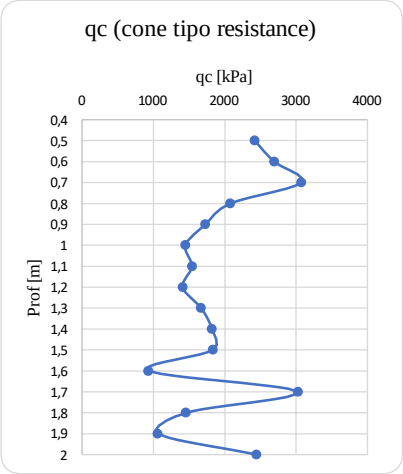


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	1,07
0,6	16,6
0,7	24,2
0,8	38,07
0,9	47,33
1	59,33
1,1	55,27
1,2	119,07
1,3	71,53
1,4	101,47
1,5	56,53
1,6	59,87
1,7	55,47
1,8	40,27
1,9	36
2	30,8

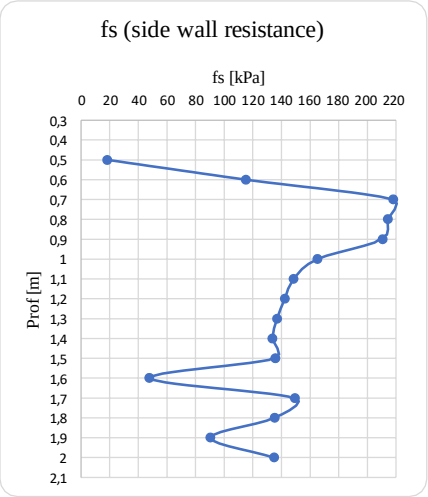


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **17/10/2024**
UBICACIÓN: **SAN ISIDRO-PAQUISHA, MC2G+9F4 QUITO**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,5	2419
0,6	2690
0,7	3073
0,8	2076
0,9	1727
1	1448
1,1	1539
1,2	1408
1,3	1668
1,4	1819
1,5	1833
1,6	931
1,7	3027
1,8	1452
1,9	1058
2	2445

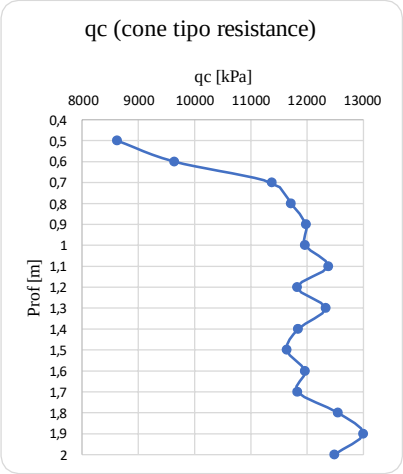


Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	18,33
0,6	115,27
0,7	218,27
0,8	214,4
0,9	210,73
1	165,2
1,1	148,47
1,2	142,4
1,3	137
1,4	133,73
1,5	136
1,6	47,73
1,7	149,4
1,8	135,4
1,9	90,47
2	135

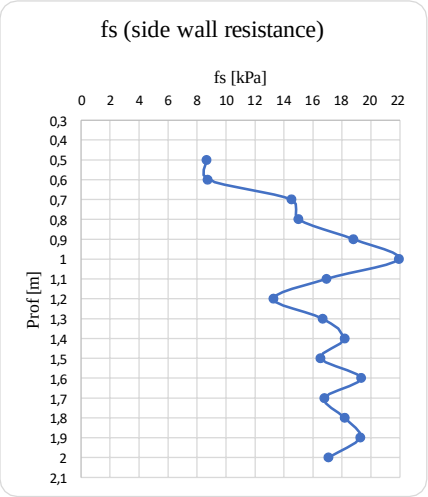


PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **18/10/2024**
UBICACIÓN: **QUITO-BILOXI, PFW2+XJ2 QUITO**
PROFUNDIDAD: **PERFORACION 1 DE 0,00 a 2,00m**

Depth/prof [m]	qc (cone tipo resistance) [kPa]
0,5	8623
0,6	9640
0,7	11369
0,8	11710
0,9	11981
1	11963
1,1	12375
1,2	11818
1,3	12329
1,4	11839
1,5	11636
1,6	11961
1,7	11824
1,8	12544
1,9	12995
2	12482



Depth/prof [m]	fs (side wall resistance) [kPa]
0,5	8,67
0,6	8,73
0,7	14,53
0,8	15
0,9	18,8
1	21,93
1,1	16,93
1,2	13,27
1,3	16,67
1,4	18,2
1,5	16,53
1,6	19,33
1,7	16,8
1,8	18,2
1,9	19,27
2	17,07



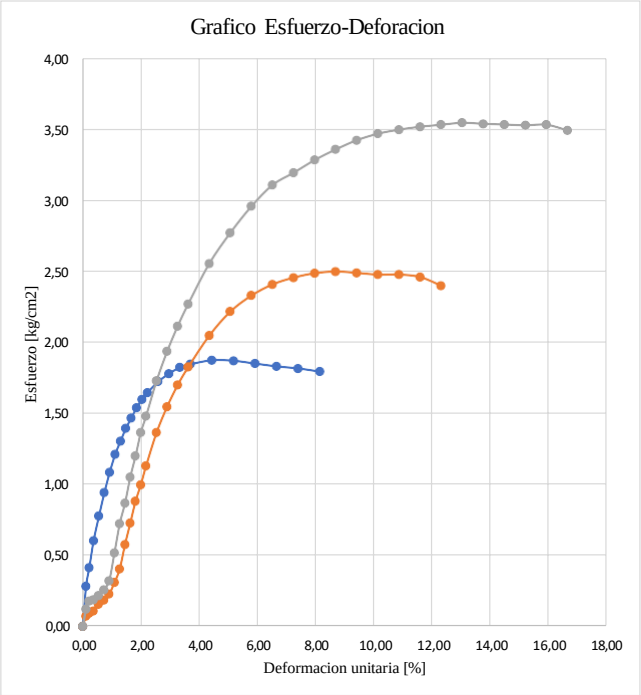
Anexo 2: Informes Triaxial UU

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: 2**8/10/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 1**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	135,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,83
Area (Ao) cm2	36,67
Masa (g)	790,23
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	138,00
D1 (cm)	6,70
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,80
Diam promedio (cm)	6,73
Area (Ao) cm2	35,61
Masa (g)	804,80
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	138,00
D1 (cm)	6,70
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,70
Diam promedio (cm)	6,70
Area (Ao) cm2	35,26
Masa (g)	776,10

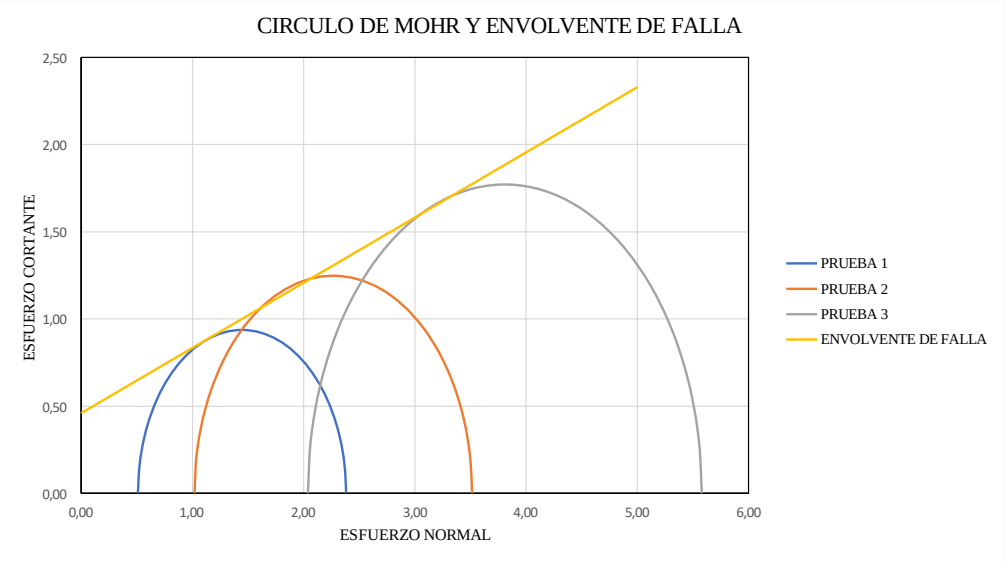
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,28	0,11	0,07	0,11	0,12
0,22	0,41	0,22	0,09	0,22	0,18
0,37	0,60	0,36	0,11	0,36	0,19
0,56	0,78	0,54	0,16	0,54	0,22
0,74	0,94	0,72	0,18	0,72	0,26
0,93	1,09	0,91	0,23	0,91	0,32
1,11	1,21	1,09	0,31	1,09	0,52
1,30	1,30	1,27	0,40	1,27	0,72
1,48	1,39	1,45	0,58	1,45	0,87
1,67	1,47	1,63	0,73	1,63	1,05
1,85	1,54	1,81	0,88	1,81	1,20
2,04	1,60	1,99	1,00	1,99	1,36
2,22	1,64	2,17	1,13	2,17	1,48
2,59	1,72	2,54	1,36	2,54	1,73
2,96	1,78	2,90	1,55	2,90	1,93
3,33	1,82	3,26	1,70	3,26	2,11
3,70	1,84	3,62	1,82	3,62	2,27
4,44	1,87	4,35	2,05	4,35	2,55
5,19	1,87	5,07	2,21	5,07	2,77
5,93	1,85	5,80	2,33	5,80	2,96
6,67	1,83	6,52	2,41	6,52	3,11
7,41	1,81	7,25	2,45	7,25	3,19
8,15	1,79	7,97	2,48	7,97	3,28
		8,70	2,50	8,70	3,36
		9,42	2,49	9,42	3,42
		10,14	2,47	10,14	3,47
		10,87	2,48	10,87	3,49
		11,59	2,46	11,59	3,51
		12,32	2,40	12,32	3,53
				13,04	3,54
				13,77	3,54
				14,49	3,53
				15,22	3,52
				15,94	3,53
				16,67	3,49



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1,87	0,51	2,38	0,94	1,45
2	2,50	1,02	3,52	1,25	2,27
3	3,54	2,04	5,58	1,77	3,81



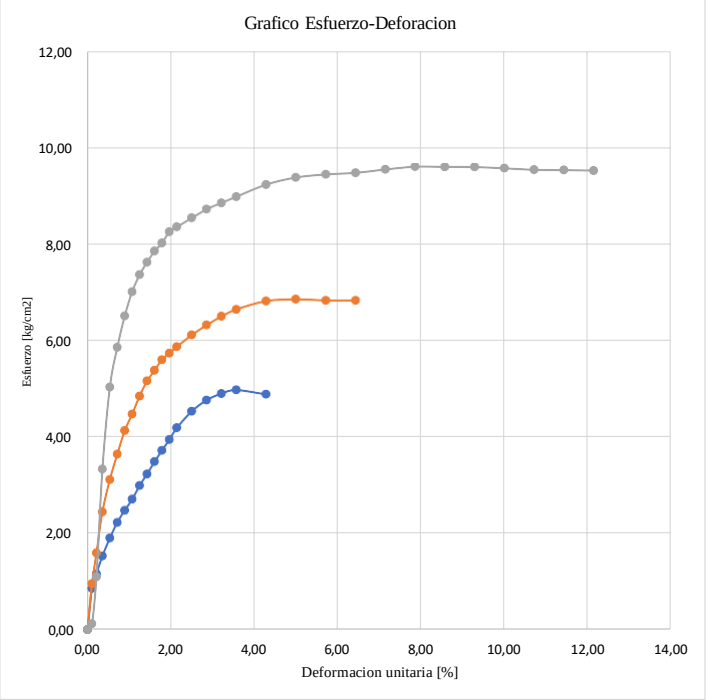
Ø	20,5	
C	0,46	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **30/10/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 2**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	7,00
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,93
Area (Ao) cm2	37,75
Masa (g)	743,65
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,80
Diam promedio (cm)	6,77
Area (Ao) cm2	35,96
Masa (g)	742,46
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,83
Area (Ao) cm2	36,67
Masa (g)	731,10

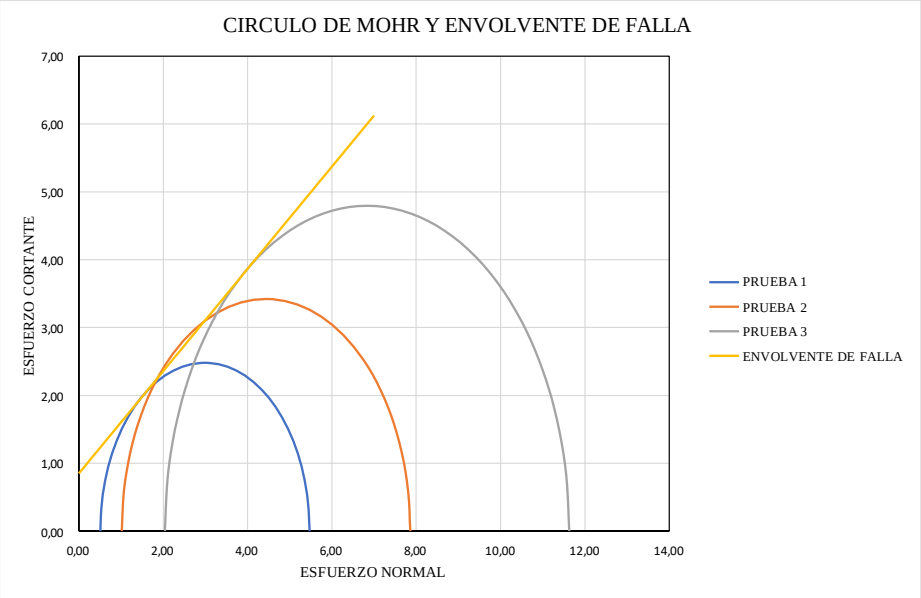
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,86	0,11	0,95	0,11	0,12
0,21	1,16	0,21	1,59	0,21	1,10
0,36	1,53	0,36	2,44	0,36	3,32
0,54	1,90	0,54	3,11	0,54	5,02
0,71	2,22	0,71	3,64	0,71	5,85
0,89	2,47	0,89	4,12	0,89	6,50
1,07	2,70	1,07	4,47	1,07	7,00
1,25	2,99	1,25	4,84	1,25	7,35
1,43	3,22	1,43	5,15	1,43	7,61
1,61	3,48	1,61	5,37	1,61	7,84
1,79	3,71	1,79	5,59	1,79	8,01
1,96	3,94	1,96	5,73	1,96	8,24
2,14	4,18	2,14	5,86	2,14	8,34
2,50	4,52	2,50	6,10	2,50	8,53
2,86	4,76	2,86	6,31	2,86	8,71
3,21	4,89	3,21	6,49	3,21	8,84
3,57	4,96	3,57	6,63	3,57	8,97
4,29	4,87	4,29	6,81	4,29	9,22
		5,00	6,84	5,00	9,37
		5,71	6,82	5,71	9,43
		6,43	6,82	6,43	9,46
				7,14	9,53
				7,86	9,59
				8,57	9,59
				9,29	9,58
				10,00	9,56
				10,71	9,52
				11,43	9,52
				12,14	9,51



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	4,96	0,51	5,47	2,48	2,99
2	6,84	1,02	7,86	3,42	4,44
3	9,59	2,04	11,63	4,79	6,83



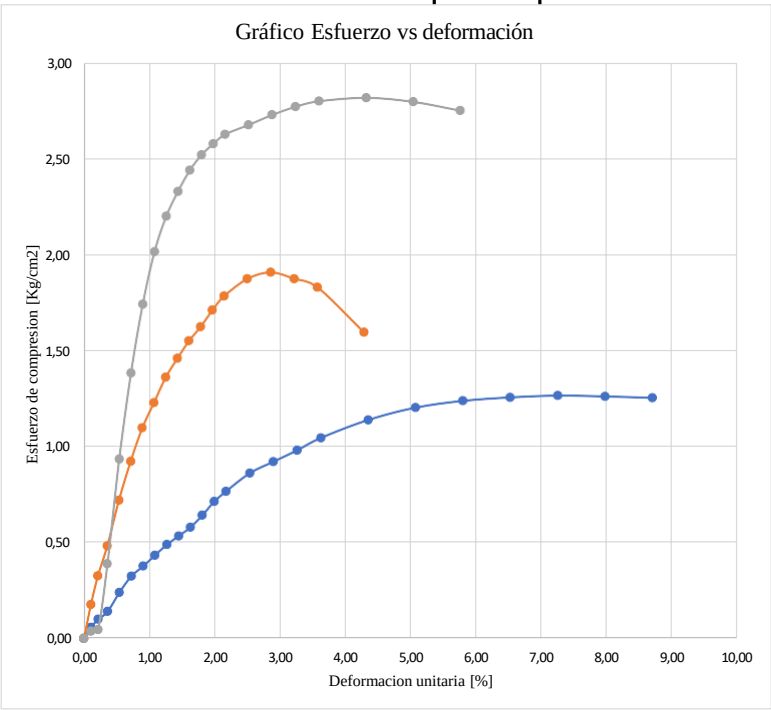
Ø	37	
C	0,85	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: 08/**11/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 3**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	7,00
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,93
Area (Ao) cm2	37,75
Masa (g)	743,65
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,80
Diam promedio (cm)	6,77
Area (Ao) cm2	35,96
Masa (g)	742,46
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,83
Area (Ao) cm2	36,67
Masa (g)	731,10

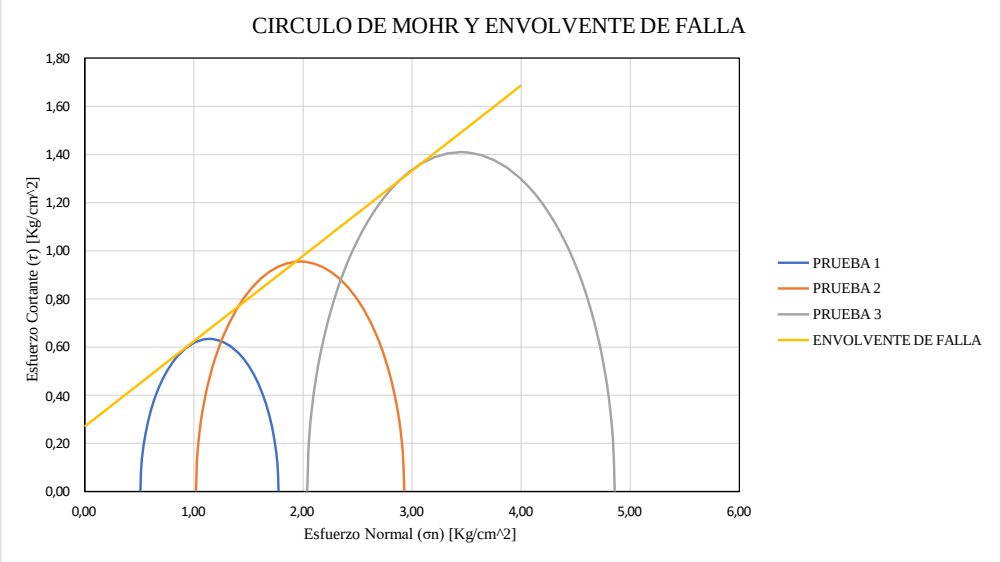
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	35,26	0,00
0,11	0,06	0,11	0,18	35,29	0,04
0,22	0,10	0,21	0,33	35,33	0,05
0,36	0,14	0,36	0,48	35,38	0,39
0,54	0,24	0,54	0,72	35,45	0,93
0,72	0,33	0,71	0,92	35,51	1,38
0,91	0,38	0,89	1,10	35,58	1,74
1,09	0,43	1,07	1,23	35,64	2,02
1,27	0,49	1,25	1,36	35,71	2,20
1,45	0,53	1,43	1,46	35,77	2,33
1,63	0,58	1,61	1,55	35,84	2,44
1,81	0,64	1,79	1,63	35,90	2,52
1,99	0,71	1,96	1,71	35,97	2,58
2,17	0,77	2,14	1,78	36,03	2,63
2,54	0,86	2,50	1,88	36,17	2,68
2,90	0,92	2,86	1,91	36,30	2,73
3,26	0,98	3,21	1,88	36,44	2,77
3,62	1,05	3,57	1,83	36,57	2,80
4,35	1,14	4,29	1,60	36,85	2,82
5,07	1,20			37,13	2,80
5,80	1,24			37,41	2,75
6,52	1,26				
7,25	1,27				
7,97	1,26				
8,70	1,26				



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1,27	0,51	1,78	0,63	1,14
2	1,91	1,02	2,93	0,95	1,97
3	2,82	2,04	4,86	1,41	3,45



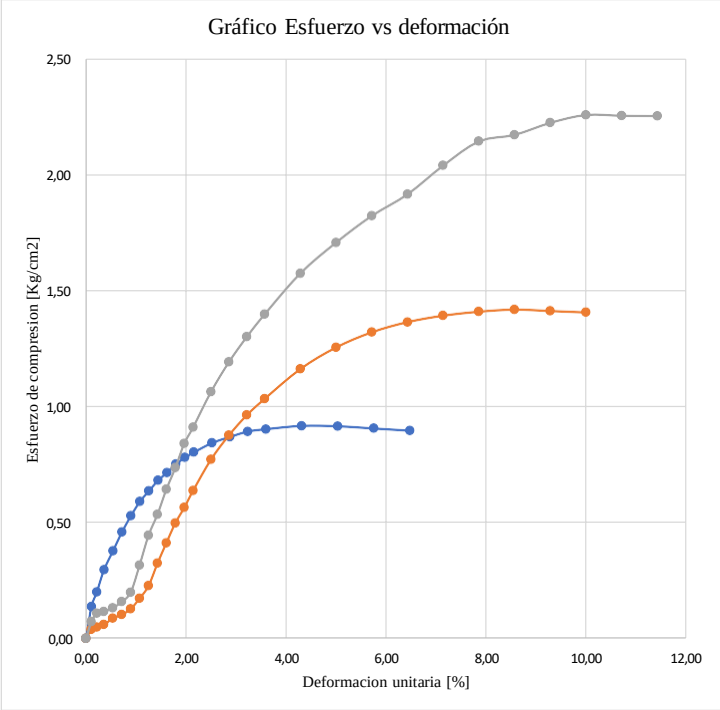
Ø	19,5	
C	0,27	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: 08/**11/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 4**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	139,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,87
Area (Ao) cm2	37,03
Masa (g)	785,70
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,85
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,88
Area (Ao) cm2	37,21
Masa (g)	780,00
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,95
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,92
Area (Ao) cm2	37,57
Masa (g)	776,10

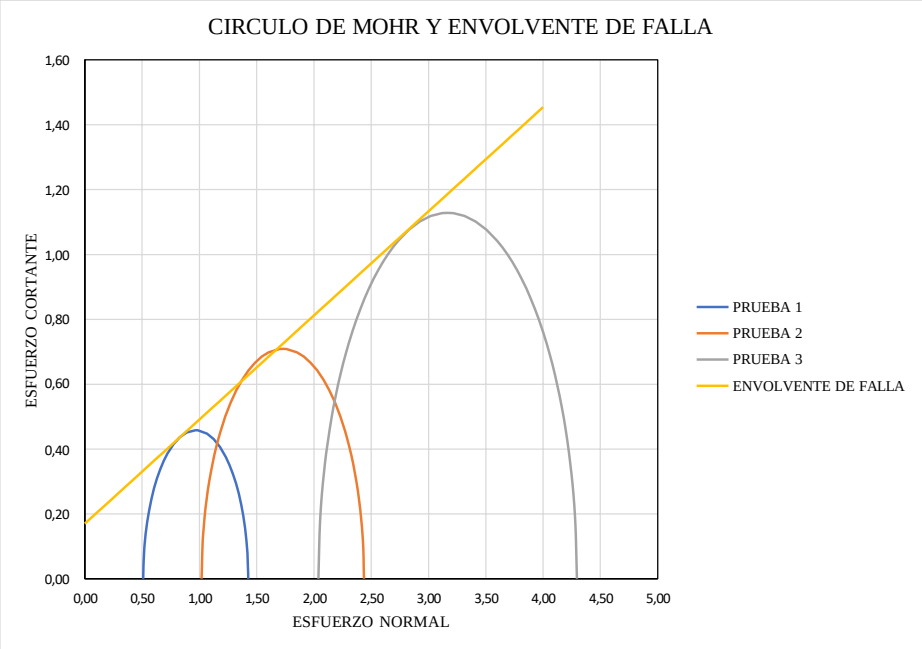
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,14	0,11	0,04	0,11	0,07
0,22	0,20	0,21	0,05	0,21	0,11
0,36	0,30	0,36	0,06	0,36	0,12
0,54	0,38	0,54	0,09	0,54	0,13
0,72	0,46	0,71	0,10	0,71	0,16
0,90	0,53	0,89	0,13	0,89	0,20
1,08	0,59	1,07	0,17	1,07	0,32
1,26	0,64	1,25	0,23	1,25	0,44
1,44	0,68	1,43	0,32	1,43	0,53
1,62	0,71	1,61	0,41	1,61	0,64
1,80	0,75	1,79	0,50	1,79	0,74
1,98	0,78	1,96	0,56	1,96	0,84
2,16	0,80	2,14	0,64	2,14	0,91
2,52	0,84	2,50	0,77	2,50	1,06
2,88	0,87	2,86	0,88	2,86	1,19
3,24	0,89	3,21	0,96	3,21	1,30
3,60	0,90	3,57	1,03	3,57	1,40
4,32	0,92	4,29	1,16	4,29	1,57
5,04	0,91	5,00	1,25	5,00	1,71
5,76	0,91	5,71	1,32	5,71	1,82
6,47	0,90	6,43	1,36	6,43	1,91
		7,14	1,39	7,14	2,04
		7,86	1,41	7,86	2,14
		8,57	1,42	8,57	2,17
		9,29	1,41	9,29	2,22
		10,00	1,41	10,00	2,26
				10,71	2,25
				11,43	2,25



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	0,92	0,51	1,43	0,46	0,97
2	1,42	1,02	2,44	0,71	1,73
3	2,26	2,04	4,29	1,13	3,17



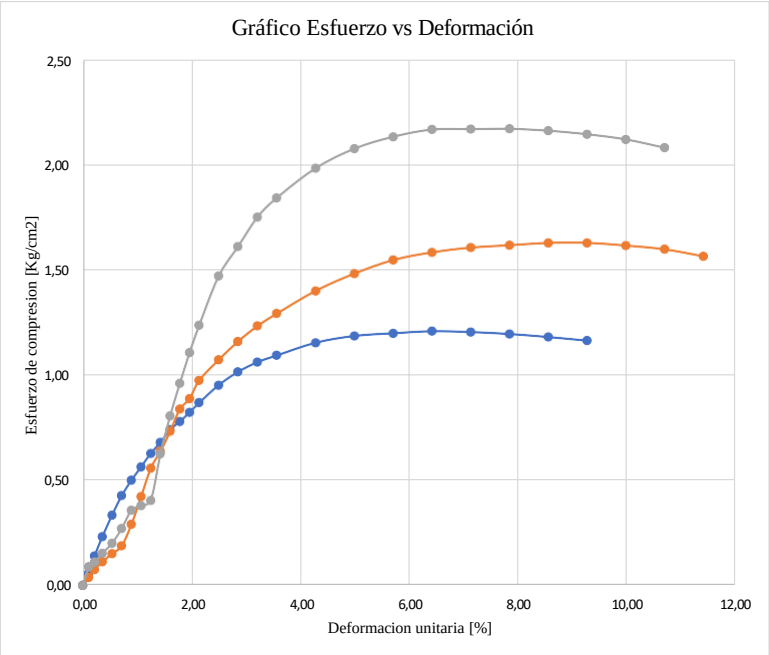
Ø	17,8	
C	0,17	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **08/11/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 5**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,50
Diam promedio (cm)	6,73
Area (Ao) cm2	35,61
Masa (g)	869,01
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,60
Diam promedio (cm)	6,73
Area (Ao) cm2	35,61
Masa (g)	870,87
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,70
Diam promedio (cm)	6,77
Area (Ao) cm2	35,96
Masa (g)	871,74

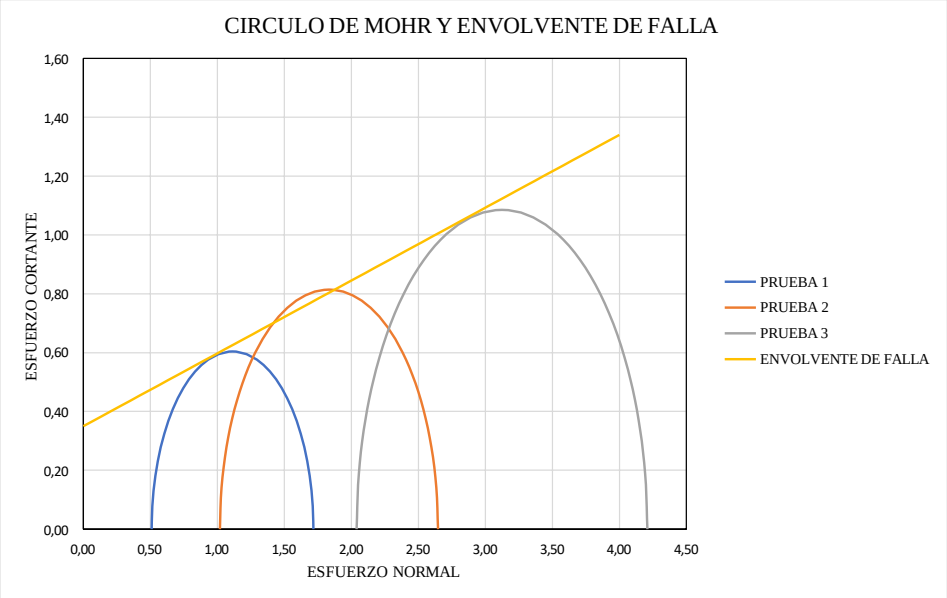
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,06	0,11	0,04	0,11	0,09
0,21	0,14	0,21	0,07	0,21	0,11
0,36	0,23	0,36	0,11	0,36	0,15
0,54	0,33	0,54	0,15	0,54	0,20
0,71	0,43	0,71	0,19	0,71	0,27
0,89	0,50	0,89	0,29	0,89	0,36
1,07	0,56	1,07	0,42	1,07	0,38
1,25	0,63	1,25	0,56	1,25	0,40
1,43	0,68	1,43	0,64	1,43	0,63
1,61	0,74	1,61	0,73	1,61	0,81
1,79	0,78	1,79	0,84	1,79	0,96
1,96	0,82	1,96	0,89	1,96	1,11
2,14	0,87	2,14	0,97	2,14	1,24
2,50	0,95	2,50	1,07	2,50	1,47
2,86	1,02	2,86	1,16	2,86	1,61
3,21	1,06	3,21	1,23	3,21	1,75
3,57	1,09	3,57	1,29	3,57	1,84
4,29	1,15	4,29	1,40	4,29	1,98
5,00	1,19	5,00	1,48	5,00	2,08
5,71	1,20	5,71	1,55	5,71	2,13
6,43	1,21	6,43	1,58	6,43	2,17
7,14	1,20	7,14	1,61	7,14	2,17
7,86	1,19	7,86	1,62	7,86	2,17
8,57	1,18	8,57	1,63	8,57	2,16
9,29	1,16	9,29	1,63	9,29	2,14
		10,00	1,62	10,00	2,12
		10,71	1,60	10,71	2,08
		11,43	1,56		



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	1,21	0,51	1,72	0,60	1,11
2	1,63	1,02	2,65	0,81	1,83
3	2,17	2,04	4,21	1,09	3,12



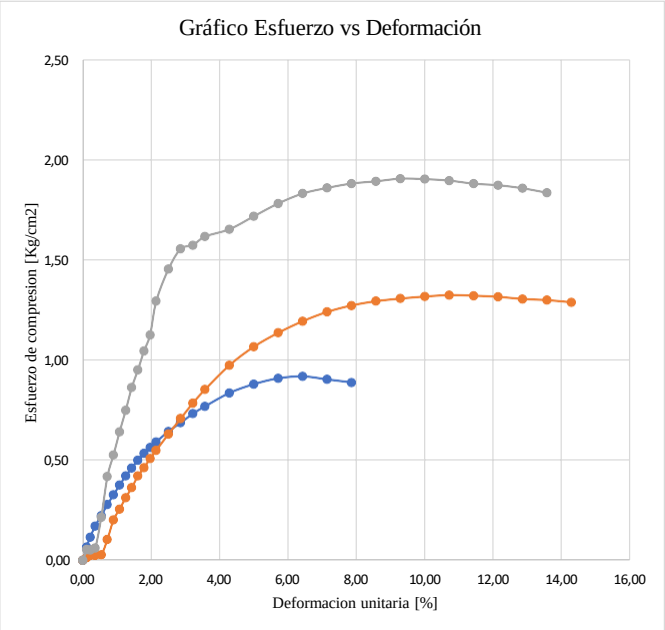
Ø	13,9	
C	0,35	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **13/10/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 6**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,60
D2 (cm)	6,70
D3 (cm)	6,70
Diam promedio (cm)	6,67
Area (Ao) cm2	34,91
Masa (g)	719,71
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,90
D3 (cm)	6,60
Diam promedio (cm)	6,77
Area (Ao) cm2	35,96
Masa (g)	708,14
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,70
Diam promedio (cm)	6,80
Area (Ao) cm2	36,32
Masa (g)	707,08

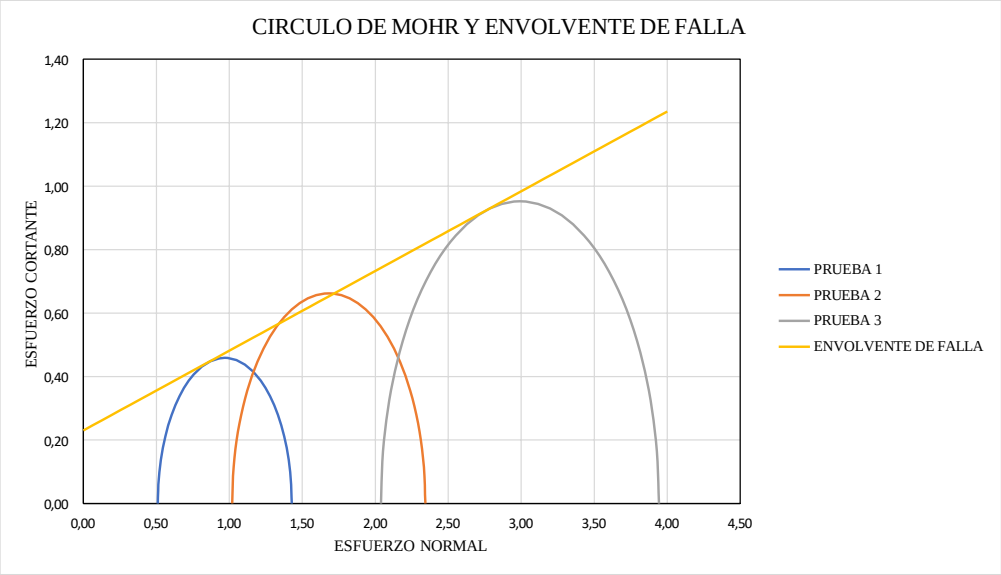
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,07	0,11	0,01	0,11	0,05
0,21	0,12	0,21	0,03	0,21	0,05
0,36	0,17	0,36	0,03	0,36	0,06
0,54	0,22	0,54	0,03	0,54	0,21
0,71	0,28	0,71	0,10	0,71	0,42
0,89	0,33	0,89	0,20	0,89	0,53
1,07	0,38	1,07	0,26	1,07	0,64
1,25	0,42	1,25	0,31	1,25	0,75
1,43	0,46	1,43	0,36	1,43	0,86
1,61	0,50	1,61	0,42	1,61	0,95
1,79	0,53	1,79	0,46	1,79	1,04
1,96	0,56	1,96	0,51	1,96	1,13
2,14	0,59	2,14	0,55	2,14	1,29
2,50	0,64	2,50	0,63	2,50	1,45
2,86	0,69	2,86	0,71	2,86	1,55
3,21	0,73	3,21	0,78	3,21	1,57
3,57	0,77	3,57	0,85	3,57	1,62
4,29	0,84	4,29	0,97	4,29	1,65
5,00	0,88	5,00	1,07	5,00	1,72
5,71	0,91	5,71	1,14	5,71	1,78
6,43	0,92	6,43	1,19	6,43	1,83
7,14	0,90	7,14	1,24	7,14	1,86
7,86	0,89	7,86	1,27	7,86	1,88
		8,57	1,29	8,57	1,89
		9,29	1,31	9,29	1,90
		10,00	1,32	10,00	1,90
		10,71	1,32	10,71	1,89
		11,43	1,32	11,43	1,88
		12,14	1,31	12,14	1,87
		12,86	1,30	12,86	1,86
		13,57	1,30	13,57	1,83
		14,29	1,29		



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	0,92	0,51	1,43	0,46	0,97
2	1,32	1,02	2,34	0,66	1,68
3	1,90	2,04	3,94	0,95	2,99



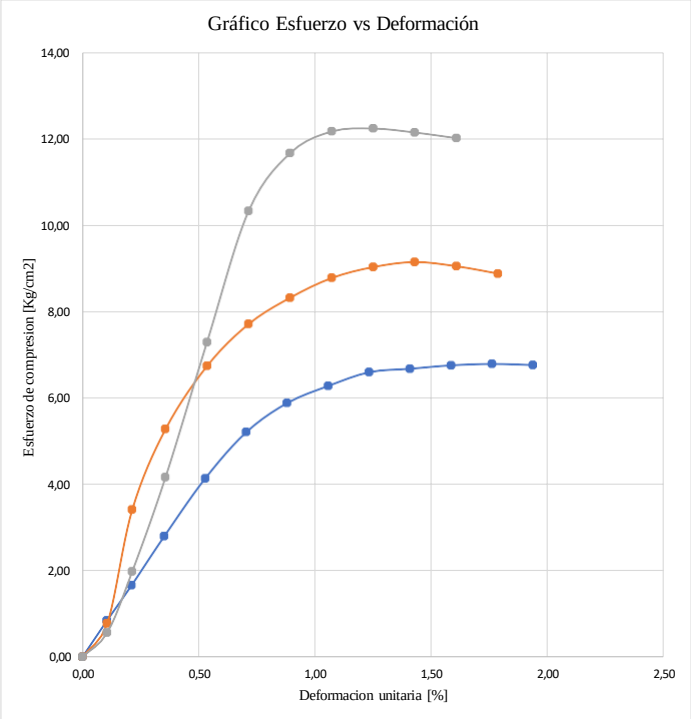
Ø	14,1	
C	0,23	Kg/cm2

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA** FECHA: **30/10/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 7**

Datos de las muestras	
Muestra 1	
Altura (Lo) mm	142,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,60
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,80
Area (Ao) cm2	36,32
Masa (g)	894,38
Muestra 2	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,80
D2 (cm)	6,90
D3 (cm)	6,90
Diam promedio (cm)	6,87
Area (Ao) cm2	37,03
Masa (g)	895,55
Muestra 3	
Altura (Lo) mm	140,00
D1 (cm)	6,90
D2 (cm)	6,80
D3 (cm)	6,60
Diam promedio (cm)	6,77
Area (Ao) cm2	35,96
Masa (g)	903,80

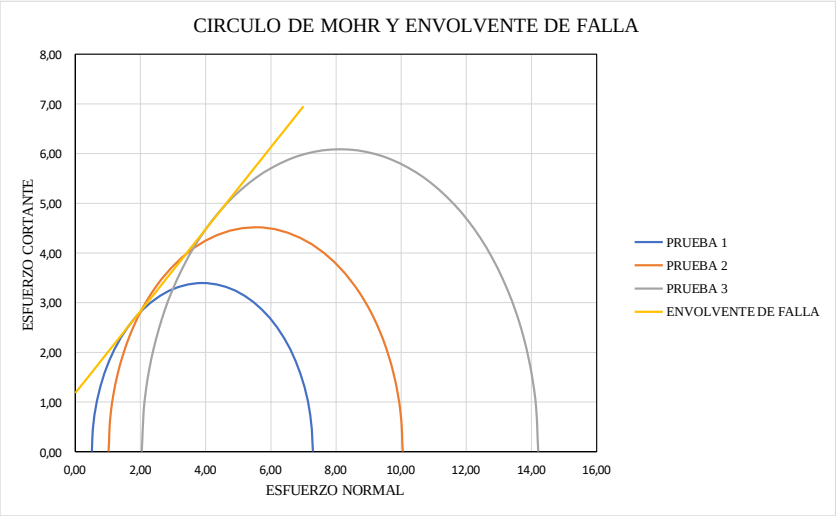
Datos calculados del enssayo Triaxial

Muestra 1 [50 kPa]		Muestra 2 [100 kPa]		Muestra 3 [200 kPa]	
Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.	Deformacion unitaria (Ɛ)	Esf. Comp.
[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]	[%]	[Kg/cm2]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,11	0,84	0,11	0,78	0,11	0,57
0,21	1,66	0,21	3,41	0,21	1,98
0,35	2,80	0,36	5,27	0,36	4,16
0,53	4,14	0,54	6,74	0,54	7,29
0,70	5,21	0,71	7,71	0,71	10,33
0,88	5,88	0,89	8,32	0,89	11,67
1,06	6,28	1,07	8,78	1,07	12,17
1,23	6,60	1,25	9,03	1,25	12,24
1,41	6,67	1,43	9,15	1,43	12,15
1,58	6,75	1,61	9,05	1,61	12,02
1,76	6,79	1,79	8,88		
1,94	6,76				



Datos obtenidos para calcular Cohesion (C) y angulo de fricción

No	σ desv.	σ3	σ1	RADIO	CENTRO
	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2	Kg/cm2
1	6,79	0,51	7,30	3,39	3,90
2	9,03	1,02	10,05	4,52	5,53
3	12,17	2,04	14,21	6,09	8,12



Ø	39,5	
C	1,18	Kg/cm2

Anexo 3: Parametros Obtenidos con qc y fs

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIA**FECHA: **30/10/2024**
UBICACIÓN: **LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA**
MUESTRA: **SITIO 2**

Sitios	γ	z	Rf	qc/pa	σv0	Qt	Fr	Ic	zona	Clasificacion	αvs	Vs
	[t/m^3]	[m]	[%]	-	[t/m^2]	-	[%]	-	-	-	-	[m/s]
1	1,73	2,00	0,38	48,80	3,46	140,45	0,39	1,55	6,00	SM	340,21	128,39
2	1,97	2,00	1,12	97,39	3,93	247,67	1,13	1,67	6,00	SM	394,59	195,64
3	1,87	2,00	3,12	24,71	3,74	65,27	3,17	2,39	5,00	SM	985,03	154,83
4	1,73	2,00	3,36	9,62	3,46	26,87	3,49	2,70	4,00	ML	1455,42	116,18
5	1,77	2,00	1,04	29,74	3,54	83,29	1,05	1,98	6,00	SM	591,03	131,79
6	1,94	2,00	5,52	24,45	3,87	62,37	5,61	2,59	5,00	ML	1264,11	174,41
7	1,76	2,00	0,14	124,82	3,51	355,42	0,14	0,99	7,00	SM	166,88	144,13

Anexo 4: Parametros ingresados al software para las corrrelaciones multiples

PROYECTO: **PROYECTO DE INVRESTIGACION UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESI** FECHA: **6/12/2024**
UBICACIÓN: **QUITO**
MUESTRA: **SITIO 2**

Sitios	Ø	Cohesion	qc	fs	γ	Rf	Qt
	[grados]	[t/m^2]	[kPa]	[kPa]	[t/m^3]	[%]	-
1	20,50	4,53	4880,00	18,67	1,73	0,38	140,45
2	37,00	8,37	9739,00	109,20	1,97	1,12	247,67
3	19,50	2,66	1999,00	30,60	1,87	3,12	65,27
4	17,80	1,67	962,00	32,33	1,73	3,36	26,87
5	13,90	3,44	2974,00	30,80	1,77	1,04	83,29
6	14,10	2,26	1833,00	136,00	1,94	5,52	62,37
7	39,50	11,61	12482,00	17,07	1,76	0,14	355,42