

ARTÍCULOS

Estudio de precisión de métodos directos e indirectos para medir la densidad en sitio

Study of the accuracy of direct and indirect methods for measuring density on site



Brenda Nicole Caiza Cachumba¹, José Sebastián Racines Crespo², Paúl Javier León Torres³



caizabrenda101@gmail.com
¹ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.



josebastian8458@gmail.com
² Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.



pjleon@uce.edu.ec
³ Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Quito, Ecuador.

FIGEMPA: Investigación y Desarrollo

Universidad Central del Ecuador, Ecuador

ISSN-e: 2602-8484

Periodicidad: Semestral

vol. 20, núm. 2, 2025

revista.figempa@uce.edu.ec

Recepción: 06 marzo 2025

Aprobación: 17 octubre 2025

DOI: <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.7977>

Autor de correspondencia:
caizabrenda101@gmail.com

RESUMEN

La adecuada determinación de la densidad de suelos compactados constituye un aspecto fundamental para garantizar la calidad y estabilidad de obras de infraestructura, especialmente en proyectos de ingeniería civil donde el control de calidad resulta decisivo. En este contexto, se desarrolló esta investigación con la finalidad de evaluar la precisión de métodos directos e indirectos en la medición de la densidad en sitio de distintos tipos de suelos, mediante la utilización de bancos de prueba en laboratorio. El objetivo principal fue comparar la exactitud de métodos directos (cono de arena, densidad y peso unitario) e indirectos (densímetro nuclear y densímetro eléctrico) para determinar parámetros como grado de compactación, contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca de suelos compactados. Para ello, se extrajeron muestras de suelo, las cuales fueron caracterizadas y clasificadas de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia e índice de plasticidad, verificando que cumplieran con las propiedades requeridas. La metodología contempló la conformación de bancos de prueba empleando el ensayo Proctor estándar y la aplicación de los métodos seleccionados para medir la densidad en arenas, limos y arcillas. Los resultados fueron analizados estadísticamente a través de la desviación estándar, coeficiente de variación, análisis de normalidad y análisis de varianza (ANOVA), complementados con tablas y gráficas comparativas. Los hallazgos mostraron que, bajo condiciones controladas, los métodos directos tendieron a presentar mayor precisión, mientras que los métodos indirectos ofrecieron ventajas en rapidez y facilidad de aplicación, aunque su desempeño varió según el tipo de suelo analizado. Se determinó que los métodos directos presentaron mayor precisión bajo condiciones controladas, mientras que los indirectos resultaron más efectivos en términos de rapidez y facilidad de aplicación. Las conclusiones permitieron identificar las ventajas y limitaciones de cada metodología, aportando a la selección de técnicas más adecuadas para diferentes aplicaciones en el ámbito de la ingeniería. Con este estudio, se contribuyó a la elección de metodologías más confiables para el control de calidad en la construcción de terraplenes o en la compactación de capas estructurales de carreteras, optimizando procesos y garantizando mayor seguridad estructural.

Palabras claves: precisión; densidad del suelo; densímetro; compactación.

ABSTRACT

The accurate determination of compacted soil density is essential to ensure the quality and stability of infrastructure works, especially in civil engineering projects where quality control is crucial. In this context, this research project was developed to evaluate the accuracy of direct and indirect methods for measuring the density of different types of soil in situ, using laboratory test benches. The main objective was to compare the accuracy of direct methods (sand cone, density, and unit weight) and indirect methods (nuclear densimeter and electrical densimeter) to determine parameters such as degree of compaction, moisture content, wet density, and dry density of compacted soils. To this end, soil samples were extracted and characterized and classified according to the Unified Soil Classification System (USCS) through granulometry, consistency limits, and plasticity index tests, verifying that they met the required properties.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Cómo citar:

Caiza-Cachumba, B. N., Racines-Crespo, J. S., & León-Torres, P. J. (2025). Estudio de precisión de métodos directos e indirectos para medir la densidad en sitio. FIGEMPA: Investigación y Desarrollo, 20(2), e7977. <https://doi.org/10.29166/revfig.v20i2.7977>

The methodology included the creation of test banks using the standard Proctor test and the application of selected methods to measure density in sands, silts, and clays. The results were statistically analyzed using standard deviation, coefficient of variation, normality analysis, and analysis of variance (ANOVA), supplemented with comparative tables and graphs. It was determined that direct methods were more accurate under controlled conditions, while indirect methods were more effective in terms of speed and ease of application. The conclusions allowed the advantages and limitations of each methodology to be identified, contributing to the selection of the most appropriate techniques for different applications in the field of engineering. This study contributed to the choice of more reliable methodologies for quality control in the construction of embankments or the compaction of structural layers of roads, optimizing processes and ensuring greater structural safety.

Keywords: accuracy; soil density; densimeter; compaction

INTRODUCCIÓN

El estudio y análisis de las propiedades de los suelos constituye un aspecto esencial en la ingeniería civil, ya que influyen directamente en el comportamiento de las estructuras construidas sobre ellos. Entre dichas propiedades, la densidad del suelo ocupa un papel fundamental, pues determina su resistencia, estabilidad y durabilidad frente a cargas y condiciones ambientales cambiantes, afectando la seguridad de obras como carreteras, puentes y edificaciones (Das y Sobhan, 2018), (Knappett y Craig, 2012).

Para medir la densidad del suelo se han desarrollado múltiples técnicas, mismas pueden agruparse en dos categorías principales: métodos directos e indirectos. Los métodos directos, como el cono de arena y el ensayo de densidad y peso unitario, requieren contacto físico con el suelo y permiten una determinación precisa de masa y volumen (ASTM International, 2016). En contraste con los métodos indirectos, como los densímetros nucleares y eléctricos, que pese a ser rápidos y prácticos, dependen de principios físicos que pueden introducir variabilidad en los resultados (Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 2002).

Diversos estudios han evidenciado esta dicotomía: el cono de arena suele ser más preciso en suelos granulares, pero demanda mayor tiempo y personal capacitado (Flores, 2014); mientras que el densímetro nuclear destaca por su rapidez y versatilidad, aunque presenta limitaciones en suelos con alta heterogeneidad (Yepes, 2019). Gabriels y Lobo (2013) resaltan además la influencia de la granulometría en la confiabilidad de los métodos, lo cual plantea la necesidad de evaluaciones comparativas.

En este marco, la presente investigación se enfoca en evaluar comparativamente la precisión de métodos directos e indirectos en suelos de distinta naturaleza (arena, limo y arcilla), aplicados en bancos de prueba en laboratorio. La novedad del estudio radica en integrar una metodología estadística robusta, que incluye análisis descriptivo (media, desviación estándar, coeficiente de variación), pruebas de normalidad (Romero Saldaña, 2016) y análisis de varianza ANOVA (Vicéns *et al.*, 2005), con el fin de establecer diferencias significativas entre métodos.

La hipótesis planteada sostiene que los métodos directos, como el cono de arena, tienden a ofrecer mayor precisión en suelos homogéneos, mientras que los indirectos, como el densímetro nuclear y eléctrico, resultan más eficaces en suelos heterogéneos. En consecuencia, la pregunta de investigación formulada es: ¿qué metodología de medición de la densidad proporciona resultados más precisos en muestras de arena, limo y arcilla, y bajo qué condiciones de laboratorio?

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio es de tipo experimental y tiene como finalidad evaluar la precisión de métodos directos (cono de arena, densidad y peso unitario) e indirectos (densímetro nuclear y densímetro eléctrico) en la determinación de la densidad de suelos (arena, limo y arcilla) bajo condiciones controladas de laboratorio.

as muestras de suelo se recolectan mediante calicatas, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM D4220 para preservación y transporte (Caiza y Racines, 2025).

Cada muestra se somete a ensayos de granulometría por tamizado (ASTM D6913) e hidrometría (ASTM D7928), límites de Atterberg e índice de plasticidad (ASTM D4318), y gravedad específica (ASTM D854). Con estos resultados se clasifican de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), según se resume en la Tabla 1.

La selección de los sitios de muestreo se fundamenta en los siguientes criterios técnicos:

Representatividad del tipo de suelo: se prioriza disponer de un suelo arenoso, uno limoso y uno arcilloso, con propiedades contrastantes.

Condiciones de accesibilidad: se eligen sectores con facilidad de extracción y mínima alteración superficial.

Variabilidad granulométrica y plasticidad: se consideran materiales con diferentes contenidos de finos y plasticidad, con el fin de evaluar la respuesta de los métodos en distintos escenarios.

Normativa de referencia: los suelos se caracterizan siguiendo los ensayos establecidos por la ASTM International, lo que garantiza la comparabilidad con otros estudios y el cumplimiento de estándares internacionales.

TABLA 1
Muestras de suelo

Suelo	Muestra	Sector	ZONA	Coordenadas
Arena	1	Guayllabamba	17S	E: 792.000,00 m N: 9.991.805,00 m
	2			
	3			
Arcilla	4	Quito	17S	E: 778.055,00 m N: 9.976.807,00 m
Limo	5	Guayllabamba	17S	E: 795.834,00 m N: 9.994.682,00 m

Las muestras se caracterizan físicamente mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia e índice de plasticidad, lo que permite clasificarlas según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Posteriormente, se construye un banco de prueba de madera de 2,70 m de lado y 0,50 m de altura, recubierto con lona plástica para conservar la humedad.

Cada tipo de suelo se compacta aplicando el ensayo Proctor estándar (ASTM D698), con el fin de establecer la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo. Estos valores permiten trabajar en condiciones controladas y reproducibles dentro del banco de pruebas, asegurando que las mediciones de densidad in situ se realicen bajo parámetros estandarizados y comparables entre diferentes tipos de suelo.

La densidad in situ se mide utilizando métodos directos e indirectos, previamente descritos. Los resultados se analizan con herramientas estadísticas —media, desviación estándar, coeficiente de variación, pruebas de normalidad y análisis de varianza (ANOVA)— para comparar la precisión entre métodos y determinar la presencia de errores sistemáticos o aleatorios.

Adicionalmente, se controlan las condiciones ambientales en el laboratorio y se verifica la calibración de todos los equipos.

Los principales ensayos empleados se resumen en la Tabla 2, con sus respectivas normativas de referencia.

TABLA 2
Ensayos requeridos en el proceso metodológico

Ensayo	Alcance	Propósito dentro del estudio
Práctica estándar para preservar y transportar muestras de suelo. (ASTM D4220)	Método estandarizado para obtener muestras de suelo representativas del sitio, incluso si han sufrido alteraciones (ASTM International, 2023b).	Garantizar representatividad y evitar alteraciones durante transporte.
Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelos y rocas. (ASTM D2216)	Determina el contenido de agua de los suelos mediante el secado de muestras a temperatura establecida (ASTM International, 2019).	Determinar humedad natural de las muestras.
Métodos de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas (gradación) de suelos mediante análisis de tamices. (ASTM D6913)	Método para separar partículas en rangos de tamaño y determinar la masa de partículas en cada rango usando tamices específicos (ASTM International, 2021b).	Identificar distribución de partículas gruesas.
Métodos de prueba estándar para Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los suelos (Multipunto). (ASTM D4318)	Determina el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, para clasificar suelos (ASTM International, 2018).	Definir plasticidad y comportamiento de suelos finos.
Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas (gradación) de suelos de grano fino utilizando el análisis de sedimentación (Hidrómetro). (ASTM D7928)	Determina la distribución del tamaño de partículas en suelos de grano fino mediante el análisis de sedimentación (ASTM International, 2021d).	Identificar distribución de partículas finas.

Ensayo	Alcance	Propósito dentro del estudio
Método de prueba estándar para gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de agua. (ASTM D854)	Determina la gravedad específica de los sólidos del suelo, entender propiedades como la porosidad y la saturación (ASTM International, 2023a).	Calcular relaciones volumétricas y porosidad.
Método de prueba estándar para características de compactación del suelo en laboratorio del suelo utilizando un esfuerzo estándar (12 400 ft – lbf/ft ³ (600 KN – m/m ³)). (ASTM D698)	Determina la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo compactado, e identifica la humedad óptima y la densidad máxima (ASTM International, 2021a).	Determinar humedad óptima y densidad seca máxima.
Método de prueba estándar para densidad del suelo y los agregados del suelo - in situ por método no nuclear (DENSÍMETRO ELÉCTRICO).	Mide la densidad del suelo in situ sin necesidad de extracción de muestras ni radiación (CTEC, 2014).	Medir densidad y humedad in situ sin radiación.
Método de prueba estándar para densidad del suelo y los agregados del suelo - in situ por método nuclear (DENSÍMETRO NUCLEAR). (ASTM D2922)	Utiliza radiación gamma para medir la densidad y humedad del suelo directamente en el sitio de trabajo (ASTM International, 2017).	Determinar densidad y humedad in situ mediante radiación gamma.
Método de prueba estándar para la densidad y el peso unitario del suelo in situ mediante el método del cono de arena. (ASTM D1556)	Determina la densidad del suelo in situ mediante el método del cono de arena, aplicable a suelos granulares y cohesivos (ASTM International, 2016).	Medir densidad in situ en suelos granulares y cohesivos.
Métodos de prueba estándar para la determinación de laboratorio de densidad y peso unitario de muestras de suelo. (ASTM D7263)	Determina la densidad y el peso unitario de los suelos en laboratorio, tanto en estado seco como húmedo, siguiendo normativas internacionales (ASTM International, 2021c).	Verificar densidad húmeda y seca en probetas.

En la Tabla 3 se muestran las distintas fases de la investigación y los ensayos que se realizaron en cada una de ellas con las muestras seleccionadas.

TABLA 3
Ensayos realizados para cada muestra de suelo en las distintas
fases de la investigación

Etapas y ensayos realizados	Muestra				
	1	2	3	4	5
Clasificación SUCS					
Contenido de agua. ASTM D 2216	2	2	2	2	2
Granulometría por tamizado. ASTM D 6913	1	1	1	1	1
Límites de consistencia (LL, LP, IP). ASTM D 4318	No aplica	-	-	1	1
Granulometría por hidrometría. ASTM D 7928	No aplica	-	-	1	1
Determinación de contenido de humedad óptimo y peso unitario seco máximo					
Gravedad específica de las partículas sólidas. ASTM D 854	2	-	-	2	2
Compactación del suelo usando esfuerzo estándar. ASTM D 698	1	-	-	1	1
Toma de densidades en el banco de prueba con los distintos equipos					
Densidad en sitio por el método de densímetro eléctrico.	5 puntos	-	-	9 puntos	9 puntos

Etapas y ensayos realizados	Muestra				
	1	2	3	4	5
Clasificación SUCS					
Densidad en sitio por el método de densímetro nuclear. ASTM D 2922	4 puntos (8 lecturas)	-	-	5 puntos (10 lecturas)	5 puntos (10 lecturas)
Densidad en sitio por el método de cono de arena. ASTM D 1556	9 puntos	-	-	9 puntos	9 puntos
Densidad en sitio método relaciones fundamentales. ASTM D 7263	No aplica	-	-	9 puntos	9 puntos

Los resultados registrados por los diferentes métodos de medición de densidad en sitio y su posterior tratamiento estadístico con la finalidad de establecer si existen diferencias en la medición y registro de parámetros por cada uno de los métodos de densidad en sitio. Para ello se ha considerado el tratamiento de datos en grupos por el método ANOVA, que necesariamente requiere que se demuestre la normalidad de los datos previamente.

El proceso de registro de densidades en sitio en el banco de prueba se realizará siguiendo el orden de: densímetro eléctrico, densímetro nuclear, cono de arena y finalmente densidad y peso unitario. En la Figura 1 se muestra el esquema de puntos, así como el número de lecturas por equipo y el total de datos recolectados en la muestra 1, correspondiente a arena (SP).

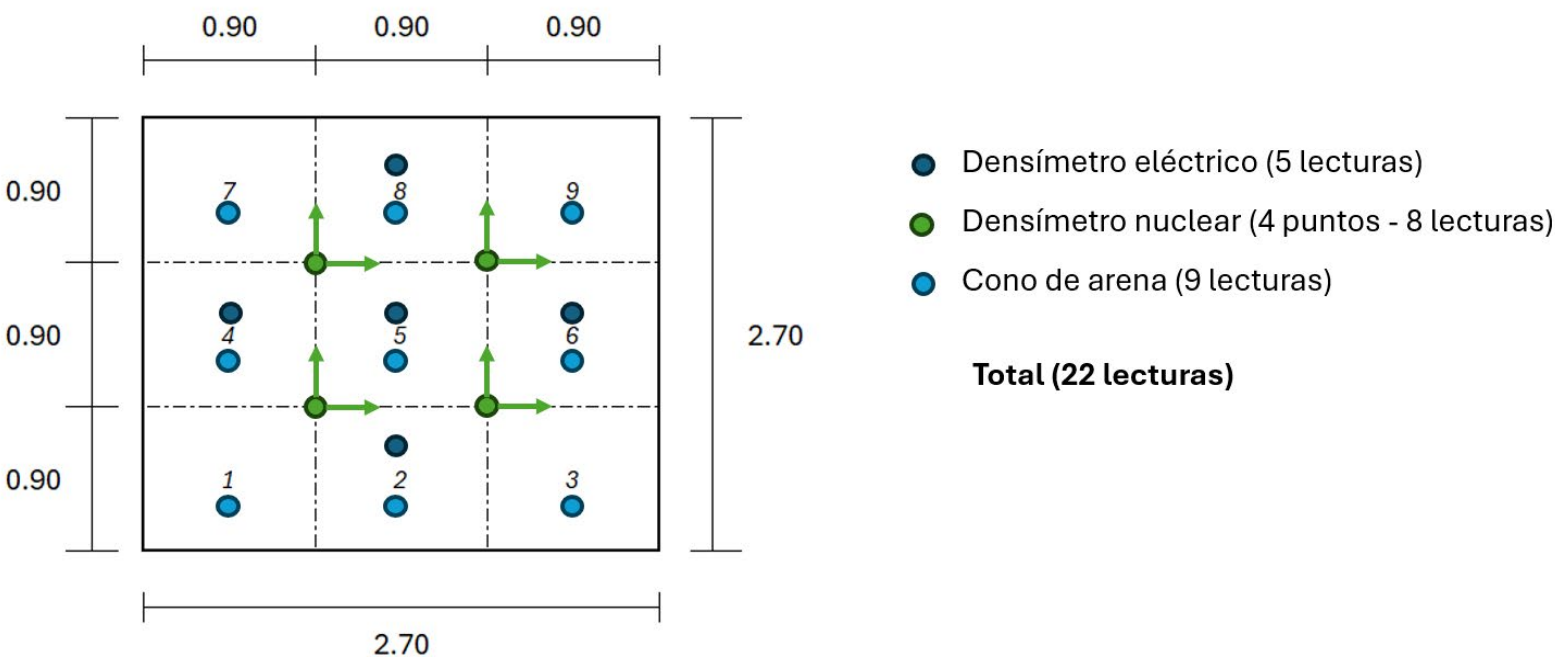


FIGURA 1
Toma de densidades en sitio en la muestra 1 (SP)

De manera similar en la Figura 2 se muestra el esquema de puntos, así como el número de lecturas realizadas por los diferentes equipos y el total de datos recolectados en la muestra 4 (CL) y muestra 5 (MH).

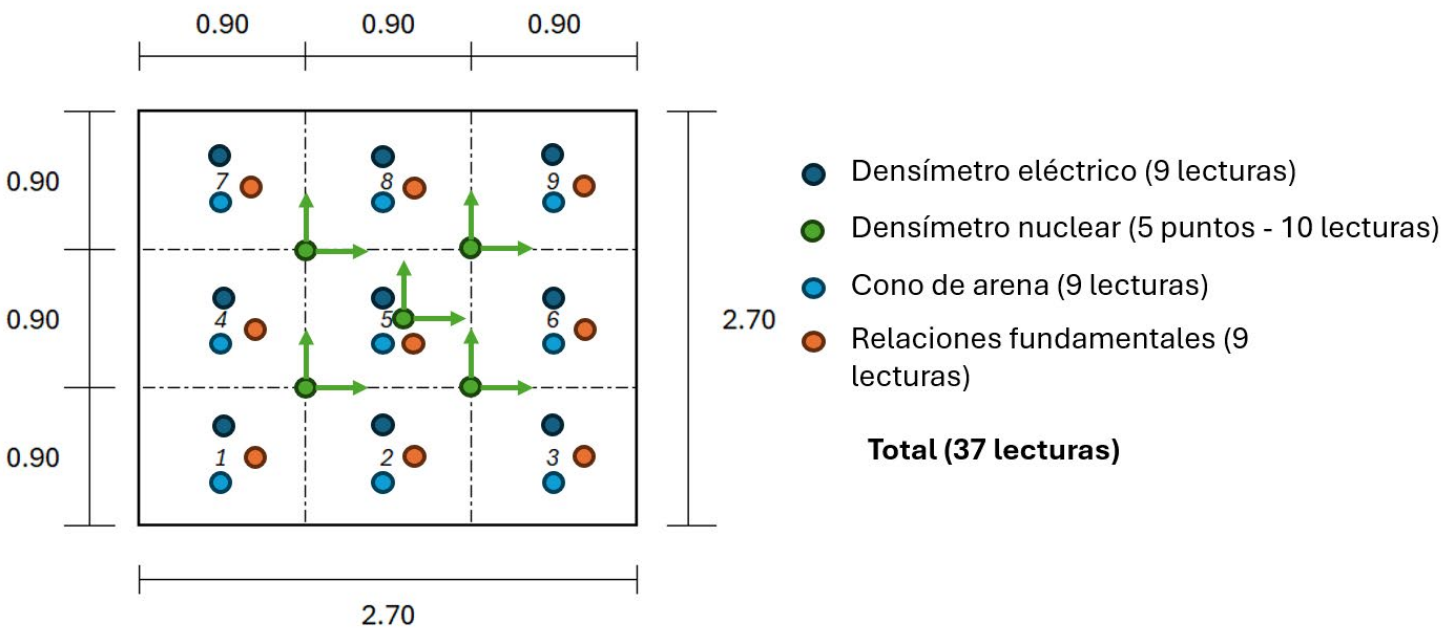


FIGURA 2
Toma de densidades en sitio de la muestra 4 (CL) y muestra 5 (MH)

Para definir el parámetro de precisión se realizará un tratamiento estadístico de los resultados obtenidos. Se empleó estadística descriptiva, para ello se calculó y analizó la media, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación y la prueba de normalidad, complementando con un análisis de varianza (ANOVA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Clasificación SUCS de las muestras recuperadas

Los resultados de granulometría por tamizado de las muestras 1, 2 y 3 se encuentran en la Figura 3. La muestra 1, a diferencia de las muestras 2 y 3 no contiene gravas. De dichas muestras más del 50% pasa la malla No. 4 y poseen menos del 5% de finos. Debido a las características de las muestras ensayadas y para los fines de esta investigación se empleó la muestra 1 siendo esta una arena mal graduada SP.

La muestra 1 está conformada por el 97,2% de arena, su coeficiente de curvatura C_c es 1,09; encontrándose en el rango $[1 < C_c < 3]$; este valor indica que la arena tiene una distribución de partículas que favorece una buena compactación y estabilidad, con un porcentaje menor de vacíos, logrando así una densidad mayor.

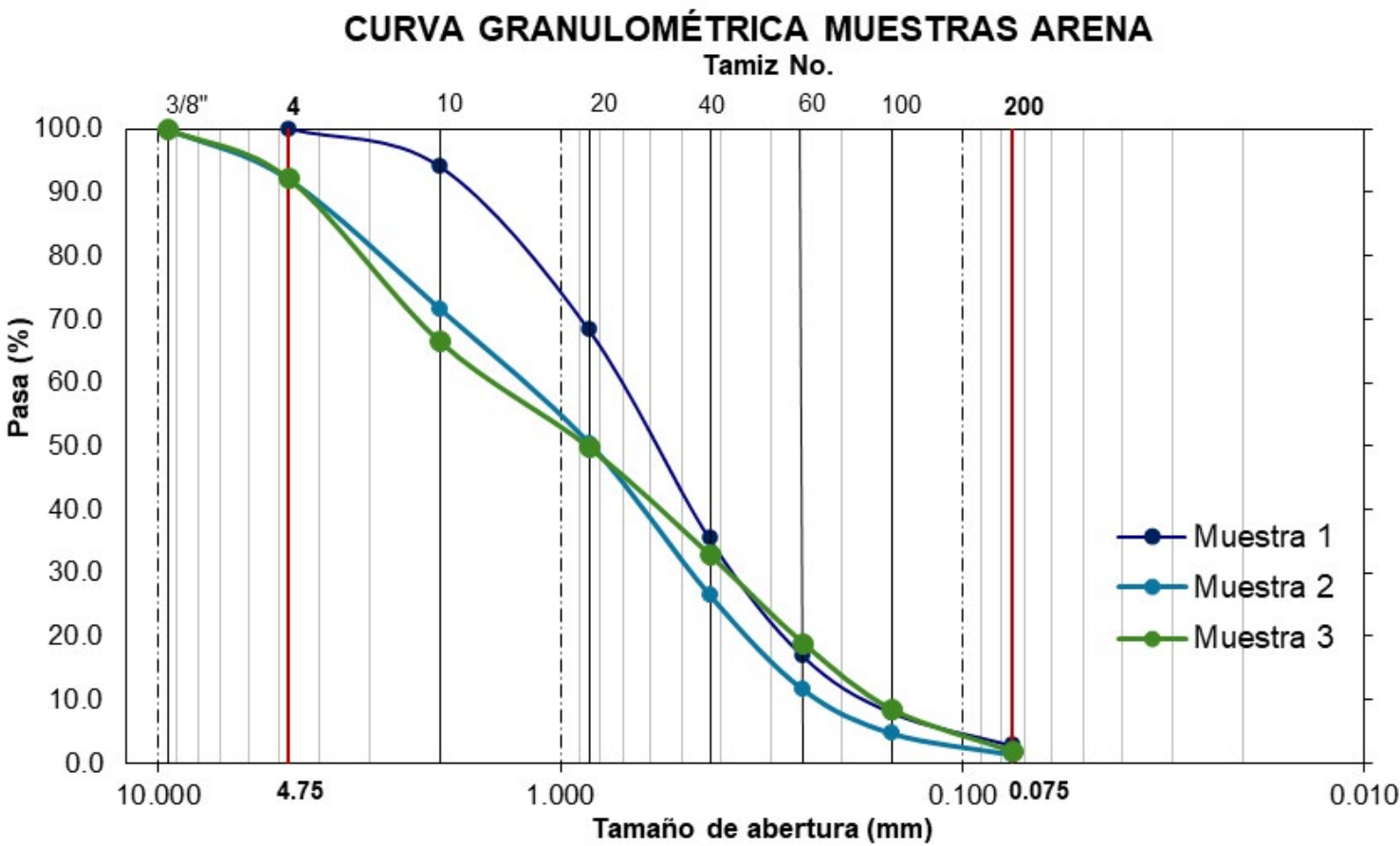


FIGURA 3
Granulometría por tamizado de las muestras 1, 2 y 3

En cuanto a las muestras 4 y 5 sus resultados de granulometría por tamizado e hidrometría se muestran en la Figura 4. La muestra 4 contiene 0,2% de grava, en cuanto a la muestra 5 no contiene grava. En ambas muestras más del 50% pasa el tamiz No. 200, teniendo 65,8% y 75,1% de finos respectivamente.

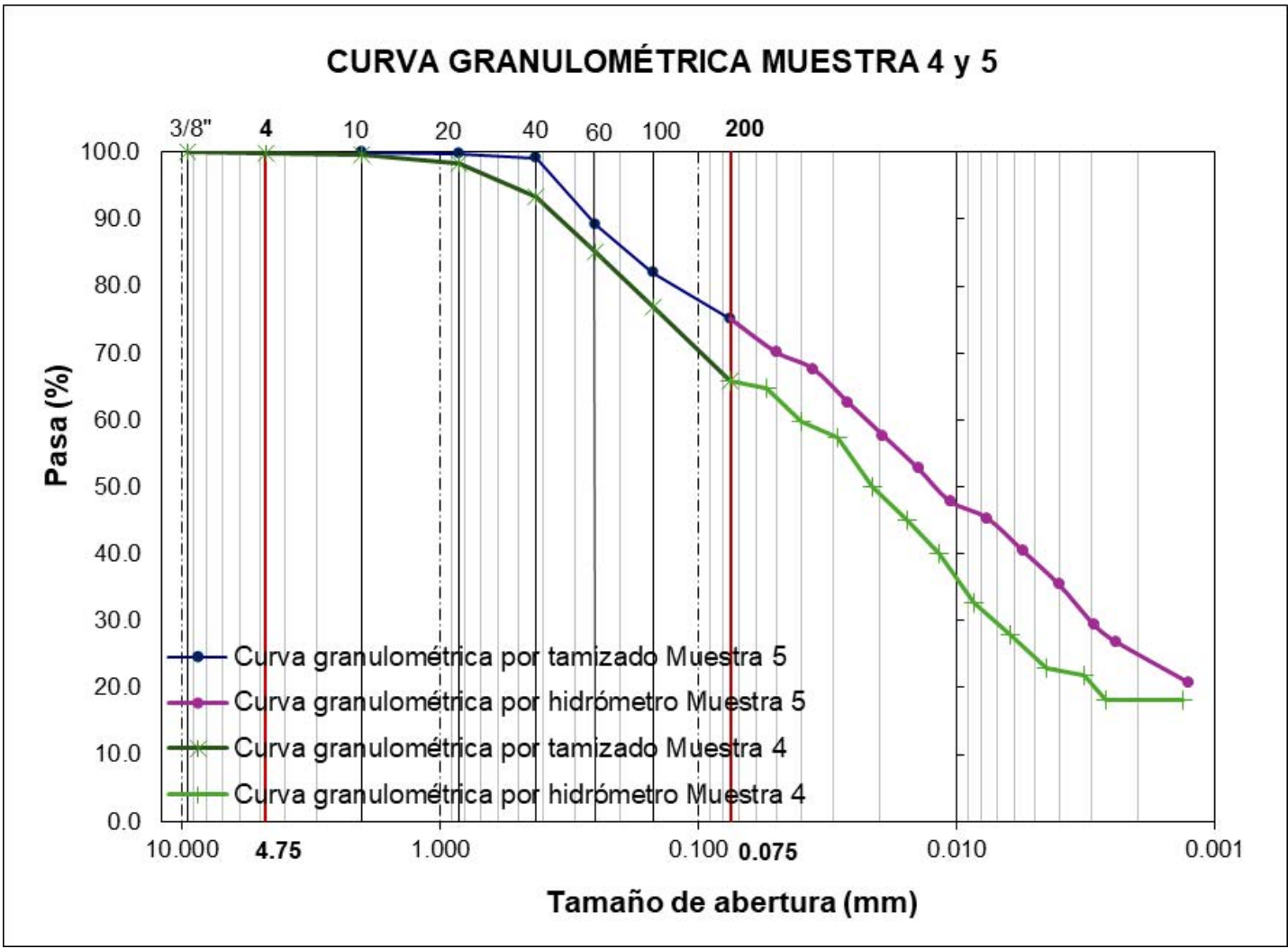


FIGURA 4
Granulometría por tamizado e hidrometría muestra 4 y 5

A partir de los resultados de límite líquido y límite plástico de las muestras 4 y 5, que se muestra en la Figura 5, así como del diagrama de flujo establecido en la norma ASTM D 2487 (ASTM International 2020) es posible definir la composición de cada las muestras empleadas en esta investigación.

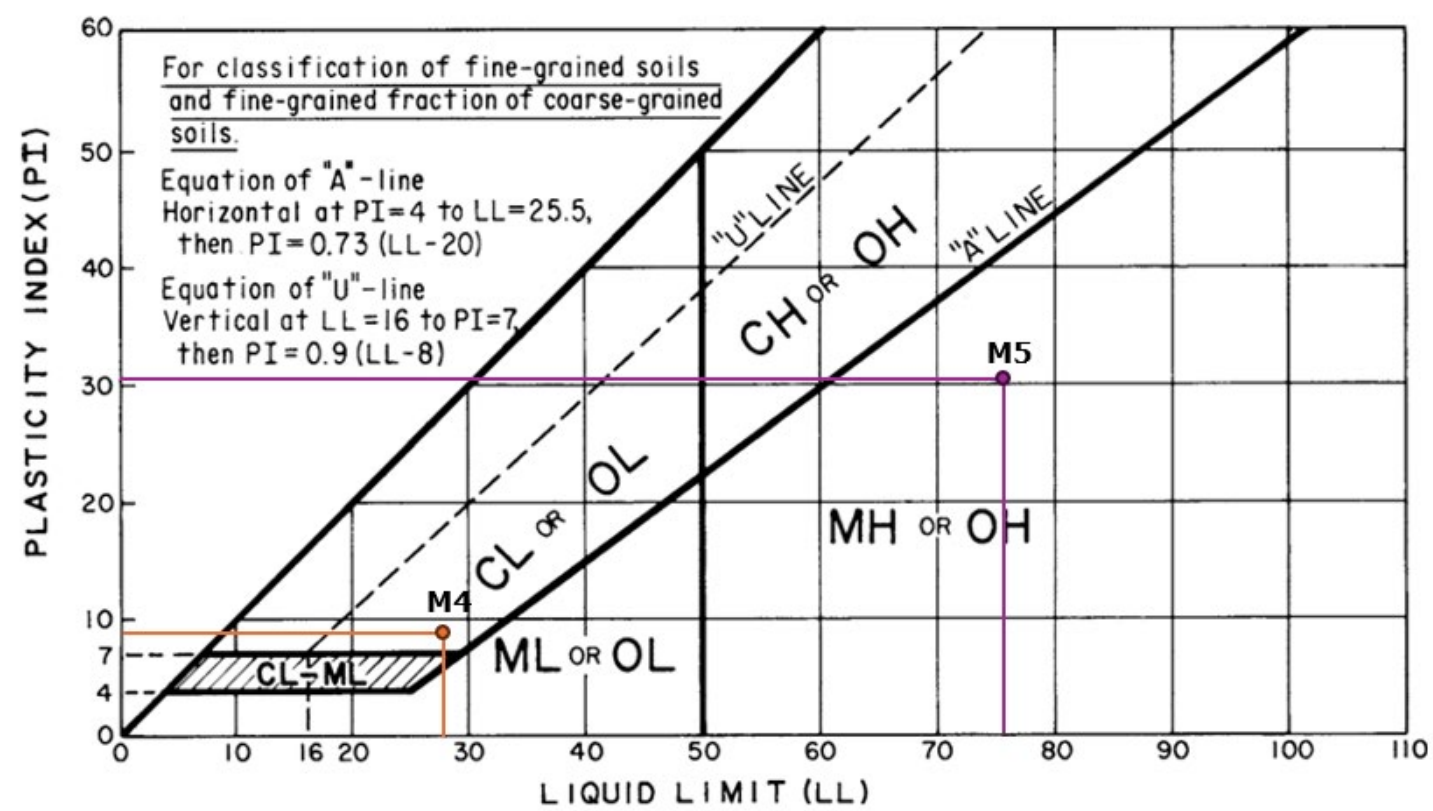


FIGURA 5
Carta de plasticidad muestra 4 y 5

Para la muestra 1, debido a que más del 50% pasa el tamiz No. 4, contiene 2,8% de finos, su $C_u=4,31$ y $C_c=1,09$ y no contiene grava en su granulometría; su símbolo de grupo es SP, siendo una arena pobremente graduada o mal graduada. La muestra 4 posee un Límite Líquido (LL) de 28,4% y no contiene materia orgánica. Su índice de Plasticidad (IP) es 8,2%; el 34,2% del material es retenido por el Tamiz No. 200, contiene 34% de arena y 0,2% de grava. De esta manera su símbolo de grupo es CL, siendo una arcilla arenosa de baja plasticidad. Finalmente, la muestra 5 tiene LL de 75,3%, es un suelo inorgánico, se encuentra por debajo de la línea A en la carta de plasticidad, el 24,9% del material es retenido por el tamiz No. 200, contiene 24,9% de arena y no contiene grava; de esta manera su símbolo de grupo es MH, siendo un limo elástico con arena. Este resumen de resultados se muestra en la Tabla 4.

TABLA 4
Resumen de clasificación SUCS estándar de las muestras empleadas

Muestra	Tipo de suelo				Coeficiente de uniformidad	Coeficiente de curvatura	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Símbolo de grupo
	Grava	Arena	Finos							
			Limo	Arcilla						
	(%)	(%)	(%)	Cu	Cc					
1	0,0	97,2	2,8		4,31	1,09	-	-	-	SP
4	0,2	34,0	54,2	11,6	-	-	28,4	20,2	8,2	CL
5	0,0	24,9	56,6	18,5	-	-	75,3	44,7	30,6	MH

Densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo

La curva de compactación de suelos permite determinar la relación entre el contenido de humedad de un suelo y su densidad seca al ser compactado bajo un esfuerzo específico. A partir de esta curva fue posible controlar la compactación los distintos tipos de suelos en el banco de prueba. Los resultados de contenido de humedad óptimo, peso unitario y densidad seca máxima de las muestras de suelo se muestran en la Tabla 5.

TABLA 5
Resumen de compactación estándar de las muestras ensayadas

Muestra	Contenido Óptimo de Agua	Peso Unitario Seco Máximo	Densidad Seca Máxima
	w_o	$\gamma_d \text{ max}$	$\delta_d \text{ max}$
	(%)	(kN/m³)	(g/cm³)
1	10,7	16,68	1,700
4	18,6	16,06	1,637
5	50,8	9,56	0,975

Las curvas de compactación Proctor estándar para las muestras 1, 4 y 5, junto con su curva de saturación teórica, se presentan en la Figura 6.

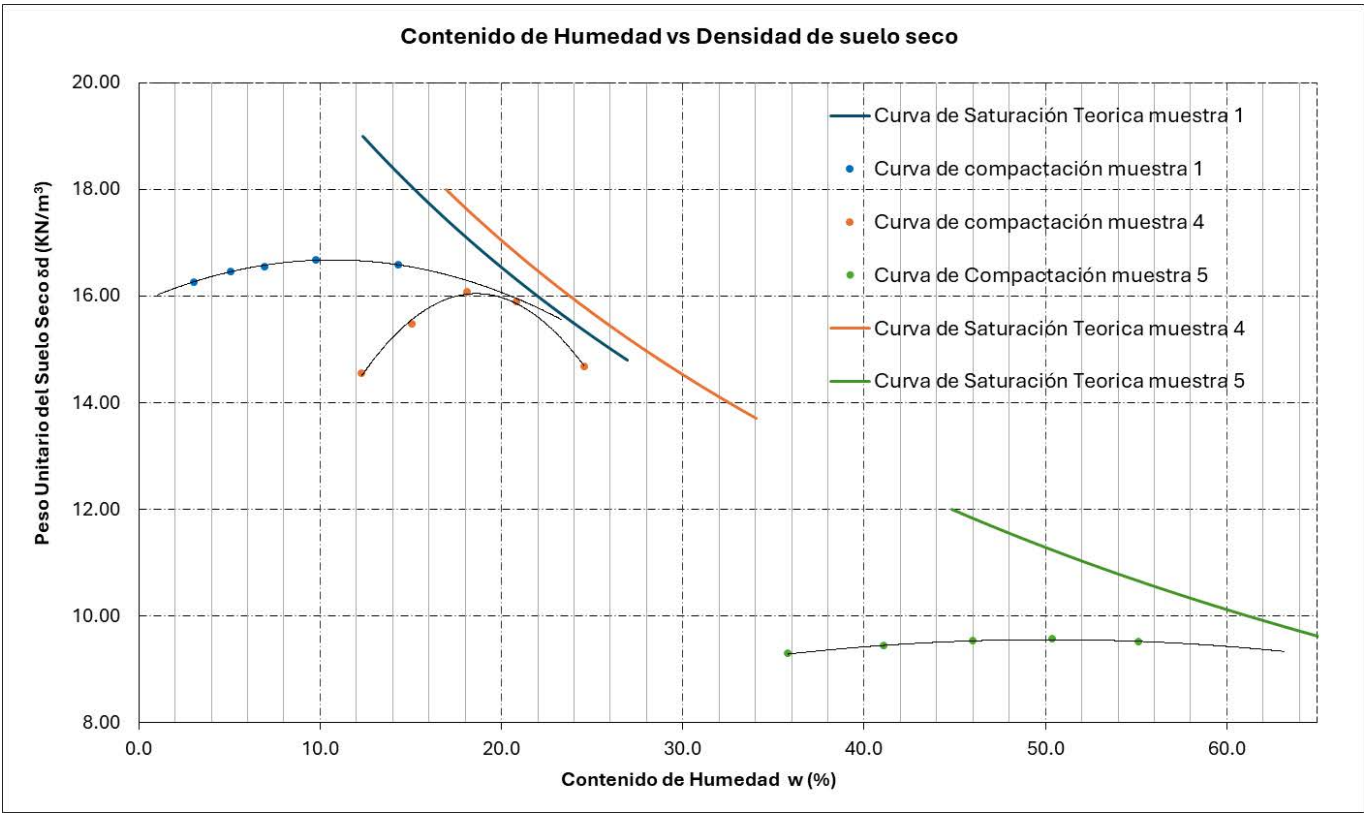


FIGURA 6
Curvas de compactación y curvas de saturación teórica de las muestras ensayadas

Registro de resultados

Con las muestras 1 (SP), 4 (CL) y muestra 5 (MH) se conformaron los bancos de prueba. Se consideraron 9 cuadrantes dentro del banco de prueba de 0,90 m de lado cada uno, en los cuales se consideraron diversos puntos por los métodos directos e indirectos de medición. El tipo de muestreo para realizar el registro de las densidades será no probabilístico, del tipo por conveniencia; esto debido a que puntos de medición sobre la superficie compactada se encuentran en función de las características operativas de los equipos, garantizando al mismo tiempo que las mediciones sean representativas del total de la muestra (Caiza y Racines 2025).

Estadística descriptiva

En la Tabla 6 se presentan los valores de la media aritmética para cada variable evaluada y método de ensayo, facilitando la comparación de la tendencia central. La Tabla 7 muestra la desviación estándar, evidenciando la dispersión y consistencia de las mediciones. Finalmente, la Tabla 8 resume el coeficiente de variación (Posada, 2016). Estos tres cuadros caracterizan inicialmente la precisión antes de realizar el análisis de varianza.

TABLA 6
Media aritmética de los datos obtenidos para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	Método de ensayo	Grado de Compactación (%)	Contenido de Humedad (%)	Densidad Húmeda (g/cm³)	Densidad seca (g/cm³)
Arena	Cono y arena	96,5	6,7	1,752	1,642
	Densímetro Eléctrico	101,5	5,4	1,818	1,734
	Densímetro Nuclear	101,8	5,0	1,811	1,725
Arcilla	Cono y arena	81,7	20,8	1,616	1,338
	Relaciones Fundamentales	92,3	21,0	1,830	1,512
	Densímetro Eléctrico	95,8	21,2	1,898	1,565
	Densímetro Nuclear	77,5	29,3	1,630	1,265
	Cono y arena	91,8	50,9	1,351	0,895
Limo	Relaciones Fundamentales	99,7	50,6	1,463	0,972
	Densímetro Eléctrico	84,7	53,5	1,296	0,845
	Densímetro Nuclear	95,6	51,9	1,451	0,952

TABLA 7
Desviación estándar de los datos obtenidos en medición de densidad

Tipo de suelo	Método de ensayo	Grado de Compactación	Contenido de Humedad	Densidad Húmeda	Densidad seca
Arena	Cono y arena	1,337	0,106	0,025	0,023
	Densímetro Eléctrico	0,729	0,806	0,025	0,024
	Densímetro Nuclear	0,849	0,226	0,014	0,014
Arcilla	Cono y arena	3,746	0,522	0,077	0,061
	Relaciones Fundamentales	2,850	0,373	0,058	0,047
	Densímetro Eléctrico	0,814	0,138	0,017	0,013
	Densímetro Nuclear	3,234	4,377	0,066	0,056
Limo	Cono y arena	2,865	0,788	0,048	0,028
	Relaciones Fundamentales	1,711	0,882	0,029	0,017
	Densímetro Eléctrico	2,530	0,384	0,039	0,023
	Densímetro Nuclear	0,691	1,156	0,011	0,007

TABLA 8
Coeficiente de variación de los datos obtenidos

Tipo de suelo	Método de ensayo	Grado de Compactación	Contenido de Humedad	Densidad Húmeda	Densidad seca
Arena	Cono y arena	1,4	1,6	1,4	1,4
	Densímetro Eléctrico	0,7	15,1	1,4	1,4
	Densímetro Nuclear	0,8	4,6	0,7	0,8
Arcilla	Cono y arena	4,6	2,5	4,8	4,6
	Relaciones Fundamentales	3,1	1,8	3,2	3,1
	Densímetro Eléctrico	0,9	0,6	0,9	0,8
	Densímetro Nuclear	4,2	15,0	4,0	4,4
Limo	Cono y arena	3,1	1,5	3,5	3,1
	Relaciones Fundamentales	1,7	1,7	2,0	1,7
	Densímetro Eléctrico	3,0	0,7	3,0	2,8
	Densímetro Nuclear	0,7	2,2	0,7	0,7

Los resultados muestran que la variabilidad de los métodos depende considerablemente del tipo de suelo y del parámetro medido. El CV permitió cuantificar la dispersión relativa de los datos, evidenciando que los métodos indirectos presentan mayor variabilidad en determinados casos, especialmente en la medición de humedad en suelos cohesivos.

El densímetro nuclear presentó un CV elevado en el contenido de humedad de la arcilla (15,0 %), lo que refleja menor confiabilidad en este parámetro. En contraste, el densímetro eléctrico registró coeficientes de variación inferiores al 1% en arcillas, indicando mayor estabilidad y precisión para este tipo de suelo.

En suelos arenosos, tanto el método del cono de arena como el densímetro nuclear mostraron una variabilidad inferior al 5 %, confirmando su estabilidad y precisión en materiales granulares. Sin embargo, el densímetro eléctrico presentó alta dispersión en la medición de humedad (CV = 15,1 %), lo que sugiere precaución en su uso para este parámetro.

En suelos limosos, el densímetro nuclear alcanzó los CV más bajos (0,7 %) para densidad y grado de compactación, destacándose como el método más confiable en este tipo de material. En cambio, el método del cono de arena mostró mayor variabilidad en la densidad húmeda (CV = 3,5 %), probablemente asociado a la mayor dificultad de recolección de muestras representativas en estos suelos.

Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran los diagramas de caja y bigotes de la muestra 1 para los parámetros registrados de grado de compactación, contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca y sus medidas de tendencia centra y dispersión que se mostraron en las tablas anteriores.

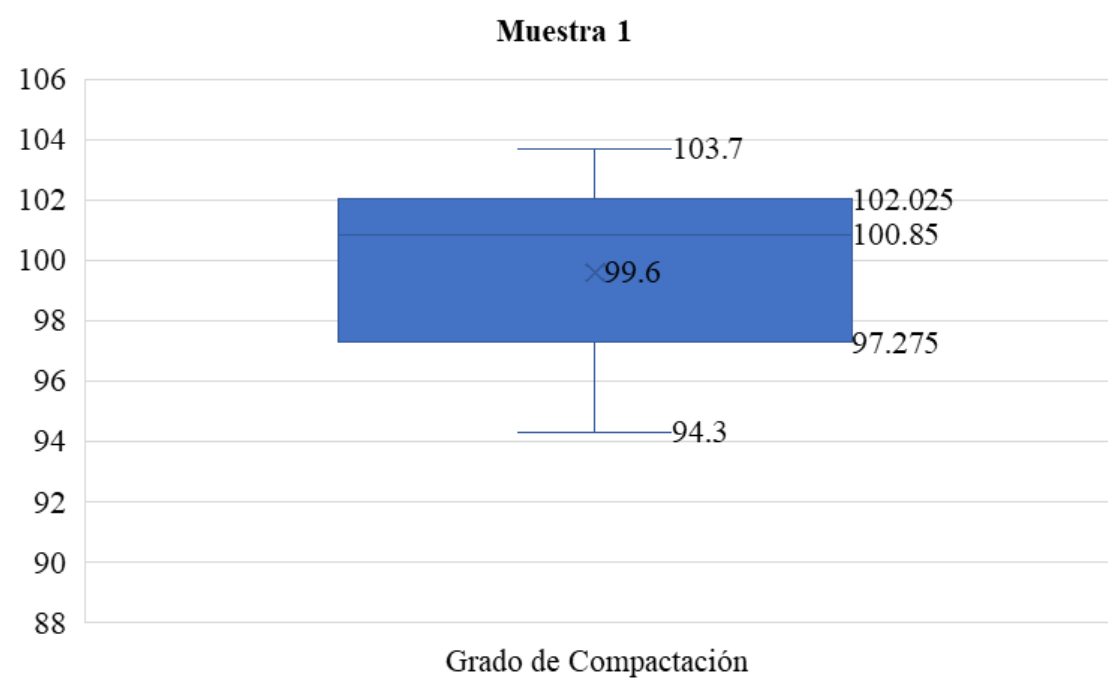


FIGURA 7
Diagrama Box Plot para el grado de compactación (Gc) muestra 1

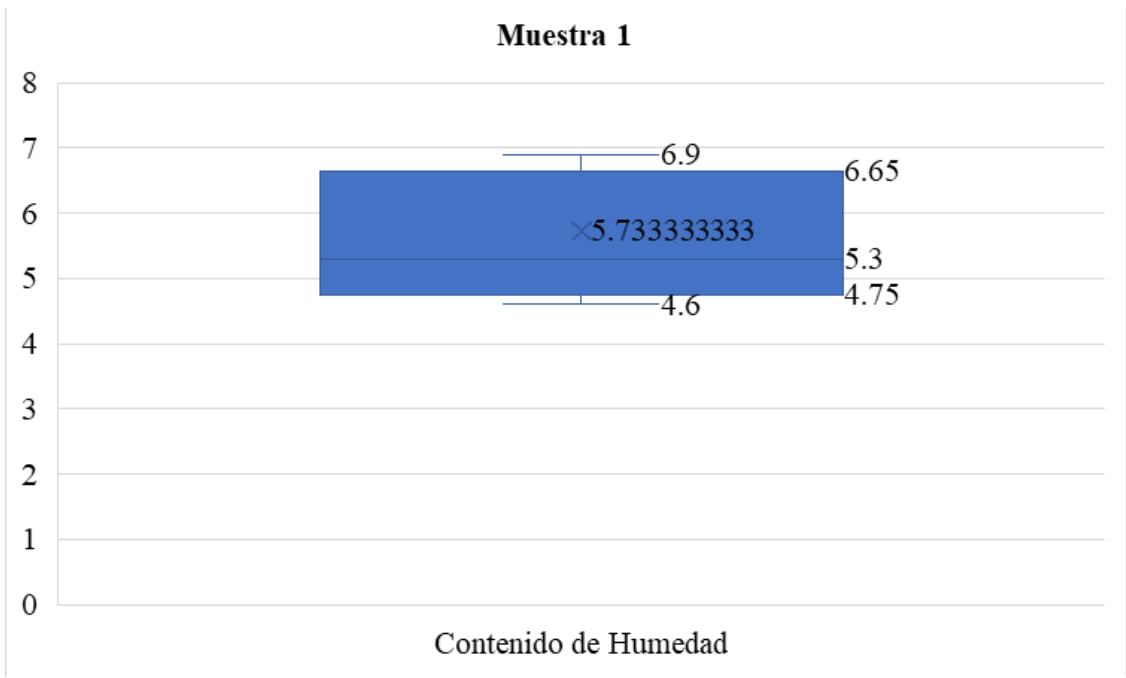


FIGURA 8
Diagrama Box Plot para el contenido de humedad muestra 1

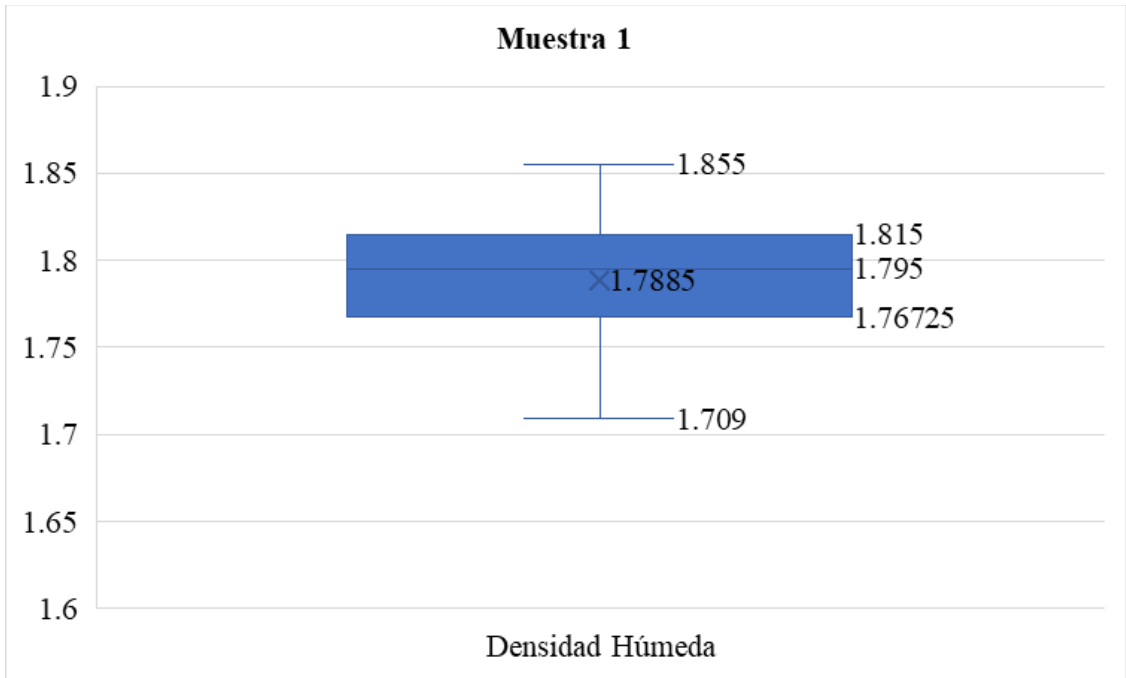


FIGURA 9
Diagrama Box Plot para Densidad húmeda muestra 1

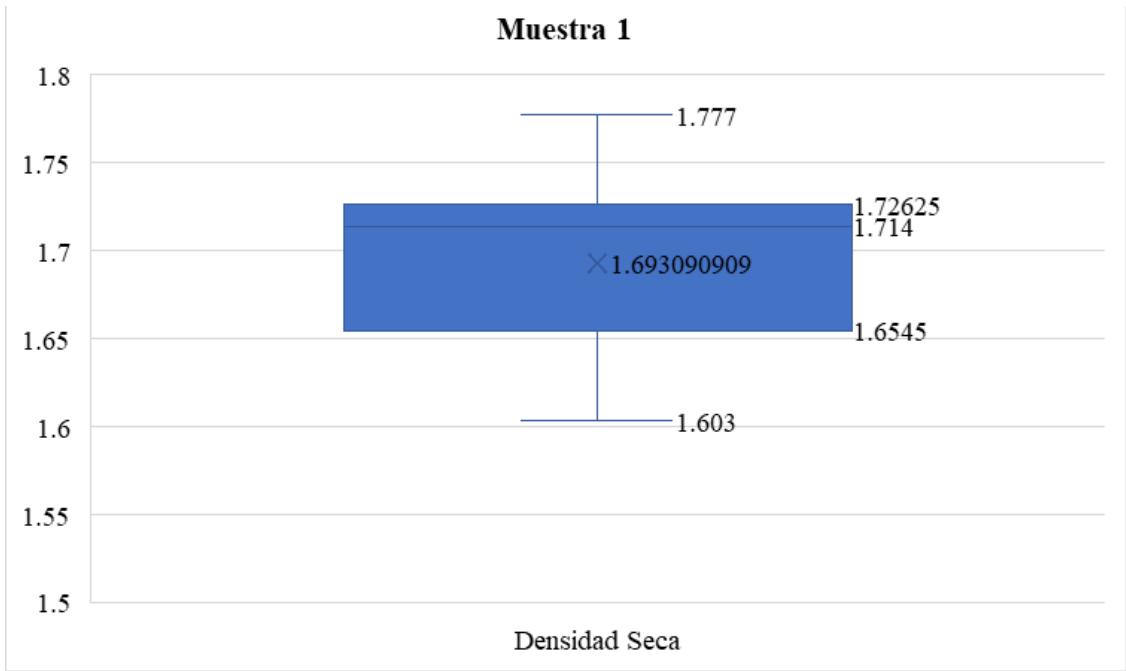


FIGURA 10
Diagrama Box Plot para Densidad seca muestra 1

Prueba de normalidad

La distribución normal indica que la distribución de probabilidad es simétrica alrededor de su media (Romero Saldaña, 2016). Para evaluar la normalidad, se empleó la prueba gráfica del Diagrama Q-Q (Quantile-Quantile), este permite una comparación visual entre los cuantiles de los datos muestrales y los cuantiles esperados de una distribución de referencia. (Castillo Gutiérrez y Lozano Aguilera, 2007).

En las Figuras 11, 12, 13 y 14 se muestran los diagramas cuantil-cuantil para la muestra 4 (CL), del grado de compactación, contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca.

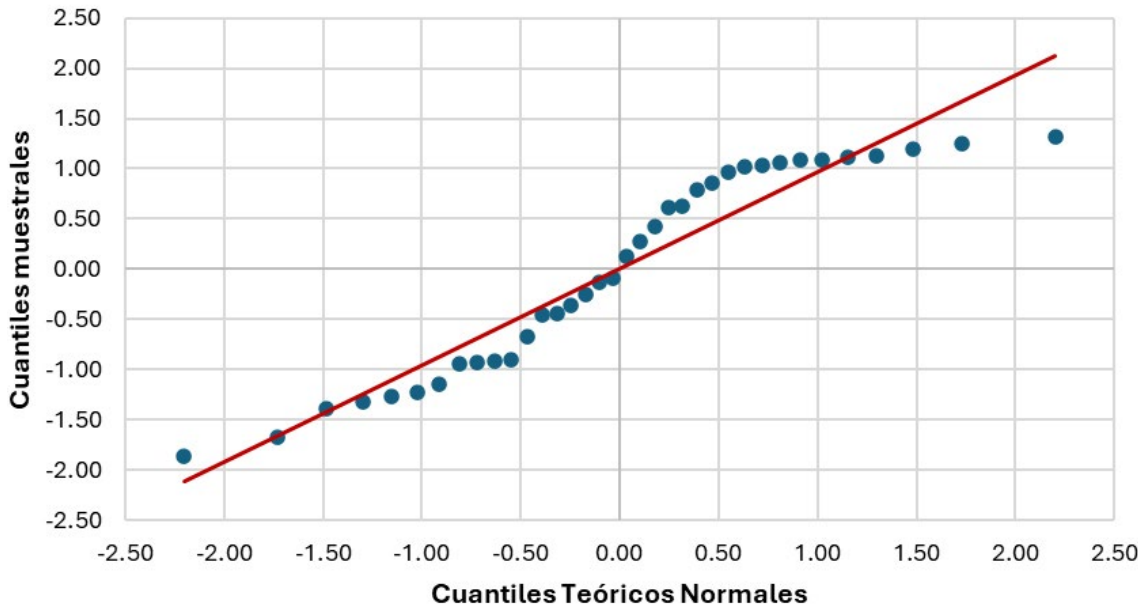


FIGURA 11
Diagrama Q-Q para el grado de compactación (Gc) muestra 4

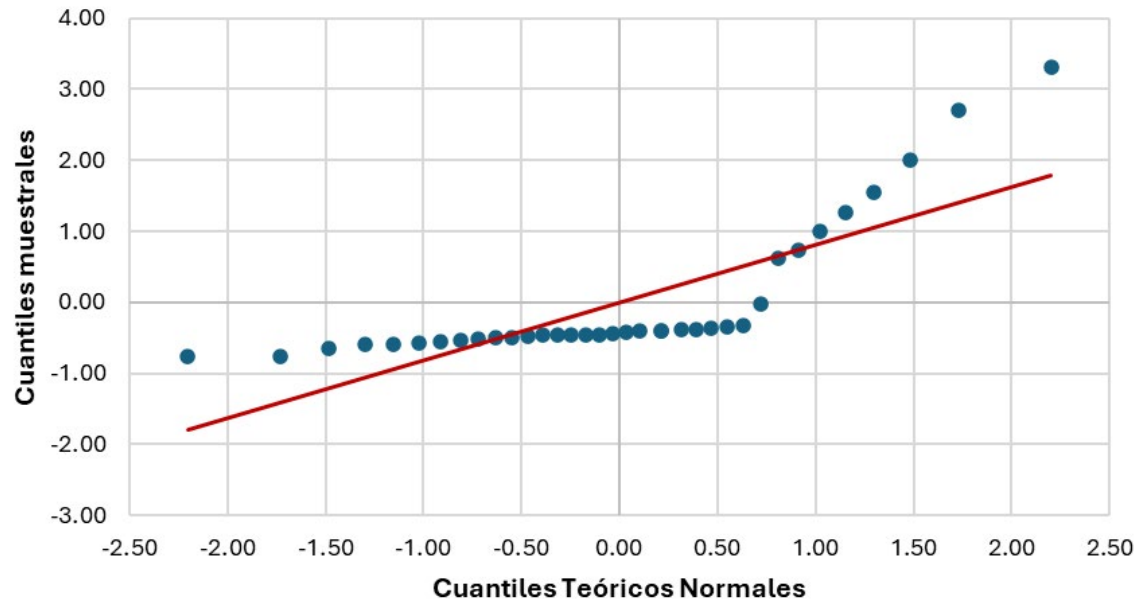


FIGURA 12
Diagrama Q-Q para el contenido de humedad (w) muestra 4

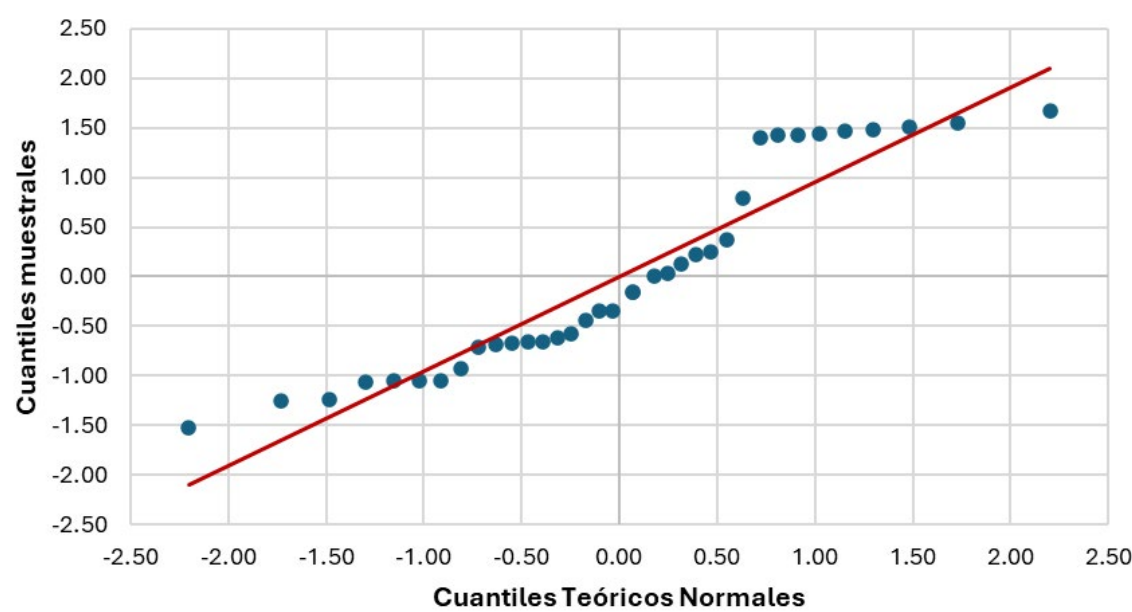


FIGURA 13
Diagrama Q-Q para la densidad húmeda muestra 4

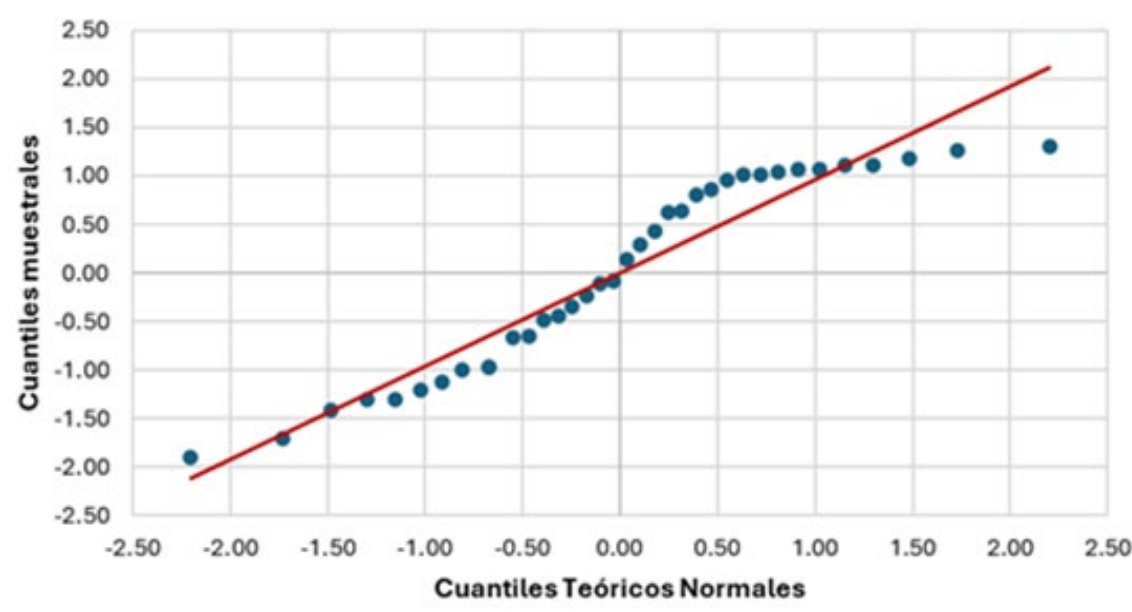


FIGURA 14
Diagrama Q-Q para la densidad seca muestra 4

A partir de los diagramas mostrados es posible afirmar que la distribución de la población es normal debido a que los puntos de la gráfica están considerablemente cerca de su línea de tendencia (Langenberg et al. 2022).

Los análisis de normalidad mediante diagramas Q-Q evidenciaron que los datos de los métodos con mayor precisión tienden a ajustarse a una distribución normal, lo cual respalda la validez de los análisis paramétricos realizados. Esto refuerza la hipótesis planteada de que los métodos de medición presentan comportamientos diferenciados según el tipo de suelo.

Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza o también conocido como ANOVA, permitió comparar cuando existen dos o más grupos y cuando existen más de dos mediciones en cada grupo (Vicéns et al., 2005).

En esta investigación se consideraron como grupos a los métodos empleados para registrar los diversos parámetros de la densidad en sitio. Para la arena (SP) se consideraron tres grupos, siendo estos: densímetro eléctrico, densímetro nuclear y cono de arena; mientras que para la arcilla (CL) y limo (MH) se consideraron cuatro siendo los mencionados con adición del método de densidad peso unitario.

Para todas estas pruebas se definieron las siguientes hipótesis nula y alterna:

- Ho: Las medias de los métodos de medición son iguales.
- Hi: Las medias de los métodos de medición no son iguales.

El nivel de significancia empleado para el análisis corresponde a $\alpha = 0,05$ (5%), e indica la probabilidad de rechazar la hipótesis nula (Crawley 2013). Este valor será comparado con los resultados obtenidos de probabilidad (p). Los resultados de la aplicación de esta prueba estadística para las variables de grado de compactación, contenido de humedad, densidad húmeda y densidad seca por cada tipo de suelo se muestran en las Tablas 9, 10, 11 y 12.

TABLA 9
Cuadro resumen de ANOVA para el grado de compactación

Muestra	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	p	Valor crítico para F
1 (SP)	Entre grupos	140,813	2	70,407	54,578	1.33x10 ⁻⁸	3,522
	Dentro de los grupos	24,510	19	1,290			
4 (CL)	Entre grupos	2105,542	3	701,847	74,735	8.49x10 ⁻¹⁵	2,892
	Dentro de los grupos	309,910	33	9,391			
5 (MH)	Entre grupos	1099,533	3	366,511	74,382	9.08x10 ⁻¹⁵	2,892
	Dentro de los grupos	162,604	33	4,927			

TABLA 10
Cuadro resumen de ANOVA para el contenido de humedad

Muestra	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	p	Valor crítico para F
1 (SP)	Entre grupos	14,594	2	7,297	36,888	2,87x10 ⁻⁷	3,522
	Dentro de los grupos	3,758	19	0,198			
4 (CL)	Entre grupos	495,261	3	165,087	27,867	3,62x10 ⁻⁹	2,892
	Dentro de los grupos	195,494	33	5,924			
5 (MH)	Entre grupos	47,220	3	15,740	19,037	2,40x10 ⁻⁷	2,892
	Dentro de los grupos	27,285	33	0,827			

TABLA 11
Cuadro resumen de ANOVA para densidad húmeda

Muestra	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	p	Valor crítico para F
1 (SP)	Entre grupos	0,020	2	0,010	18,723	3,22x10 ⁻⁵	3,522
	Dentro de los grupos	0,010	19	0,001			
4 (CL)	Entre grupos	1,527	3	0,509	227,728	4,06x10 ⁻²²	2,892
	Dentro de los grupos	0,074	33	0,002			
5 (MH)	Entre grupos	0,177	3	0,059	45,356	8,30x10 ⁻¹²	2,892
	Dentro de los grupos	0,043	33	0,001			

TABLA 12
Cuadro resumen de ANOVA para densidad seca

Muestra	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	p	Valor crítico para F
1 (SP)	Entre grupos	0,276	2	0,138	1,095	3.54x10 ⁻¹	3,493
	Dentro de los grupos	2,516	20	0,126			
4 (CL)	Entre grupos	0,567	3	0,189	72,337	1.35x10 ⁻¹⁴	2,892
	Dentro de los grupos	0,086	33	0,003			
5 (MH)	Entre grupos	0,090	3	0,030	66,937	4.07x10 ⁻¹⁴	2,892
	Dentro de los grupos	0,015	33	0,000			

A partir de los resultados obtenidos se analizó el estadístico F resultante en comparación con su valor tabulado o valor crítico para F siendo este en todos los casos mayores que su valor crítico. Debido a que en todos los casos F es mayor que su valor crítico se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, lo cual indica que las medias de los métodos son diferentes, o un par de medias es diferente. A su vez, los cálculos realizados arrojaron el valor de significancia estadística (p), el cual al ser comparado con su valor tabulado o nivel de significancia de 0,05 permite, de igual manera, rechazar la hipótesis nula y aceptar la alterna. Asegurando que, estadísticamente, las medias de los tres métodos de medición del grado de compactación son diferentes.

Los resultados de ANOVA confirmaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los métodos de medición para todos los tipos de suelos y parámetros evaluados ($p < 0,05$), por lo que se rechazó la hipótesis nula (H_0) y se aceptó la hipótesis alternativa (H_i). Esto valida la afirmación de que no todos los métodos ofrecen resultados equivalentes, y que su desempeño varía en función del suelo y el parámetro medido.

CONCLUSIONES

La determinación de la densidad de arena, limo y arcilla mediante métodos directos e indirectos permitió identificar diferencias significativas entre las metodologías utilizadas. A partir del análisis del coeficiente de variación (CV), se determinó que la precisión de los métodos empleados varía en función del tipo de suelo analizado. Los suelos arenosos presentan menor sensibilidad a la variabilidad en los métodos directos, mientras que los suelos arcillosos y limosos requieren un mayor control de condiciones para obtener resultados consistentes.

Estos hallazgos son relevantes para la ingeniería civil, ya que permiten orientar la selección de metodologías más adecuadas según el tipo de suelo, las condiciones del proyecto y la precisión requerida. En términos generales, el método del cono de arena resultó ser el más preciso en suelos arenosos, aunque con limitaciones para suelos cohesivos y con alto contenido de humedad. El densímetro nuclear demostró versatilidad y rapidez, especialmente en suelos limosos, mientras que el densímetro eléctrico destacó por su precisión en arcillas, siempre que se garantice su calibración periódica.

Para suelos granulares como la arena los métodos de mayor confiabilidad corresponden al cono de arena y densímetro nuclear. Por su parte los suelos de grano fino como la arcilla presenta mayor confiabilidad en los resultados obtenidos con el método de densidad y peso unitario; y finalmente el suelo limoso presenta mejor confiabilidad empleando el densímetro eléctrico en el registro de densidad en sitio.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seleccionar el método de medición de densidad considerando el tipo de suelo, su contenido de humedad y las condiciones de compactación. En suelos con alto contenido de finos, se debe priorizar métodos que ofrezcan menor variabilidad y mayor estabilidad en la medición. Para mejorar la confiabilidad de los resultados, se sugiere complementar las mediciones de densidad con ensayos de caracterización del suelo que permitan identificar cómo sus propiedades físicas afectan las mediciones. Además, realizar mediciones en diferentes condiciones de humedad ayudará a reducir la incertidumbre en los resultados.

Se debe garantizar la calibración y mantenimiento periódico de los equipos de medición, especialmente en el caso del densímetro nuclear y el densímetro eléctrico, ya que cualquier desviación en su funcionamiento puede afectar la precisión de las mediciones y generar errores sistemáticos.

La combinación de métodos mejora la precisión, calibrar el densímetro nuclear y eléctrico con el método de cono y arena permite reducir errores.

Para optimizar la elección del método de medición, deben considerarse no solo los niveles de precisión obtenidos, sino también aspectos operativos como la facilidad de calibración, la disponibilidad de personal capacitado y los tiempos de medición. De esta manera, se pueden establecer procedimientos de control de calidad más eficientes y seguros en la construcción de terraplenes, carreteras y demás infraestructuras.

Contribuciones de los autores

Caiza Cachumba Brenda Nicole: conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, recursos, redacción – borrador original.

Racines Crespo José Sebastián: conceptualización, análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología, recursos, redacción – borrador original.

León Torres Paúl Javier: conceptualización, supervisión, validación, redacción – revisión y edición.

Cesión de derechos y declaración de conflicto de intereses

La revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo conserva los derechos patrimoniales (copyright) de la obra publicada, al mismo tiempo que promueve y permite su reutilización. La obra se publica en edición electrónica bajo la licencia Creative Commons CC-BY 4.0, que permite a los usuarios compartir, copiar y redistribuir el contenido, siempre que se dé el debido reconocimiento a los autores. (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es_ES).

Los autores declaran haber respetado los principios éticos de investigación y estar libre de cualquier conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- ASTM International (2016) *ASTM D1556: Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: https://www.astm.org/d1556_d1556m-15e01.html
- ASTM International (2017) *ASTM D2922: Standard Test Methods for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth)*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d2922-05.html>
- ASTM International (2018) *ASTM D4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- ASTM International (2019) *ASTM D2216: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d2216-19.html>
- ASTM International (2020) *ASTM D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d2487-17e01.html>
- ASTM International (2021a) *ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d0698-12r21.html>
- ASTM International (2021b) *ASTM D6913: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: https://www.astm.org/d6913_d6913m-17.html
- ASTM International (2021c) *ASTM D7263: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density and Unit Weight of Soil Specimens*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d7263-21.html>
- ASTM International (2021d) *ASTM D7928: Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d7928-21e01.html>
- ASTM International (2023a) *ASTM D854: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by the Water Displacement Method*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: <https://www.astm.org/d0854-23.html>
- ASTM International (2023b) *ASTM D4220: Standard Practices for Preserving and Transporting Soil Samples*. Advancing Standards Transforming Markets. Disponible en: https://www.astm.org/d4220_d4220m-14.html
- Caiza, B. y Racines, J. (2025) *Evaluación de la precisión en la medición de la densidad de arena, limo y arcilla aplicando métodos directos e indirectos en bancos de prueba en laboratorio*. Trabajo de grado. Universidad Central del Ecuador. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/37523>
- Castillo Gutiérrez, S. y Lozano Aguilera, E.D. (2007) "Q-Q Plot Normal. Los puntos de posición gráfica", *Revista electrónica Universidad de Jaén*, 2(9). Disponible en: <https://revistaselectronicas.ujaen.es/index.php/ininv/article/viewFile/259/241>
- Crawley, M.J. (2013) *The R Book*. 2da ed. West Sussex: John Wiley & Sons Inc. Disponible en: https://livresbioapp.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/07/crawley-the_r_book.pdf
- CTEC (2014) *Uso y aplicación del densímetro no nuclear SDG-200 para el control receptivo en terreno de bases granulares y sub bases mediante impedancia eléctrica*. Panamá. Disponible en: <https://ctecpanama.com/wp-content/uploads/2021/01/Presentacion-SDG-200-06-08-14.pdf>
- Das, B.M. y Sobhan, K. (2018) *Principles of Geotechnical Engineering*. 9th ed. Cengage Learning. Disponible en: <https://aportesingecivil.com/principles-of-geotechnical-engineering-9th-edition-braja-m-das/>

- Flores, J. (2014) *Validación de la determinación de la densidad in-situ, de un tramo del proyecto "Collas-Tababela", utilizando un densímetro eléctrico y comparando los resultados con el densímetro nuclear y el cono y arena*. Tesis de grado. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/db7db57b-0030-4958-9c1b-f5c397aa715c>
- Gabriels, D. y Lobo, D. (2013) *Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo*. Universidad Central de Venezuela. Disponible en: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/4938481>
- Gutiérrez Rodríguez, W.Á. (2023) "Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado", *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2), pp. 6908-6927. DOI: 10.37811/cl_rcm.v7i2.5834
- Knappett, J.A. y Craig, R.F. (2012) *Craig's Soil Mechanics*. 8a ed. Londres: E & FN Spon. DOI: 10.1201/b12841
- Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (2002) *Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes*. Quito: MOP. Disponible en: https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/01/MPR_Chimborazo_Cumanda_Especificaciones-Tecnicas-MOP-001-F-2002.pdf
- Posada, G. (2016) *Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos*. Medellín: Fundación Universitaria Luis Amigó. Disponible en: https://www.funlam.edu.co/uploads/fondoeditorial/120_Ebook-elementos_basicos.pdf
- Romero Saldaña, M. (2016) "Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal", *Revista Enfermería del Trabajo*, 6(3), pp. 105- 114. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>
- Vicéns, J., Herrarte, A. y Medina, E. (2005) *Análisis de la Varianza (ANOVA)*. Universidad Autónoma de Madrid. Disponible en: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w25298w/M1CDN114_S5_Analisis_de_la_varianza.pdf
- Yepes, V. (2019) *Control de calidad de la compactación de un suelo*. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/03/08/control-de-calidad-de-la-compactacion-de-un-suelo/>