

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

“ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA EN MÉTODOS DE PRUEBA ESTANDAR DE MECÁNICA DE SUELOS, PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS EN EL LABORATORIO DE LA EMPRESA VICAF SAC DE CAJAMARCA - CAJAMARCA”

Para optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL

Autor:
BACH. NÚÑEZ MEJÍA VILLY BEINER

Asesor:
DR. ING. HERMES ROBERTO MOSQUEÍRA RAMIREZ

CAJAMARCA – PERÚ

2023



CERTIFICADO DE ORIGINALIDAD

La que suscribe, Directora de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca certifica:

La originalidad de la tesis denominada **ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA EN MÉTODOS DE PRUEBA ESTANDAR DE MECÁNICA DE SUELOS, PARA EL ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DE LOS RESULTADOS EN EL LABORATORIO DE LA EMPRESA VICAF SAC DE CAJAMARCA - CAJAMARCA**, realizada por el Bachiller en Ingeniería Civil **VILLY BEINER, NÚÑEZ MEJÍA** de acuerdo al resultado del análisis reportado por su asesor **Dr. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez** con el software antiplagio Urkund que indica **2% (dos por ciento)** de índice de similitud, asignándole el código **D174347744**.

Se expide el presente certificado para los fines pertinentes.

Cajamarca, 22 de setiembre del 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN


Dra. Yvonne Katherine Fernández León
DIRECTORA

Cc.
Archivo
c11723vn

COPYRIGHT@2023 by
VILLY BEINER NÚÑEZ MEJÍA
Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTO

A mis queridos padres y hermanos por su apoyo constante en el camino hacia mi formación profesional. Su amor, aliento y confianza han sido mi motor. Gracias por estar siempre a mi lado.

A mi asesor de tesis, Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez por su orientación y su dedicación para guiarme a lo largo de este proceso.

A mis profesores y a todos aquellos que compartieron su conocimiento conmigo, cada lección, cada conversación, me ha ayudado a crecer como estudiante y como persona.

A mis amigos y seres queridos, quienes han estado a mi lado, brindándome su apoyo moral y motivacional en cada paso del camino.

Por último, pero no menos importante, quiero agradecer a mí mismo por la dedicación, el esfuerzo y la perseverancia que he puesto en este proyecto. He superado obstáculos, he enfrentado momentos difíciles, pero nunca perdí de vista mi objetivo, y eso es motivo de orgullo.

Esta tesis no solo es un logro personal, sino también un reflejo del apoyo y el trabajo en equipo que he experimentado. A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

DEDICATORIA

A Dios, guía que ilumina mis pasos, gracias por sostenerme y guiarme en momentos de incertidumbre, por darme fuerzas cuando parecía imposible seguir adelante.

Reconozco tu mano en cada triunfo y dificultad, y me siento bendecido por tu inquebrantable amor.

A mis padres, fuente inagotable de amor y apoyo, su constante aliento ha sido mi motor a lo largo de este camino. Cada sacrificio, cada palabra de aliento, son los cimientos de este logro. Agradezco infinitamente su presencia en mi vida que hacen de mí el ser humano que soy.

A mis hermanos, compañeros de vida y cómplices de risas y lágrimas, su respaldo ha sido invaluable. Juntos enfrentamos obstáculos, celebramos pequeños avances y forjamos recuerdos que atesoraré por siempre. Son mi roca y mi inspiración.

A mi novia, tu amor incondicional ha sido mi ancla. Tu paciencia, comprensión y ánimo me han dado la fuerza para superar los desafíos. A tu lado, todo es posible.

Este logro es un reflejo de la unión de todos ustedes en mi vida, y les dedico este logro como muestra de mi gratitud y amor eterno. ¡Gracias por ser mi equipo inquebrantable!

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
INDICE GENERAL.....	iv
INDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
CAPITULO I.....	18
INTRODUCCION.....	18
1.1. Planteamiento del problema.....	18
1.2. Formulación del problema.....	19
1.3. Hipótesis de investigación.....	19
1.4. Justificación de la investigación.....	19
1.5. Objetivos.....	20
1.1.1. Objetivo general.....	20
1.1.2. Objetivos específicos.....	20
1.6. Alcance y delimitación de la investigación.....	21
1.1.3. Alcance.....	21
1.1.4. Delimitación de la investigación.....	21
1.7. Limitaciones.....	22
CAPITULO II.....	23
MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Antecedentes Teóricos de la investigación.....	23
2.1.1. Antecedentes a nivel internacional.....	23
2.1.2. Antecedentes a nivel nacional.....	24

2.2. Bases Teóricas	25
2.2.1. Incertidumbre de medida	25
2.2.1.1. Definición de Incertidumbre	25
2.2.1.2. Definición de mensurando	26
2.2.1.3. Error e incertidumbre	26
2.2.1.4. Metodologías y aplicaciones para estimar la incertidumbre	26
2.2.2. Proceso de estimación de la incertidumbre de medida.....	28
2.2.2.1. Especificar el mensurando y el sistema de medición	28
2.2.2.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	29
2.2.2.3. Cuantificación de las fuentes de incertidumbre	30
2.2.2.4. Evaluación de la incertidumbre estándar tipo A.....	31
2.2.2.5. Evaluación de la incertidumbre estándar tipo B.....	32
2.2.2.6. Incertidumbre estándar combinada, uc.....	33
2.2.2.7. Incertidumbre Expandida, U	34
2.2.2.8. Factor de cobertura	34
2.2.3. Repetibilidad y reproducibilidad en la estimación de la incertidumbre	35
2.2.3.1. Repetibilidad y reproducibilidad	35
2.2.3.2. Cálculo de las estadísticas	36
2.2.4. Métodos de prueba estándar de mecánica de suelos.....	38
2.2.4.1. Análisis granulométrico por tamizado	39
2.2.4.2. Contenido de Humedad de Suelos.....	40
2.2.4.3. Limite Liquido, Limite Plástico e índice de plasticidad de los suelos	41
2.2.4.4. Gravedad específica de sólidos.....	43
2.2.4.5. Compactación de suelos con esfuerzo estándar	44

2.2.4.6. Compactación de suelo con esfuerzo modificado	45
2.2.5. Aseguramiento de la calidad.....	46
2.2.5.1. Calidad.	46
2.2.5.2. Control de calidad.....	46
2.2.5.3. Aseguramiento de la Calidad.....	46
2.2.5.4. Acreditación ISO 17025.....	47
2.2.6. Definiciones de términos básicos	47
CAPITULO III.....	50
MATERIALES Y MÉTODOS	50
3.1. Ubicación geográfica.....	50
3.1.1. Ubicación geográfica de la Investigación.....	50
3.2. Metodología de la Investigación.....	50
3.1.2. Tipo de estudio y diseño de investigación	50
3.1.3. Población de estudio.....	51
3.1.4. Muestra.....	51
3.1.5. Técnicas e instrumentos de recopilación de información.....	51
3.1.5.1. Técnicas de recopilación de información.....	51
3.1.5.2. Instrumentos de recopilación de información	52
3.1.6. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información	52
3.1.6.1. Procesamiento de la información	52
3.1.6.2. Análisis e interpretación de la información	53
3.1.7. Equipos y materiales.....	54
3.1.7.1. Suelo	54
3.1.7.2. Métodos estandarizados.....	54
3.1.7.3. Equipos de Laboratorio.....	54
3.1.7.4. Materiales de Gabinete.....	55

3.3. Procedimientos de la investigación	56
3.1.8. Métodos de prueba estándar	56
3.1.9. Descripción de los métodos de prueba estándar	57
3.1.10. Incertidumbre estándar para la medición de masa	59
3.1.11. Incertidumbre de medida del análisis granulométrico por tamizado	61
3.1.11.1. Identificación del mensurando y su principio de medición	61
3.1.11.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	61
3.1.11.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada	62
3.1.12. Incertidumbre de medida del contenido de humedad de suelos	62
3.1.12.1. Identificación del mensurando y su principio de medición	62
3.1.12.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	63
3.1.12.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada	64
3.1.13. Incertidumbre de medida del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	65
3.1.13.1. Identificación del mensurando y su principio de medición	65
3.1.13.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	66
3.1.13.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada	66
3.1.14. Incertidumbre de medida de la gravedad específica de sólidos	69
3.1.14.1. Identificación del mensurando y su principio de medición	69
3.1.14.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	70
3.1.14.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada	71
3.1.15. Incertidumbre de medida de la máxima densidad seca y óptimo contenido de humedad para los métodos de compactación	73
3.1.15.1. Identificación del mensurando y principio de medición	73
3.1.15.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre	74
3.1.15.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada	75

3.4. Análisis de datos y presentación de resultados	77
3.4.1. Ensayos de análisis granulométrico por tamizado	77
3.4.2. Ensayo de contenido de humedad	82
3.4.3. Ensayo de plasticidad (Límites de Atterberg)	83
3.4.4. Ensayo de gravedad específica de sólidos	84
3.4.5. Ensayos de compactación aplicando energía estándar.....	86
3.4.6. Ensayos de compactación aplicando energía modificada	87
3.4.7. Resultados de la estimación de la incertidumbre de repetibilidad de los métodos de prueba	89
3.5. Resultados de la estimación de la incertidumbre de medida	92
3.5.1. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de análisis granulométrico por tamizado	92
3.5.2. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de contenido de humedad	96
3.5.3. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad	97
3.5.4. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de gravedad específica de sólidos.....	101
3.5.5. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de compactación con esfuerzo estándar	103
3.5.5.1. Estimación de la incertidumbre de medida del Peso unitario seco máximo ($\gamma_{d,max}$).....	103
3.5.5.2. Estimación de la incertidumbre de medida del Óptimo contenido de humedad (W_{opt})	104
3.5.6. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de compactación con esfuerzo modificado.....	106
3.5.6.1. Estimación de la incertidumbre de medida Peso unitario seco máximo, $\gamma_{d,max}$ con esfuerzo modificado	106

3.5.6.2. Estimación de la incertidumbre de medida del Óptimo contenido de humedad (W_{opt}), con esfuerzo modificado	107
CAPITULO IV	110
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	110
4.1. Método de análisis granulométrico por tamizado	110
4.2. Método de contenido de humedad en suelos	110
4.3. Método de limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad	111
4.4. Método de gravedad específica de sólidos	111
4.5. Método de compactación con esfuerzo estándar y esfuerzo modificado.....	112
CAPITULO V.....	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
5.1. Conclusiones.....	115
5.2. Recomendaciones	116
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
ANEXOS.....	122
ANEXO.1. PANEL FOTOGRÁFICO.....	122
ANEXO.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LOS METODOS DE PRUEBA.....	126
ANEXO 2.A. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de análisis granulométrico por tamizado: ASTM D6913/D6913M-17	126
ANEXO 2.B. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de contenido de humedad: ASTM D2216-19.....	131
ANEXO 2.C. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de suelos cohesivos. ASTM D4318-17	132

ANEXO 2.D. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de gravedad específica de sólidos: ASTM D854-14 ..	135
ANEXO 2.E. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de Proctor estándar: ASTM D698-12(21)	136
ANEXO 2.F. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de Proctor modificado: ASTM D1557-12(21)	141
ANEXO.3. CALCULOS DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA	146
ANEXO.4. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS	171

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de precisión para juzgar la aceptabilidad de los resultados en los ensayos de Laboratorio (Límite de Atterberg).....	42
Tabla 2. Criterios de precisión para la aceptación de los resultados de los laboratorios de pruebas por triplicado (gravedad específica).....	44
Tabla 3. Criterios de precisión para aceptar los resultados de las pruebas de los laboratorios (compactación de esfuerzo estándar).....	45
Tabla 4. Estimaciones de precisión para el método de prueba de Compactación de esfuerzo modificado.	46
Tabla 5. Tipificación de la investigación	50
Tabla 6. Datos de las balanzas utilizadas en los ensayos	55
Tabla 7. Estándares aplicados en los procedimientos de ensayo para determinar la incertidumbre de medida	57
Tabla 8. Descripción de los métodos de prueba y mensurandos a evaluar	58
Tabla 9. Resumen de resultados de análisis granulométrico por tamizado	78
Tabla 10. Resultados para el método de prueba de contenido de humedad ...	82
Tabla 11. Resultados para el método de prueba de Limite Líquido (LL), Límite plástico (LP) e Índice Plástico (IP).....	83
Tabla 12. Resultados para el método de prueba de Gravedad Específica de Sólidos.....	85
Tabla 13. Resultados para el Óptimo contenido de humedad y el Peso Unitario seco máximo en el método de prueba de Proctor Estándar.....	86
Tabla 14. Resultados del Optimo Contenido de Humedad en la prueba de Proctor modificado.....	87
Tabla 15. Resumen de desviación estándar de repetibilidad, reproducibilidad e incertidumbre de repetibilidad para cada tamiz del método de análisis granulométrico por tamizado	89

Tabla 16. Resultados de desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad, precisión de repetibilidad y reproducibilidad para cada método de prueba estándar.....	90
Tabla 17. Resumen de resultados de incertidumbre estándar combinada $u(c)$ e incertidumbre expandida por cada tamiz.....	92
Tabla 18. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de contenido de humedad.....	96
Tabla 19. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de límite líquido.....	97
Tabla 20. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de límite plástico.....	99
Tabla 21. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de Índice de plasticidad.....	100
Tabla 22. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de gravedad específica de sólidos	101
Tabla 23. Presupuesto de incertidumbre de medida del peso unitario seco máximo, γ_d, \max	103
Tabla 24. Presupuesto de incertidumbre de medida del óptimo contenido de humedad, W_{opt}	105
Tabla 25. Presupuesto de incertidumbre de medida del peso unitario seco máximo, γ_d, \max , con esfuerzo modificado	106
Tabla 26. Presupuesto de incertidumbre de medida del óptimo contenido de humedad, W_{opt} , con esfuerzo modificado	108
Tabla 27. Resumen general de la incertidumbre de media de los métodos de prueba estándar y precisión de ensayo.....	113

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Esquema de los métodos existentes para estimar la incertidumbre de medida.....	27
Gráfico 2. Diagrama detallado de causa - efecto para el método de análisis granulométrico por tamizado.....	61
Gráfico 3. Diagrama causa – efecto. Ensayo de contenido de humedad de suelos.....	63
Gráfico 4. Diagrama causa – efecto para identificar las fuentes de incertidumbre del ensayo de plasticidad	66
Gráfico 5. Diagrama detallado de causa y efecto para la determinación de la gravedad específica de sólidos.	71
Gráfico 6. Diagrama causa – efecto para la determinación de las fuentes de incertidumbre de la Densidad Húmeda.	75
Gráfico 7. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices de 1 1/2 in., 1 in., 3/4 in. y 1/2 in,	80
Gráfico 8. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices de 3/8 in., 1/4 in. y No. 4.	80
Gráfico 9. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices No. 10, No. 20, No. 40 y No. 60.....	81
Gráfico 10. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices No. 100 y No. 200.....	81
Gráfico 11. Prueba de normalidad de datos de contenido de humedad.....	82
Gráfico 12. Prueba de normalidad de datos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.....	84
Gráfico 13. Prueba de normalidad de datos de Gravedad específica de Sólidos – Método B.....	85
Gráfico 14. Prueba de normalidad de datos del Optimo contenido de humedad y Peso unitario seco máximo – Método A	87

Gráfico 15. Prueba de normalidad de datos del Optimo contenido de humedad y Peso unitarios seco máximo para el método de prueba de Proctor modificado.....	88
Gráfico 16. Variación de la incertidumbre de repetibilidad para el método de prueba estándar de análisis granulométrico por tamizado	90
Gráfico 17. Incertidumbre de repetibilidad para cada método de prueba estándar evaluado.....	91
Gráfico 18. Contribución de incertidumbre de la masa total en la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa.....	93
Gráfico 19. Contribución de incertidumbre de la masa retenida a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa.....	93
Gráfico 20. Contribución de incertidumbre del tamiz a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa.....	94
Gráfico 21. Contribución de incertidumbre de repetibilidad a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa.....	95
Gráfico 22. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del contenido de humedad.....	96
Gráfico 23. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del límite líquido.....	98
Gráfico 24. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del límite plástico.....	99
Gráfico 25. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del índice de plasticidad.....	100
Gráfico 26. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada de la gravedad específica de sólidos.....	102
Gráfico 27. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.....	104
Gráfico 28. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.....	105

Gráfico 29. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.....	107
Gráfico 30. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.....	108
Gráfico 31. Comparación de la incertidumbre de medida, U con la precisión de cada método de prueba estándar.....	114

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo principal determinar la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo VICAF SAC ubicado en la ciudad de Cajamarca, para alcanzar este objetivo, se llevaron a cabo ensayos de repetibilidad y reproducibilidad en seis métodos de prueba estándar específicos: D693/D6913M, D2216, D4318, D854, D698 y D1557; estos ensayos permitieron determinar la incertidumbre de repetibilidad inherente a cada uno de estos métodos; finalmente, se realizó una evaluación de incertidumbre de cada una de las variables que intervienen en el proceso de medición en cada uno de estos métodos; en todo el proceso de investigación, se emplearon equipos debidamente certificados para la recopilación de datos y se siguieron rigurosamente los procedimientos establecidos en la guía GUM y las normas estandarizadas correspondientes y los resultados obtenidos fueron comparados con los valores de precisión establecidos para cada uno de los métodos de prueba; del análisis y la discusión de los resultados se obtuvieron que las variaciones de incertidumbre están por debajo del 5% en relación con los resultados informados. Este hallazgo conduce a la conclusión de que la incertidumbre obtenida en los métodos de prueba se encuentra dentro del rango de precisión establecido por cada estándar, lo que garantiza la confiabilidad, competencia y aseguramiento de la calidad de los resultados generados en el laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Control de calidad; aseguramiento de calidad, Incertidumbre de medida; Error de medida, Repetibilidad, Reproducibilidad, Competencia del laboratorio, Estándares ASTM.

ABSTRACT

The main objective of this research is to determine the measurement uncertainty in standard test methods of soil mechanics, for the quality assurance of the results in the laboratory of the company Grupo VICAF SAC located in the city of Cajamarca, to achieve this objective, repeatability and reproducibility tests were carried out in six specific standard test methods: D693/D6913M, D2216, D4318, D854, D698 and D1557; These tests allowed to determine the uncertainty of repeatability inherent in each of these methods; Finally, an uncertainty assessment of each of the variables involved in the measurement process was carried out in each of these methods; throughout the research process, duly certified equipment was used for data collection and the procedures established in the GUM guide and the corresponding standardized standards were rigorously followed and the results obtained were compared with the precision values established for each of the test methods; From the analysis and discussion of the results they obtained that the variations of uncertainty are below 5% in relation to the reported results. This finding leads to the conclusion that the uncertainty obtained in the test methods is within the accuracy range established by each standard, which guarantees the reliability, competence and quality assurance of the results generated in the laboratory.

KEY WORDS: Quality control; quality assurance, Measurement uncertainty; Measurement error, Repeatability, Reproducibility, Laboratory competence, ASTM standards.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. Planteamiento del problema

Las exigencias de calidad actualmente son la base de la competitividad y sólo pueden ser afrontadas con éxito si se tiene una cultura metrológica y los elementos para ejercerla adecuadamente (IMT, 2015).

Uno de los aspectos clave para garantizar la calidad en los procedimientos de evaluación normalizados es la verificación de una medición precisa durante la ejecución de los ensayos. Este requisito conduce al surgimiento de un concepto de mayor complejidad denominado "incertidumbre". Estimar esta incertidumbre representa uno de los desafíos más significativos en la mayoría de los laboratorios, ya que abarca todos los aspectos del proceso de medición, desde la idoneidad de los instrumentos utilizados hasta el nivel de fiabilidad necesario en la evaluación. (IMT, 2015).

Los laboratorios que introducen mediciones para el control de calidad o buscan obtener la acreditación de métodos de ensayo se enfrentan al desafío de estimar la incertidumbre de medida de los resultados. Esto se debe a que, al expresar los resultados, es necesario proporcionar una indicación cuantitativa de su calidad, permitiendo a los usuarios evaluar su idoneidad (Ávila W. et al., 2018). La evaluación y estimación de la incertidumbre de medida tienen un papel fundamental en la interpretación de diversos resultados de medida en campos como la ciencia, la ingeniería, el comercio, la industria y la regulación (Weitzel, J. 2014).

En este contexto, el Laboratorio de mecánica de suelos de la empresa Grupo Vicaf SAC, no cuenta con un procedimiento y metodología que le permita implementar un sistema de aseguramiento y control de calidad en los procesos de medición, con la que pueda garantizar la confiabilidad de sus mediciones, en tal efecto surge la necesidad de implementar una metodología para asegurar el cumplimiento de calidad de los resultados a través de la estimación de la incertidumbre de medida.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es calcular la incertidumbre de medida de seis métodos de prueba estándar que han sido desarrollados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf en la ciudad de Cajamarca, para un control de la calidad de los resultados. Para lograrlo, se seguirá una metodología cuidadosamente diseñada que nos permitirá obtener resultados que serán objeto de evaluación y discusión en el contexto de los objetivos de investigación.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados que se realizan en el laboratorio de la empresa Grupo VICAF SAC de Cajamarca?

1.3. Hipótesis de investigación

La incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados que se realizan en el laboratorio de la empresa Grupo VICAF SAC de Cajamarca está por debajo de la precisión del método.

1.4. Justificación de la investigación

Este estudio cuenta con una justificación teórica porque permite fortalecer la base teórica de la metodología aplicada y su aplicación en laboratorios de ensayos de mecánica de suelos, contribuyendo así a la mejora de la calidad de los resultados.

Así mismo tiene una justificación práctica en la medida que ayuda a proporcionar herramientas y directrices para el aseguramiento de la calidad en los laboratorios de ensayos de mecánica de suelos, mejorando así la toma de decisiones y la competitividad de los laboratorios.

De igual manera presenta una justificación metodológica porque busca contribuir y dar una metodología práctica para estimar la incertidumbre en métodos

estandarizados de mecánica de suelos para asegurar la calidad en los resultados de laboratorios de ensayos y de esta manera servirá como referencia para otros laboratorios similares que buscan mejorar sus procesos de medición y asegurar sus resultados con calidad.

También cuenta con una justificación investigativa pues los resultados de esta investigación pueden servir como punto de partida para futuros estudios y mejoras en la metrología y la calidad de resultados analíticos. Del mismo modo quizá se puedan estudiar otras variables que acá no se han considerado y con otros métodos.

Además, presenta una justificación personal porque proporciona una base sólida de conocimiento y experiencia en metrología y aseguramiento de la calidad en procesos analíticos que será altamente beneficiosa para mi carrera profesional. Además, permitirá contribuir de manera significativa a la mejora de los procesos y la calidad en mi entorno profesional y académico.

1.5. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Determinar la incertidumbre de medida de los métodos de prueba estándar del laboratorio de Mecánica de Suelos para el aseguramiento de la calidad de los resultados en la empresa Grupo VICAF SAC.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar la incertidumbre de repetibilidad para los métodos de prueba estándar del laboratorio de Mecánica de suelos de la empresa Grupo VICAF SAC.
- Identificar las fuentes de incertidumbre de cada método de prueba estándar del laboratorio de Mecánica de suelos de la empresa Grupo VICAF SAC.
- Determinar las fuentes con mayor contribución en la incertidumbre de medida para los métodos de prueba estándar del laboratorio de Mecánica de suelos de la empresa Grupo VICAF SAC.

- Estimar la incertidumbre expandida para los métodos de prueba estándar del laboratorio de Mecánica de suelos de la empresa Grupo VICAF SAC, con un nivel de confianza del 95,45 %.

1.6. Alcance y delimitación de la investigación

1.1.3. Alcance

Los resultados obtenidos en esta investigación, solo se centra en la estimación de la incertidumbre de medida en un conjunto específico de métodos de prueba estándar utilizados en mecánica de suelos. Estos métodos de prueba estándar son análisis granulométrico por tamizado, contenido de humedad de suelos, límites líquidos, límites plásticos e índice de plasticidad, gravedad específica de sólidos y los métodos de compactación de Proctor estándar y Proctor modificado. Otros métodos o áreas de ensayo quedan fuera del alcance

El estudio de investigación también tiene un alcance referencial para otros laboratorios y entidades que buscan implementar un sistema de gestión bajo la Norma ISO/IEC 17025:2017 relacionado a la evaluación y estimación de la incertidumbre de medida en métodos de ensayo y aseguramiento de la calidad.

1.1.4. Delimitación de la investigación

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio de la empresa Grupo VICAF SAC, que se encuentra ubicado en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca. Las metodologías, procedimientos y enfoques desarrollados se aplicaron y adaptaron específicamente a este laboratorio. La generalización de los resultados a otros laboratorios o regiones podría requerir adaptaciones y consideraciones adicionales.

En la investigación se determinó la estimación de la incertidumbre en métodos de prueba estándar para el aseguramiento de la calidad de los resultados para lo cual se realizó los siguientes ensayos.

- Ensayos de análisis granulométrico por tamizado en suelos, ASTM D6913/D6913M – 17

- Ensayos de contenido de humedad en suelos, ASTM D2216 – 19
- Ensayos de límites de consistencia de suelos, ASTM D4318 – 17
- Ensayos de gravedad específica de sólidos, ASTM D854 – 14
- Ensayos de compactación aplicando energía estándar (Proctor estándar), ASTM D698 – 21
- Ensayos de compactación aplicando energía modificada (Proctor modificado), ASTM D1557 – 21

Cambios futuros en las regulaciones o normativas de acreditación posteriores a la finalización del proyecto pueden influir en la aplicabilidad de los procedimientos de los métodos desarrollados.

Para la estimación de la incertidumbre de medida se determinó utilizando la metodología descrita en la guía GUM que es la “Guía para la expresión de la incertidumbre de medida” (JCGM 100:2008) en su versión en español.

1.7. Limitaciones

La investigación no aborda todos los posibles aspectos de la estimación de incertidumbre. Solo se abordan aspectos físicos y condiciones del método de prueba.

La investigación no se ha realizado en condiciones ambientales controladas de humedad y temperatura.

Debido a que el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC, es nuevo en el mercado, no se dispone de registros de datos históricos para poder evaluar con mayor precisión la incertidumbre de los métodos.

En la ciudad de Cajamarca existen pocas investigaciones de aseguramiento de la calidad de los resultados mediante la estimación de la incertidumbre de medida para métodos de prueba estándar, que aseguren la competencia de los laboratorios de ensayos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos de la investigación

2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

Marín (2017), en su tesis titulada “*Estimación de la incertidumbre en el proceso de calibración de una micropipeta mediante la guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM)*”, México, concluyó que: El volumen obtenido a 20 °C es de 0,0106 cm³ con una incertidumbre expandida de 0,0002 cm³ con un nivel de confianza de 95,45%; este valor está dentro de los parámetros reportados por la empresa, lo cual indica que se siguieron correctamente la normativa como la propagación de la incertidumbre. También concluye que, para una correcta estimación de la incertidumbre el laboratorio debe cumplir con ciertas condiciones, tales como: las instalaciones adecuadas, personal acreditado calificado para realizar las actividades de medición, así como los equipos de medición deben contar con certificados de calibración y patrones trazables que puedan demostrarse ante un sistema de calidad, el incumplimiento de estas condiciones afecta gravemente los resultados obtenidos.

Núñez (2017), en su tesis titulada “*Validación de Métodos de ensayo para la determinación de compuestos fenólicos y turbidez en agua para el laboratorio de la refinería Esmeraldas*”, Quito, concluyo que: Los valores de precisión obtenidos para el método de fenoles en repetibilidad (%CVr) es de 4,69% y en reproducibilidad (%CVR) es de 4,71%. Para el método de turbidez los valores en repetibilidad (%CVr) es de 5,11% y en reproducibilidad (%CVR) es de 5,28%. Estos resultados constituyen los valores más elevados registrados en cada método, y se sitúan dentro del intervalo de los valores atribuidos al parámetro de precisión de cada método, según lo establecido en la norma ASTM D1783B. Al evaluar la incertidumbre inherente a los métodos de ensayo, se tomaron en consideración diversas contribuciones, que abarcan desde los equipos y el

material de vidrio hasta los reactivos utilizados. No obstante, la principal fuente de incertidumbre proviene de la reproducibilidad del método. Esta última, debido a la variabilidad que se observa en los resultados obtenidos, se erige como un factor crucial. Por consiguiente, la incertidumbre expandida con un nivel de confianza del 95,45% se establece en un 20% para el método de fenoles, y en un 15% para el método de turbidez.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

Valeriano (2015), en su tesis titulada "*Incertidumbre en Ensayos Estándar de Mecánica de Suelos para la Confiabilidad en los Laboratorios Geotécnicos*", Lima, concluyó que: La incertidumbre expandida para el contenido de humedad es de 0,05% sin considerar los factores de influencia y de 0,74% considerando los factores de influencia. El porcentaje de contribución de cada factor evaluado es: factor de tratamiento 51%, factor de precisión 30%, y factor de homogenización 19%. Además, concluye que, los factores de influencia incrementan la incertidumbre del método de ensayo.

Roca (2017), en su tesis titulada "*Estimación de la incertidumbre de los equipos del laboratorio de materiales UCSM para el servicio de pruebas de calidad externa*", Arequipa; concluyó que: Las incertidumbres para los diferentes equipos del laboratorio de materiales de UCSM son: Equipo UCSM de tracción o Universal (WDW-300E) para el esfuerzo de fluencia $U = 4$ kN y para el esfuerzo máximo $U = 2,6$ kN. Equipo de ensayo de impacto Charpy (JB-W300a) la incertidumbre expandida $U = 6,48$ J. Equipo de dureza Rockwell (HRS-150 Digital Rockwell Hardness Tester) la incertidumbre expandida $U = 4,92$ HRB. Con estos resultados se concluye que todos los equipos pueden certificar calidad con los valores obtenidos. Además, sugiere implementar acciones como establecer cronograma de calibración anual de los equipos en base a ISO 17025, implementar manual de operación de los equipos analizados y desarrollar una base de datos de los servicios realizados internos y externos.

García (2018), en su tesis titulada "*Estimación y Validación de la incertidumbre en el método de ensayo a compresión del concreto en estructuras de $f'c$ 280 kg/cm² obtenidas a edades de 3 y 28 días*", Lima, concluyó que: El proceso de curado del concreto constituye una fuente de incertidumbre que afecta en un 5% la resistencia a la compresión del concreto tanto a los 3 días como a los 28 días. No obstante, esta fuente de incertidumbre no se ve influenciada por el método de ensayo en sí. En consecuencia, se determinó que las fuentes de incertidumbre no tienen un impacto significativo en la variabilidad de los resultados del ensayo de compresión para el concreto de diseño con una resistencia nominal de 280 kg/cm² a edades de 3 y 28 días. Los resultados obtenidos para la incertidumbre expandida, con un nivel de confianza del 95.45%, son del 3% y 5% para edades de 3 y 28 días, respectivamente. Esto lleva a la conclusión de que el nivel de incertidumbre expandida no ejerce una influencia significativa en la variabilidad de los resultados del ensayo de compresión para el concreto de diseño con una resistencia nominal de 280 kg/cm² a edades de 3 y 28 días.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Incertidumbre de medida

2.2.1.1. Definición de Incertidumbre

De acuerdo con la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición (GUM), la incertidumbre es un "parámetro asociado al resultado de una medición que describe la variabilidad de los valores que podrían considerarse de manera razonable como atribuibles a la magnitud medida". Este factor puede adoptar diversas formas, que puede ser una desviación estándar o la mitad del ancho de un intervalo con un nivel de confianza específico.

También se señala que la incertidumbre de la medición en términos generales se compone de varios factores. Algunos de estos factores pueden ser estimados mediante el análisis de la distribución estadística obtenidos a partir de múltiples mediciones, y pueden describirse mediante sus desviaciones estándar experimentales. En cuanto a los demás factores, que también pueden ser

caracterizados por desviaciones estándar, se calculan asumiendo distribuciones de probabilidad basadas en la experiencia previa o en otra información disponible.

Y por otro lado el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM, 2012), define la incertidumbre como: “Parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza”.

2.2.1.2. Definición de mensurando

Según el VIM (2012), es la magnitud que se desea medir. El mensurando es el atributo sujeto a medición que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

2.2.1.3. Error e incertidumbre

Según el VIM (2012), se establece que el error de medida corresponde a la diferencia entre el valor medido de una magnitud y un valor de referencia, ya sea un valor convencional o el valor verdadero. En contraste, la incertidumbre de medida se define como un parámetro no negativo que describe la variabilidad de los valores atribuidos a una cantidad medida, basándose en la información utilizada. Es importante señalar que, aunque el error es, en teoría, desconocido, la incertidumbre sí puede ser cuantificada y evaluada. Es relevante no confundir el error de medida con errores de carácter humano o equivocaciones.

2.2.1.4. Metodologías y aplicaciones para estimar la incertidumbre

Según J. Cárdenas, A. Ramírez, y E. Delgado (2018), presentan un esquema general de los métodos para la estimación de la incertidumbre, y el uso de estos en la cuantificación de la incertidumbre.

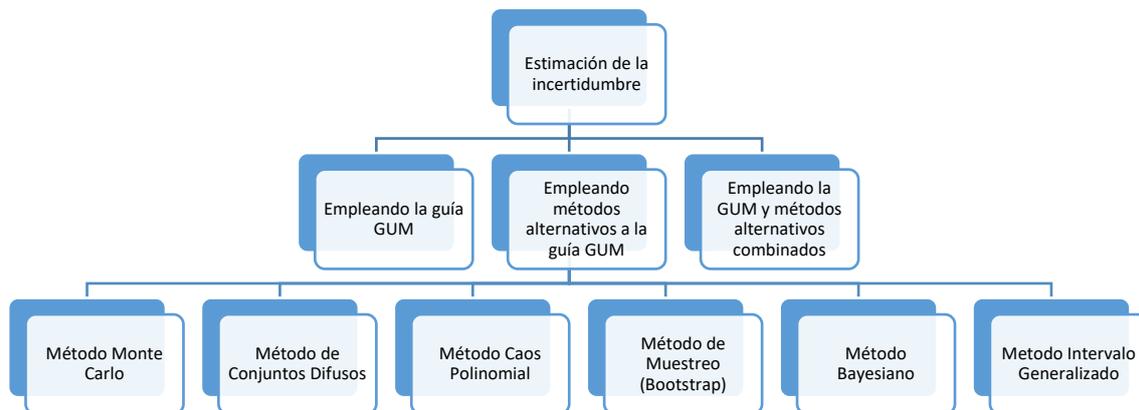


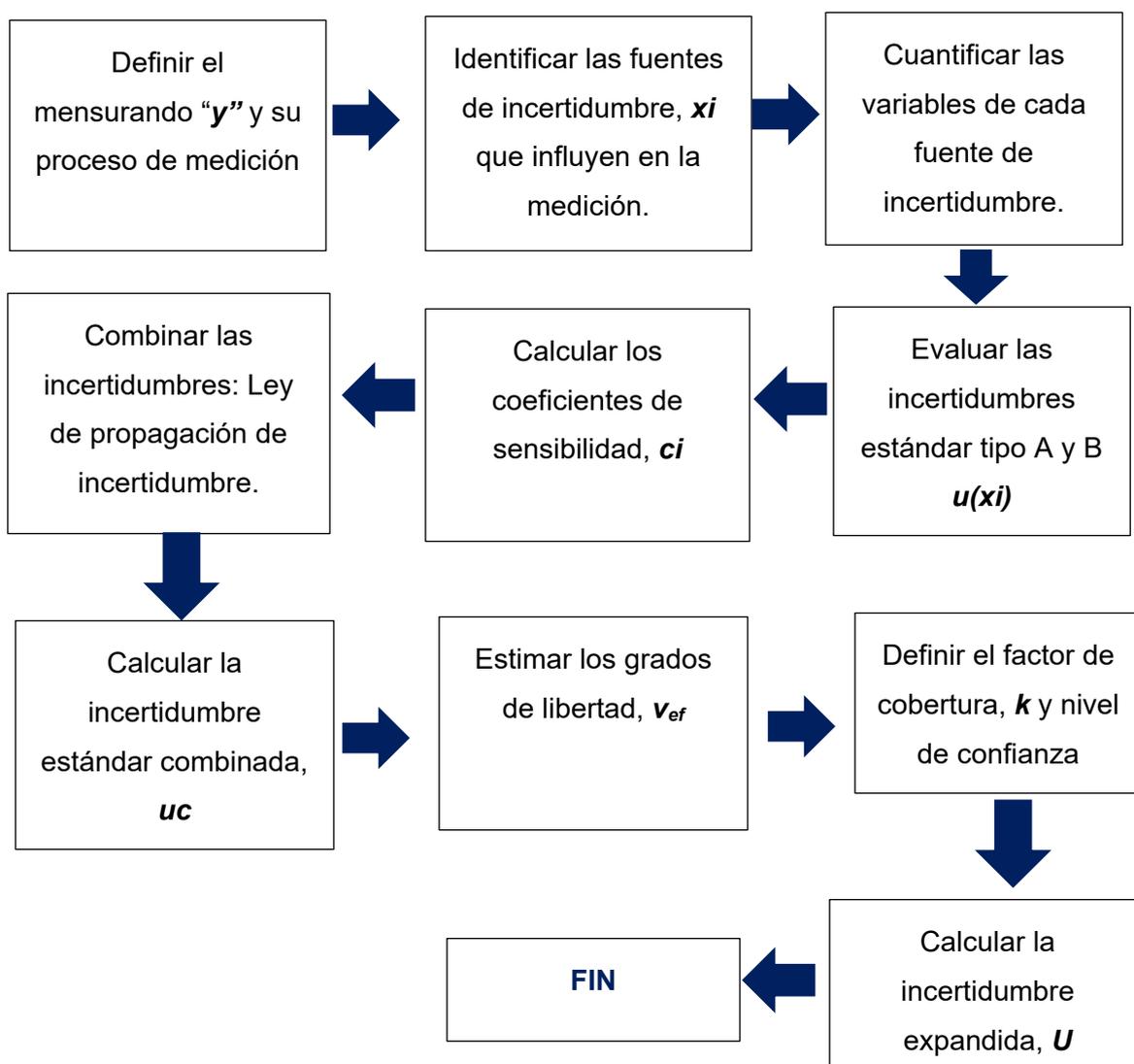
Gráfico 1. Esquema de los métodos existentes para estimar la incertidumbre de medida

De acuerdo con J. Cárdenas, A. Ramírez y E. Delgado (2018), mencionan que se ha observado una amplia variedad de enfoques para estimar la incertidumbre en mediciones. Entre estos métodos se incluyen la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de la Medición (GUM), el uso de conjuntos difusos, técnicas basadas en caos polinomial, el remuestreo (Bootstrap), la inferencia Bayesiana, el intervalo generalizado y el método Monte Carlo (MCM). Además, los autores destacan que la combinación de la GUM con otros métodos de estimación se ha aplicado principalmente en situaciones en las cuales los modelos matemáticos son extremadamente complejos y la aplicación de la GUM en su forma estándar resulta desafiante debido a la dificultad de identificar exhaustivamente todas las fuentes de incertidumbre y sus respectivas distribuciones estadísticas asociadas. Esto, a su vez, conduce a la necesidad de simplificar el modelo de propagación de la incertidumbre.

2.2.2. Proceso de estimación de la incertidumbre de medida

La estimación de la incertidumbre de medida, siguiendo la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (GUM), es un proceso sistemático que consta de varios pasos. A continuación, se muestra los pasos clave:

Diagrama de flujo para la estimación de la incertidumbre de medición



2.2.2.1. Especificar el mensurando y el sistema de medición

Especificar el mensurando significa definir claramente la magnitud que se va a medir y proporcionar todos los detalles necesarios para que otros puedan comprender y replicar la medición de manera precisa y consistente. El sistema de medición se refiere a desarrollar un modelo matemático que describa la

relación entre las cantidades medidas y las fuentes de incertidumbre. Esto puede incluir ecuaciones y expresiones que representen el proceso de medición.

2.2.2.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

En este paso se debe enumerar todas las fuentes de error que pueden afectar la medida. Estas pueden incluir errores sistemáticos, errores aleatorios, y otros factores que contribuyan a la incertidumbre.

La Guía CG 4 EURACHEM / CITAC (2012) sugiere la aplicación del método de Causa-Efecto o el diagrama de Ishikawa para enumerar las fuentes de incertidumbre. Este enfoque resulta altamente práctico ya que visualiza de manera efectiva cómo estas fuentes están interconectadas y cómo impactan en la incertidumbre del resultado. Además, este método es útil para prevenir la duplicación en la identificación de las fuentes de incertidumbre. El procedimiento empleado es el siguiente:

- Inicialmente, elaborar la ecuación completa para calcular la magnitud que se desea medir. Los componentes de esta ecuación se convierten en las ramas principales del diagrama. En la mayoría de los casos, o cuando sea pertinente, se debe incluir una rama principal que refleje una corrección nominal debido al sesgo o la repetibilidad del método.
- Analizar cada fase del método y agregar los factores necesarios al diagrama, partiendo de los efectos principales hacia los elementos periféricos.
- Para cada rama, incorporar factores contribuyentes hasta que sus efectos sobre el resultado se vuelvan insignificantes.
- Identificar y solucionar cualquier duplicación presente, luego repetir el proceso para aclarar las contribuciones y agruparlas según corresponda. En esta etapa, es recomendable consolidar los términos relacionados con la precisión en una rama dependiente.

Después de llevar a cabo el análisis de causa y efecto, podría resultar apropiado regresar a la ecuación inicial e incorporar términos adicionales.

Según la GUM (2008), indica que existen numerosas fuentes posibles de incertidumbre en una medición, entre ellas se tiene:

- a) Definición incompleta del mensurando o magnitud a medir;
- b) Realización imperfecta de la definición del mensurando;
- c) Muestra no representativa del mensurando,
- d) Falta de información completa acerca de cómo las condiciones del entorno influyen en la medición, o una medición deficiente de dichas condiciones ambientales;
- e) Lectura sesgada de instrumentos analógicos, por parte del técnico;
- f) Resolución finita del instrumento de medida,
- g) Valores inexactos de constantes y otros parámetros tomados de fuentes externas,
- h) Variaciones en las observaciones repetidas del mensurando, en condiciones aparentemente idénticas.
- i) Calibración de equipos e instrumentos de medición.
- j) La incertidumbre del patrón empleado en la calibración de los equipos e instrumentos de medición.
- k) La repetibilidad o reproducibilidad de las mediciones.

2.2.2.3. Cuantificación de las fuentes de incertidumbre

La cuantificación de las fuentes de incertidumbre es el proceso de determinar la magnitud o el valor de cada fuente de incertidumbre identificada en el proceso de medición. Esto implica asignar un valor numérico a cada fuente de incertidumbre de acuerdo con las mejores prácticas y métodos disponibles. Esto puede requerir la realización de experimentos o el análisis de datos históricos.

Según la GUM (2008), indica que para la evaluación de las componentes de la incertidumbre de medida hay dos formas de evaluación; evaluación de la incertidumbre tipo A y evaluación de la incertidumbre tipo B.

2.2.2.4. Evaluación de la incertidumbre estándar tipo A

Conforme a la Guía GUM (2008), el método de evaluación tipo A de la incertidumbre implica realizar un análisis estadístico de una serie de observaciones. Este enfoque es aplicable cuando se han realizado múltiples observaciones independientes de la magnitud que se desea medir, bajo las mismas condiciones o en condiciones diferentes.

La evaluación tipo A de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ se refiere a la desviación estándar experimental resultante de una serie de mediciones repetidas. En la evaluación tipo A, se pueden considerar dos situaciones:

- a. Si el resultado de la medición se basa en una única observación, entonces la incertidumbre se expresa como la desviación estándar $s(X_i)$ obtenida a partir de un estudio del método de medición realizado en condiciones estandarizadas, una prueba de repetibilidad u otro procedimiento adecuado.

$$u(x_i) = s(X_i) \quad (01)$$

En este caso, los grados de libertad de $s(X_i)$ se pueden estimar como infinitos.

- b. Si el valor de la medición se calcula como el promedio de múltiples observaciones y se dispone de la desviación estándar de la media, $s(\bar{X}_i)$, derivada de un estudio de repetibilidad realizado en condiciones estandarizadas.

$$u_{(x_i)} = \frac{s(\bar{X}_i)}{\sqrt{n}} \quad (02)$$

Donde:

$u(x_i)$ = incertidumbre estándar tipo A

$s(\bar{X}_i)$ = desviación estándar experimental de la media.

n = número de repeticiones.

2.2.2.5. Evaluación de la incertidumbre estándar tipo B.

De acuerdo con la Guía GUM (2008), la evaluación tipo B se emplea en los métodos en los cuales se estima la incertidumbre de forma diferente al análisis estadístico de series de observaciones, se evalúan mediante la asunción de alguna función de distribución, como la distribución normal, rectangular, triangular o Gaussiana, basándose en la experiencia o en otros criterios científicos y juicios. Las fuentes de incertidumbre de tipo B se establecen mediante la utilización de datos externos. Estos datos pueden comprender certificados de calibración, manuales de los instrumentos de medición, estándares, referencias bibliográficas o valores anteriores de mediciones

Para este tipo de evaluación hay que tener en cuenta los siguientes casos:

Caso 1: La incertidumbre se refiere a la resolución de un instrumento de medida.

$$u_{(xi)} = \frac{\text{Resolución}}{2 * \sqrt{3}} \quad (03)$$

Caso 2: Cuando la incertidumbre se considera que está expandida con un nivel de confianza k, es necesario dividirla entre el coeficiente, k.

$$u_{(xi)} = \frac{U_{(xi)}}{k} = s \quad (04)$$

Donde:

U(xi) = Incertidumbre expresada en la información

k = Coeficiente de expansión Indicado

Caso 3: Si en el escenario en el que se establece que la variable se halla dentro de un rango de valores máximos (dentro de $\pm a$), se procede asumiendo una distribución rectangular. En esta distribución, se considera que el valor verdadero de la magnitud puede ser igualmente probable en cualquier punto dentro del intervalo. En consecuencia, la incertidumbre se calcula dividiendo la incertidumbre indicada entre la raíz cuadrada de tres.

$$u_{(xi)} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (05)$$

Caso 4: Si en el caso de disponer de información que indique que los valores de la magnitud en cuestión tienden a agruparse en torno al valor medio "a", siendo menos probables los valores cercanos a los límites del intervalo especificado, en ese escenario, optar por una distribución triangular podría ser una elección más apropiada. El cálculo de esta incertidumbre se realiza de la siguiente manera:

$$u_{(xi)} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (06)$$

2.2.2.6. Incertidumbre estándar combinada, u_c

Una vez que se ha calculado la incertidumbre estándar de cada componente individual de incertidumbre, el siguiente paso es determinar la incertidumbre combinada. Según la Guía GUM (2008), la incertidumbre estándar combinada, denominada u_c , se define como la incertidumbre que se obtiene a partir de las incertidumbres estándar individuales relacionadas con las magnitudes de entrada de un modelo de medición. Esta incertidumbre combinada se estima calculando la raíz cuadrada positiva de la suma de las incertidumbres estándar de cada uno de los componentes, elevadas al cuadrado, empleando la ley de propagación de la incertidumbre.

$$u_{c(y)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} * u_{(xi)} \right)^2} \quad (07)$$

Donde:

$u_c(y)$ = Incertidumbre estándar combinada.

dy/dx_i = Coeficientes de sensibilidad.

$u(x_i)$ = Incertidumbres estándar individuales de las variables.

2.2.2.7. Incertidumbre Expandida, U

La Guía GUM (2008) establece que la incertidumbre expandida U se calcula como el resultado de multiplicar la incertidumbre estándar combinada u_c , por un factor de cobertura adecuado, representado por k. El propósito fundamental de esta incertidumbre expandida es crear un rango alrededor del resultado de la medición que tenga la capacidad de abarcar una amplia porción de la distribución de valores que podrían ser asociados con la magnitud medida.

$$U_{(y)} = k * u_{c(y)} \quad (08)$$

Donde:

k = Se estima como la t-student al nivel de confianza establecido y los grados de libertad calculados.

Los grados efectivos de libertad se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$v_{ef} = \frac{(u_{c(y)})^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(u_{y_i})^4}{v_{x_i}}} = \frac{(u_{c(y)})^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(c_i(x_i) * u(x_i))^4}{v_{x_i}}} \quad (09)$$

Donde:

n = es el número de variables de entrada,

v_{x_i} = es el número de grados efectivos de libertad de cada variable de entrada,

$u(y_i)$ = es la incertidumbre estándar de cada variable de entrada en la unidad del mensurando o variable de salida,

$u(x_i)$ = es la incertidumbre estándar de cada variable de entrada y

$c_i(x_i)$ = representa el coeficiente de sensibilidad con relación a cada variable de entrada x_i .

2.2.2.8. Factor de cobertura

Según lo establecido en la Guía GUM (2008), el factor de cobertura k es un coeficiente numérico utilizado para multiplicar la incertidumbre combinada estándar con el propósito de obtener la incertidumbre expandida, y su elección depende del nivel de confianza deseado. En términos generales, los valores típicos de k son 1, 2 y 3. Sin embargo, en situaciones especiales, es posible que

se utilicen valores de k que no se encuentren dentro de este rango convencional. La elección del factor de cobertura se relaciona con una distribución que es esencialmente normal y se selecciona para alcanzar un nivel de confianza específico.

- Si $k = 1$ corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 68%.
- Si $k = 2$ corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 95%.
- Si $k = 3$ corresponde a un nivel de confianza de aproximadamente 99%.

2.2.3. Repetibilidad y reproducibilidad en la estimación de la incertidumbre

De acuerdo con Portuondo P. y Portuondo M. (2010), este enfoque se trata de una técnica estadística que encuentra aplicación en diversas áreas, como la evaluación de pruebas de aptitud, la validación de métodos de calibración, el análisis de comparación entre laboratorios, la estimación de la incertidumbre de la medición, el análisis de cartas de control, el estudio de la variabilidad en mediciones e instrumentos, y la evaluación de la estabilidad (deriva) de instrumentos, entre otros. Este método se revela como una herramienta útil para determinar qué fuentes son responsables de las variaciones en los datos de medición. Esto contribuye a identificar si las variaciones se deben principalmente a mediciones repetidas por el mismo operador o si existe una variabilidad significativa entre operadores o condiciones de medición.

Según Escamilla, M et al., (2020), los errores de un método de medición se generan debido a causas relacionadas con la exactitud o causas relacionadas con la precisión. A su vez, la precisión del sistema la integran dos componentes: Repetibilidad y reproducibilidad.

2.2.3.1. Repetibilidad y reproducibilidad

Según ASTM E691 (2019), estos dos términos se refieren a la variabilidad de los resultados de las pruebas obtenidos en condiciones específicas de laboratorio y representan los dos extremos de la precisión del método de prueba. La repetibilidad se refiere a la variabilidad entre los resultados de pruebas independientes obtenidos dentro de un solo laboratorio en el período de tiempo

práctico más corto por un solo operador con un conjunto específico de aparatos de prueba utilizando muestras de prueba (o unidades de prueba) tomadas al azar de una sola cantidad de material homogéneo obtenido o preparado para el estudio de R&R. La reproducibilidad se ocupa de la variabilidad entre los resultados de una sola prueba obtenidos en los diferentes analistas, cada uno de los cuales ha aplicado el método de prueba a especímenes de prueba (o unidades de prueba) tomados al azar de una sola cantidad de material homogéneo obtenido o preparado para el estudio.

2.2.3.2. Cálculo de las estadísticas

Según la norma ASTM E691 (2019), el análisis y el tratamiento de los resultados de la prueba R&R tienen tres propósitos, determinar si los datos recopilados son lo suficientemente consistentes para formar la base de una declaración de precisión del método de prueba, investigar y actuar sobre cualquier dato que se considere inconsistente, y obtener la precisión del método de prueba. El análisis estadístico de los datos para las estimaciones de las estadísticas de precisión es simplemente un análisis de varianza unidireccional (dentro del laboratorio). Dado que tal análisis puede ser invalidado por la presencia de valores atípicos severos, es necesario examinar primero la consistencia de los datos.

Para calcular la incertidumbre en condiciones de repetibilidad, se sigue los siguientes pasos establecidos en la norma ASTM E691-19 y ASTM C802-14.

- a. **Promedio de cada participante, \bar{x} :** Calcule el promedio para cada participante usando la ecuación (10).

$$\bar{x} = \sum_{1}^{n} \frac{x}{n} \quad (10)$$

Donde:

\bar{x} = el promedio de los resultados de la prueba en una celda,

x = los resultados de la prueba individual en una celda, y

n = el número de resultados de la prueba en una celda

- b. **Desviación estándar de cada participante, s:** Calcule la desviación estándar de los resultados de la prueba en cada participante usando la ecuación (11).

$$s = \sqrt{\sum_1^n \frac{(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (11)$$

- c. **Promedio de los promedios de celda, $\bar{\bar{x}}$:** Calcule el promedio de todos los promedios de participantes usando la ecuación (12).

$$\bar{\bar{x}} = \sum_1^p \frac{\bar{x}}{p} \quad (12)$$

Donde:

$\bar{\bar{x}}$ = Promedio de los promedios de los participantes para un material,

\bar{x} = Promedio de los participantes individuales, y

p = Número de participantes.

- d. **Desviación estándar de los promedios de los participantes, $s_{\bar{x}}$:** Calcule esta estadística usando la ecuación (13).

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\sum_1^p \frac{(\bar{x} - \bar{\bar{x}})^2}{(p - 1)}} \quad (13)$$

- e. **Desviación estándar de repetibilidad, s_r :** Calcule esta la desviación estándar de repetibilidad usando la ecuación (14).

$$s_r = \sqrt{\sum_1^p \frac{s^2}{p}} \quad (14)$$

Donde:

s_r = La desviación estándar de repetibilidad,

s = La desviación estándar de cada participante,

p = El número de participantes.

- f. **Desviación estándar del laboratorio s_L**: Calcule la desviación estándar usando la ecuación (15).

$$s_L = \sqrt{s_x^2 - \frac{s_r^2}{n}} \quad (15)$$

Si la varianza s_L es negativo, se establece s_L = 0.

- g. **Desviación estándar de reproducibilidad, s_R**: Calcule la desviación estándar de reproducibilidad usando la ecuación (16).

$$s_R = \sqrt{s_L^2 + s_r^2} \quad (16)$$

- h. **Incertidumbre de repetibilidad, u(rep)**: Calcule la incertidumbre de repetibilidad u(rep) usando la ecuación (17).

$$u(rep) = \frac{s_r}{\sqrt{n}} \quad (17)$$

- i. **Repetibilidad y reproducibilidad**: Usando las estadísticas corregidas, se calcula para cada ensayo los límites de repetibilidad y reproducibilidad del 95% (ver Práctica E177) de acuerdo con las ecuaciones (18) y (19).

$$r = 2,8 s_r \quad (18)$$

$$R = 2,8 s_R \quad (19)$$

2.2.4. Métodos de prueba estándar de mecánica de suelos

Conforme a la norma ASTM D6913/D6913M (2017), se define un método de prueba o ensayo como un procedimiento preciso que genera un resultado de prueba. Se puede entender una prueba como una operación técnica que implica la identificación de una o varias propiedades de un producto, proceso o servicio específico, siguiendo un procedimiento establecido. En muchas ocasiones, una prueba forma parte de un experimento.

2.2.4.1. Análisis granulométrico por tamizado

Según la norma ASTM D6913 (2017), El análisis granulométrico por tamizado es un procedimiento estandarizado utilizado para determinar la distribución de tamaños de las partículas presentes en un suelo. Este procedimiento se realiza mediante la separación de las partículas por tamaño utilizando tamices o mallas con diferentes aberturas. La granulometría por tamizado permite conocer el porcentaje en peso de los diversos tamaños de las partículas y así determinar el contenido en finos, la fracción gruesa y la fracción de arena.

Según la norma ASTM D6913, los pasos para realizar el ensayo son:

a) Preparación de la muestra

- Tome una muestra representativa de suelo y elimine cualquier material orgánico o partículas grandes que puedan interferir en el tamizado.
- Seque la muestra en un horno a una temperatura controlada (generalmente $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$) hasta que alcance un peso constante.
- Deje que la muestra se enfríe en un desecador antes de proceder con el ensayo.
- Luego, pulverice la muestra seca para que todas las partículas pasen a través de un tamiz de 4,75 mm (tamiz No. 4).

b) Selección de tamices

- Elija una serie de tamices estándar con aberturas de malla graduadas, desde el tamiz de mayor tamaño hasta el de menor tamaño. Los números de tamiz y las aberturas de malla deben estar de acuerdo con la norma ASTM E11.

c) Tamizado mecánico (opcional)

- Si dispone de un tamizador mecánico, coloque la muestra de suelo en la máquina y ajuste la velocidad y el tiempo de tamizado de acuerdo con las especificaciones de la norma o el estándar aplicable. Esto acelerará el proceso de tamizado.

d) Tamizado manual

- Si no utiliza un tamizador mecánico, coloque el tamiz más grande en la parte superior de una pila de tamices y vierta la muestra de suelo en él.
- Agite suavemente o golpee el tamiz para asegurarse de que todas las partículas pasen a través de él.
- Luego, retire cada tamiz uno por uno, registrando el material retenido en cada uno y pesándolo con precisión.

e) Cálculo de la distribución de tamaños

- Calcule el porcentaje de material retenido en cada tamiz respecto al peso total de la muestra.
- Representar los resultados en un gráfico de distribución granulométrica, donde el eje horizontal muestra el tamaño del tamiz y el eje vertical muestra el porcentaje que pasa.

2.2.4.2. Contenido de Humedad de Suelos

De acuerdo con la norma ASTM D2216 (2019), la humedad del suelo hace referencia a la cantidad de agua contenida en el suelo, y puede expresarse como un porcentaje de la masa de agua con respecto a la masa seca del suelo. El procedimiento definido por esta norma comprende las siguientes etapas:

- Preparación de la muestra: Se toma una muestra representativa del suelo y se registra la masa.
- Secado de la muestra: La muestra se coloca en un horno a una temperatura específica (generalmente $110 \pm 5^\circ\text{C}$) durante un período de tiempo determinado hasta alcanzar una masa constante. Durante este tiempo, el agua en la muestra se evapora y se elimina por completo.
- Enfriamiento de la muestra: Después de secarla, la muestra se enfría a temperatura ambiente y se registra la masa seca.
- Determinación del contenido de humedad: El contenido de humedad (w) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$w = \frac{(M_{cms} - M_{cds})}{(M_{cds} - M_c)} * 100 \quad (20)$$

Donde:

w = contenido de agua, %,

Mcms = masa del recipiente y espécimen húmedo, g,

Mcds = masa del recipiente y la muestra seca al horno, g,

Mc = masa del recipiente, g.

2.2.4.3. Límite Líquido, Límite Plástico e índice de plasticidad de los suelos

Según lo establecido en la norma ASTM D4318 (2017), el ensayo de plasticidad de los suelos se emplea para determinar tres propiedades importantes de los suelos: el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad. El límite líquido, conocido como LL en suelos cohesivos, se refiere al contenido de agua, expresado en porcentaje, en el punto donde el suelo se encuentra en una transición definida entre los estados semilíquido y plástico. Por otro lado, el límite plástico, LP en suelos cohesivos, se refiere al contenido de agua, también en porcentaje, en el punto que marca el límite entre los estados plástico y semisólido.

La norma ASTM D4318 detalla el procedimiento del método de prueba para determinar estas tres propiedades. El procedimiento puede resumirse de la siguiente manera:

- El material utilizado para realizar el ensayo es el que pasa el tamiz No. 40 (425 μ m).
- El límite líquido se determina realizando pruebas en las que una porción del espécimen se esparce en una copa de bronce, dividida en dos por una herramienta de ranurado, y luego se permite que fluyan juntas debido a los impactos causados por la caída repetida de la copa en un dispositivo mecánico estándar, siguiendo el Método de Límite Líquido A (Método Multipunto) o el Método de Límite Líquido B (Método de Un Punto).

- El límite plástico se determina presionando alternadamente y formando un rollito de 3,2 mm de diámetro (1/8 in.) con una pequeña porción de suelo plástico hasta que su contenido de agua se reduzca hasta un punto en el que el rollito se desmorone y ya no pueda ser presionado y enrollado de nuevo. El contenido de agua del suelo en este punto se reporta como el límite plástico.
- El índice de plasticidad se calcula como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Precisión del método de prueba

En la tabla 1, se muestran los criterios que establece la norma ASTM D4318-17, para juzgar la aceptabilidad de los resultados de ensayo. Se ha utilizado el método A (Método multipunto) para el límite líquido y para la preparación de las muestras el procedimiento 1 (Preparación en húmedo). Los ensayos se han realizado en tres tipos de suelos CH, CL y ML.

Tabla 1. Criterios de precisión para juzgar la aceptabilidad de los resultados en los ensayos de Laboratorio (Límite de Atterberg)

Tipo de suelo	Número de ensayos de laboratorio por triplicado			Valor Promedio (Puntos de porcentaje)			Desviación estándar (1s) (Puntos de porcentaje)			Rango aceptable de dos resultados		
	Tipo de prueba											
	LL	PL	PI	LL	PL	PI	LL	PL	PI	LL	PL	PI
	Resultados de un solo operador (Con repetibilidad de laboratorio)											
CH	13	13	13	59,8	20,6	39,2	0,7	0,5	0,8	2	1	2
CL	14	13	13	33,4	19,9	13,6	0,3	0,4	0,5	1	1	1
ML	12	11	11	27,4	23,4	4,1	0,5	0,3	0,6	2	1	2

Fuente: ASTM D4318-17: Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.

2.2.4.4. Gravedad específica de sólidos

Conforme a la norma ASTM D854 (2014), la gravedad específica de los sólidos del suelo, denotada como G_s , se define como la relación entre la masa de una unidad de volumen de sólidos presentes en el suelo y la masa correspondiente de agua destilada, libre de gas, a una temperatura de 20 °C. La gravedad específica de los sólidos del suelo desempeña un papel fundamental en el cálculo de diversas relaciones de fase del suelo, como la relación de porosidad y el grado de saturación. De acuerdo con el método, los pasos para realizar el ensayo se resumen en:

- Preparación de la muestra: Se toma una muestra representativa de suelo y se seca en un horno a una temperatura específica (generalmente $110 \pm 5^\circ\text{C}$) hasta que se haya eliminado todo el contenido de humedad. La muestra se pulveriza hasta obtener un polvo fino.
- Llenado del matraz con agua destilada: Se llena el matraz aforado con una cantidad conocida de agua destilada hasta la marca de aforo. Anote la masa del matraz lleno de agua destilada como " $M_{pw,t}$ ".
- Masa la muestra de suelo seca: Se pesa con precisión la muestra de suelo seca y pulverizada en una balanza analítica. Anote su masa como " M_s ".
- Mezcla de la muestra de suelo y agua: La muestra de suelo seco se coloca en el matraz con agua destilada y se agita bien para asegurar una mezcla uniforme. Asegúrese de que la muestra de suelo esté completamente sumergida en el agua.
- Masa del matraz con la muestra de suelo y agua: Se registra la masa del matraz con la muestra de suelo y agua con precisión. Anote su masa como " $M_{pws,t}$ ".
- Cálculo de la gravedad específica de sólidos: La gravedad específica de sólidos ($G_{s,t}$) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$G_{s,t} = \frac{M_s}{M_s + M_{pw,t} - M_{pws,t}} \quad (21)$$

Donde:

M_s = Masa de la muestra seca al horno, g.

$M_{pw,t}$ = Masa del matraz lleno de agua a temperatura de ensayo (Tt), g.

$M_{pws,t}$ = Masa del matraz, el agua y la muestra seca a la temperatura de ensayo (Tt), g.

$G_{s,t}$ = Gravedad específica a temperatura de ensayo (Tt), (g/cm^3).

Precisión del método de prueba

En la tabla 2, se presenta los criterios que establece la norma ASTM D854-14 para juzgar la aceptabilidad de los resultados. Los resultados fueron obtenidos en los tipos de suelos CH, CL, ML y SP usando el Método A.

Tabla 2. Criterios de precisión para la aceptación de los resultados de los laboratorios de pruebas por triplicado (gravedad específica)

Tipo de suelo	Número de Laboratorios de prueba por triplicado	Valor Promedio	Desviación Estándar (1s)	Rango Aceptable de Dos Resultados
Resultados de un solo operador (dentro del laboratorio de repetibilidad):				
CH	14	2,717	0,009	0,03
CL	13	2,670	0,006	0,02
ML	14	2,725	0,006	0,02
SP	14	2,658	0,006	0,02

Fuente: ASTM D854-14. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.

2.2.4.5. Compactación de suelos con esfuerzo estándar

La norma ASTM D698 (2021), define como el método de compactación de laboratorio utilizado para determinar la relación entre el contenido de agua de moldeo y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 o 6 pulgadas. (101,6 o 152,4 mm) de diámetro con un pisón de 5,50 lbf (24,5 N) que se dejó caer desde una altura de 12,0 in (305 mm) produciendo un esfuerzo de compactación de 12 400 ft-lbf/ ft³ (600 kN-m/ m³).

Precisión del método de prueba

En la tabla 3, se presenta los criterios que establece la norma ASTM D698-12 (2021), para juzgar la aceptabilidad de los resultados. Las pruebas han sido obtenidas en los tipos de suelo CH, CL y ML, se utilizaron el Método A y el Método de Preparación en Seco. Las estimaciones de precisión varían según el tipo de suelo y pueden variar según los métodos utilizados (Método A, B o C, o método de preparación húmedo/seco).

Tabla 3. Criterios de precisión para aceptar los resultados de las pruebas de los laboratorios (compactación de esfuerzo estándar)

Número de laboratorios de prueba por triplicado			Valor de prueba (und.)	Valor promedio			Desviación estándar			Rango aceptable de dos resultados		
Tipo de suelo												
CH	CL	ML		CH	CL	ML	CH	CL	ML	CH	CL	ML
Resultados de un solo operador (repetibilidad dentro del laboratorio):												
11	12	11	$Y_{d,max}$ (pcf)	97,2	109,2	106,3	0,5	0,4	0,5	1,3	1,2	1,3
11	12	11	W_{opt} (%)	22,8	16,6	17,1	0,2	0,3	0,3	0,7	0,9	0,9

Fuente: ASTM D698-12 (2021). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))

2.2.4.6. Compactación de suelo con esfuerzo modificado

La norma ASTM D1557 (2021), define como el método de compactación en laboratorio usado para determinar la relación entre el contenido de agua de moldeo y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactados en un molde de 4 o 6 in. de diámetro (101,6 o 152,4 mm) con un pisón de 10,00 lbf. (44,48 N) que se deja caer desde una altura de 18,00 in. (457,2 mm) produciendo un esfuerzo de compactación de 56 000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³).

Precisión del método de prueba

En la tabla 4, se presentan los criterios que establece la norma ASTM D1557-12 (2021), para juzgar la aceptabilidad de los resultados de peso unitario máximo y contenido de agua óptimo, obtenidos en el laboratorio de prueba.

Tabla 4. Estimaciones de precisión para el método de prueba de Compactación de esfuerzo modificado.

Condiciones de prueba y propiedad de prueba	Desviación estándar (1s)	Rango aceptable de dos resultados (d2s)
Precisión de un solo operador:		
Peso unitario máximo (lbf/ft ³)	0,6	1,8
Contenido de agua óptimo (%)	0,4	1

Fuente: ASTM D1557 – 12 (Reapproved 2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)).

2.2.5. Aseguramiento de la calidad

2.2.5.1. Calidad.

Según ISO 9000 (2015), La calidad es el grado en el que un conjunto de características (rasgos diferenciadores) inherentes de un objeto cumple con los requisitos (necesidades o expectativas establecidas).

2.2.5.2. Control de calidad

Según ISO 9000 (2015), es la parte de la gestión de la calidad orientada al cumplimiento de los requisitos de la calidad.

2.2.5.3. Aseguramiento de la Calidad

Según ISO 9000 (2015), es la parte de la gestión de la calidad orientada a proporcionar confianza en que se cumplirán los requisitos de la calidad.

2.2.5.4. Acreditación ISO 17025

De acuerdo con Otero y Hernández (2009), la Acreditación según la norma internacional ISO 17025:2015 representa un reconocimiento de la competencia técnica de laboratorios dedicados a ensayos y calibraciones. Este proceso engloba aspectos relacionados tanto con el cumplimiento de requisitos de gestión, que son similares a los contemplados en la Certificación ISO 9001, como con aspectos técnicos. Estos últimos son cruciales ya que marcan la diferencia al determinar si nuestros ensayos se llevan a cabo con el nivel de confiabilidad necesario y si se satisfacen las expectativas de los clientes.

2.2.6. Definiciones de términos básicos

- A. Medición.** Es un proceso que implica obtener, a través de experimentos, uno o varios valores que puedan asignarse de manera razonable a una cantidad específica. La medición implica una comparación entre magnitudes o el recuento de elementos. En esencia, una medición requiere proporcionar una descripción de la cantidad que sea coherente con su aplicación prevista, siguiendo un procedimiento de medición y utilizando un sistema de medida que esté calibrado de acuerdo con un método de medición específico, que incluye las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo la medición. (VIM, 2012).

- B. Procedimiento de medición.** Descripción genérica de la secuencia lógica de operaciones aplicadas en una medición. Los métodos de medición pueden ser categorizados en diversas formas, como método de sustitución, método diferencial, método cero, método directo o método indirecto (VIM, 2012).

- C. Procedimiento de medición detallado.** Una descripción minuciosa de una medición que sigue uno o más principios de medición y un método de medición específico. Se basa en un modelo de medición y comprende los cálculos necesarios para obtener un resultado de medición. Por lo general, un procedimiento de medición se documenta con el nivel de detalle

suficiente para que un operador pueda llevar a cabo la medición, y puede incluir una estimación de la incertidumbre de medición (VIM, 2012).

D. Resultado de medición. Conjunto de valores atribuidos a una magnitud que se refiere a un objeto medido, acompañado de cualquier otra información relevante disponible. El resultado de una medición generalmente se presenta como un solo valor medido y su correspondiente incertidumbre de medición. Si se considera que la incertidumbre de medición es insignificante para un propósito particular, el resultado de medición puede expresarse como un único valor medido de la magnitud (VIM, 2012).

E. Precisión de medición. Cercanía entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto o de objetos similares, bajo condiciones específicas, ya sea condiciones de repetibilidad, condiciones de precisión intermedia o condiciones de reproducibilidad. La precisión se utiliza para definir la repetibilidad de la medición, la precisión intermedia y la reproducibilidad (VIM, 2012).

F. Error de medición. Diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia conocido. En otras palabras, el valor de un error conocido se puede aplicar como corrección al resultado de una medición (VIM, 2012).

G. Exactitud de medición. Cercanía entre un valor medido y un valor verdadero de una magnitud medida. La exactitud de medición no se cuantifica numéricamente y se evalúa en términos de cuán cercanos están los valores medidos en relación con el valor verdadero. Una medición se considera más exacta cuanto menor sea su error de medición (VIM, 2012).

H. Repetibilidad de medición. Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas realizadas bajo las mismas condiciones, utilizando el mismo método, los mismos accesorios de laboratorio, en el

mismo laboratorio, por el mismo operador y con el mismo equipo en intervalos de tiempo cortos (DA-acr-09D, 2014).

- I. Reproducibilidad de medición.** Precisión en la que los resultados de un ensayo se obtienen mediante el mismo método, utilizando materiales de ensayo idénticos, en diferentes laboratorios, con diferentes operadores y equipos (DA-acr-09D, 2014).

- J. Trazabilidad metrológica.** Característica de un resultado de medición que permite relacionarlo con una referencia, como una unidad de medida, mediante una cadena de calibraciones documentadas y permanentes. Cada calibración en esta cadena contribuye a la incertidumbre de medición. Esto puede aplicarse a muestras, documentos, instrumentos o materiales de referencia (DA-acr-12D, 2016).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

3.1.1. Ubicación geográfica de la Investigación

El presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones del laboratorio de mecánica de Suelos y concreto de la empresa Grupo VICAF SAC, ubicado en el Jr. Los Topacios No. 440 – Urb. Villa Universitaria, en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca.

3.2. Metodología de la Investigación

3.1.2. Tipo de estudio y diseño de investigación

Tabla 5. Tipificación de la investigación

CRITERIO	TIPO
Finalidad	Aplicada
Estrategia o enfoque metodológico	Cuantitativa
Objetivos	Correlacional
Fuente de datos	Primaria y secundaria
Diseño de prueba de hipótesis	Experimental
Temporalidad	Transversal (sincrónica)
Contexto donde se desarrolla	Laboratorio
Intervención disciplinaria	Unidisciplinaria

El presente trabajo de investigación es un estudio aplicativo cuantitativo, retrospectivo de corte transversal y diseño experimental.

- **Es aplicada**, porque el objetivo principal es aplicar los conocimientos teóricos para abordar problemas prácticos y lograr resultados tangibles y aplicables en cualquier laboratorio de ensayos.

- **Es Cuantitativo**, porque se utiliza métodos y técnicas de recolección y análisis de datos numéricos para responder a las preguntas de investigación. Se enfoca en la medición objetiva y el análisis estadístico de variables para obtener conclusiones generales y objetivas sobre una población o muestra.
- **Es retrospectivo**, porque utiliza datos e información ya existentes, recopilados mediante ensayos de laboratorio, para analizar relaciones, patrones o asociaciones retrospectivas entre variables.
- **Es de corte transversal**, porque recopila datos de una población en un momento específico, proporcionando información instantánea de la prevalencia o distribución de variables de interés.

3.1.3. Población de estudio

La población de estudio para el presente trabajo de investigación está conformada por todos los laboratorios que realizan ensayos de mecánica de suelos de la ciudad de Cajamarca.

3.1.4. Muestra

La muestra está conformada por el laboratorio de mecánica de suelos de la empresa Grupo VICAF SAC de la ciudad de Cajamarca.

3.1.5. Técnicas e instrumentos de recopilación de información

3.1.5.1. Técnicas de recopilación de información

- Análisis documental, porque se usan documentos tales como certificados de calibración, manuales de equipos, normas técnicas, guías técnicas e investigaciones relacionadas al tema de investigación.

- Análisis de contenido, pues se verifican los resultados obtenidos de acuerdo con estándares internacionales, se usarán fichas de control.
- Observación Directa, pues se observarán y recolectarán datos de los diferentes ensayos de repetibilidad y reproducibilidad por cada método de prueba estándar a evaluar realizados en el Laboratorio.

3.1.5.2. Instrumentos de recopilación de información

Se utilizaron formatos para la recolección de los datos en el laboratorio, los cuales están validados por el jefe de laboratorio y verificados por el ingeniero asesor. A demás de los registros de ensayos, se han utilizado fichas documentales tales como:

- Certificados de calibración de los equipos
- Manuales de equipos
- Cartillas de control,
- Pruebas de aptitud,
- Registros de ensayos y
- Estándares ASTM de los diferentes métodos de ensayo.

3.1.6. Técnicas para el procesamiento y análisis de la información

3.1.6.1. Procesamiento de la información

Antes de comenzar el análisis, los datos se organizan en tablas de manera clara y estructurada. Luego se procede al tratamiento estadístico utilizando el programa Minitab versión 19. Con este programa estadístico primero se realizó la verificación de posibles datos atípicos que pueden existir en los resultados de los ensayos y luego se realizó la prueba de normalidad de Anderson-Darling; posteriormente, en una hoja electrónica de cálculo de Microsoft 365 se calcula estadísticas descriptivas básicas, como promedio, mediana y desviación estándar, para entender la tendencia central y la dispersión de los datos.

La prueba de Anderson-Darling es un método estadístico utilizado para determinar si un conjunto de datos se ajusta a una distribución de probabilidad

específica, como la distribución normal, exponencial, logística, entre otras. Esta prueba se fundamenta en la estadística de prueba AD, la cual se deriva de los datos observados y de la distribución de probabilidad teórica que se desea evaluar. La hipótesis nula asociada a esta prueba postula que los datos provienen de la distribución teórica en cuestión. Aunque la prueba de Anderson-Darling guarda similitudes con la prueba de Kolmogórov-Smirnov, se considera más eficaz, especialmente cuando se trabajan con conjuntos de datos de gran tamaño.

El procedimiento para realizar la prueba de Anderson-Darling es el siguiente:

- Seleccionar la distribución de probabilidad teórica que se quiere evaluar.
- Calcular los valores de probabilidad acumulada correspondientes a cada dato, utilizando la distribución teórica seleccionada.
- Calcular la estadística de prueba AD: Calcular el valor crítico de la prueba de Anderson-Darling a partir de tablas estadísticas o utilizando software especializado.
- El criterio de elección es el siguiente: si el valor p es mayor que α (0,05), entonces se puede concluir que los datos siguen una distribución normal. Por otro lado, si el valor p es menor o igual a α (0,05), se puede inferir que los datos no se ajustan a una distribución normal.

3.1.6.2. Análisis e interpretación de la información

Para el análisis e interpretación de los datos se han elaborado gráficos y representaciones visuales tales como gráficos de barras para representar la consistencia de los resultados de cada técnico que realizó los ensayos, gráficos de dispersión para evaluar la distribución de probabilidad normal de los resultados, diagramas de cajas para evaluar la atipicidad de los resultados, diagramas de Ishikawa causa - efecto para evaluar las posibles fuentes de incertidumbre que contribuyen a la incertidumbre de medida de cada método de prueba y diagramas de barras para representar la contribución de cada fuente de incertidumbre.

Los resultados del estudio de repetibilidad, reproducibilidad y los cálculos de la estimación de la incertidumbre de medida para cada método de prueba estándar evaluado se presentan en tablas de datos y gráficos, estos resultados han sido analizados utilizando la Hoja Electrónica de Cálculo Microsoft Excel de Microsoft 365.

3.1.7. Equipos y materiales

3.1.7.1. Suelo

Se realizó un muestreo de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma ASTM D75 para obtener un suelo homogéneo.

3.1.7.2. Métodos estandarizados

- Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partícula (gradación) de suelos mediante análisis de tamiz.
- Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo por masa.
- Método de prueba estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.
- Método de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos del suelo por picnómetro de agua.
- Método de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando el esfuerzo estándar (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
- Método de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando esfuerzo modificado (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³)).

3.1.7.3. Equipos de Laboratorio

- Serie de Tamices

- Balanza analítica con resolución de 1 g y capacidad de 30000 g
- Balanza analítica con resolución de 0,01 g y capacidad de 4200 g
- Estufa
- Copa de Casagrande
- Molde de compactación de 4 in.
- Martillo de compactación de 4,5 kg
- Martillo de compactación de 2,5 kg
- Matraz aforado de 500 ml de capacidad.
- Herramientas diversas para mezclado.

En la tabla 6, se muestran las especificaciones de las balanzas utilizadas en la ejecución de los ensayos de los métodos de prueba estándar.

Tabla 6. Datos de las balanzas utilizadas en los ensayos

Código Interno	VCF-EQ-BAL-003	VCF-EQ-BAL-001
Descripción	Balanza Digital	Balanza Digital
Marca	OHAUS	OHAUS
Modelo	PR4202/E	R21PE30ZH
Serie No.	C209624207	8356390711
Carga Máxima	4200 g	30 000 g
Resolución	0,01 g	1 g
Tipo	Electrónico	Electrónico
Corrección	$R - 2,46E-06 * R$	$R + 2,50E-05 * R$
Incertidumbre expandida (U)	$2 * \text{Raíz}(4,00E-05 + 1,09E-10 * R^2)$	$2 * \text{Raíz}(7,63E-6 + 3,55E-9 * R^2)$

Donde R es la lectura tomada directamente del indicador de la balanza.

3.1.7.4. Materiales de Gabinete

- Certificados de calibración de equipos
- Normas de ensayo ASTM
- Guías y procedimientos

- Programa Microsoft 365
- Programa Minitab versión 19.

3.3. Procedimientos de la investigación

3.1.8. Métodos de prueba estándar

Para realizar apropiadamente cada uno de los Métodos de prueba estándar (ensayos), se siguieron los procedimientos indicados en la tabla 7 de las normas técnicas (estándares) de la American Society for Testing and Materials (ASTM).

La realización de los ensayos se realizó siguiendo las siguientes instrucciones:

- Las mediciones se llevaron a cabo en condiciones de repetibilidad y reproducibilidad, lo que significa que se realizaron en un corto período de tiempo por el mismo operador y sin realizar calibraciones intermedias de los equipos o instrumentos de medición utilizados.
- Cada prueba se ejecutó de manera independiente, como si se estuviera evaluando materiales diferentes. El objetivo del experimento es identificar las posibles variaciones en los resultados que podrían observarse en una prueba real. Por lo tanto, la prueba se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento que se utiliza habitualmente en el laboratorio.
- Las mediciones de todos los niveles se realizaron por un único y mismo operador y, además, las “n” mediciones se realizaron utilizando el mismo equipo de medición.

En la tabla 7 se presentan los métodos de prueba estándar aplicados para determinar las contribuciones de las fuentes de incertidumbre para cada método de prueba estándar en laboratorio.

Tabla 7. Estándares aplicados en los procedimientos de ensayo para determinar la incertidumbre de medida

Estándar o método de prueba	Designación de la norma
Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partícula (gradación) de suelos mediante análisis de tamiz.	ASTM D6913/D6913M-17
Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo por masa.	ASTM D2216-19
Método de prueba estándar para el límite líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad de los suelos.	ASTM D4318-17 ^{e1}
Método de prueba estándar para la gravedad específica de sólidos del suelo por picnómetro de agua.	ASTM D854-14
Método de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando el esfuerzo estándar (12 400 ft-lbf/ft ³ (600 kN-m/m ³)).	ASTM D698-12 (2021)
Método de prueba estándar para las características de compactación de laboratorio del suelo utilizando esfuerzo modificado (56 000 ft-lbf/ft ³ (2 700 kN-m/m ³)).	ASTM D1557-12 (2021)

3.1.9. Descripción de los métodos de prueba estándar

En la Tabla 8, se relaciona el nombre del Método de prueba, el material a ensayar, el mensurando que se va a evaluar, el intervalo esperado de medición, las cifras significativas y/o posiciones decimales a reportar y la norma de referencia del Método de prueba.

Donde: M = mensurando que se va a evaluar; IM = intervalo esperado de medición; CSR = cifras significativas a reportar.

Tabla 8. Descripción de los métodos de prueba y mensurandos a evaluar

Nombre del Método de prueba	Material para ensayar	Mensurando (M), Intervalo de medición (IM) y cifras significativas a reportar (CSR)	Norma de referencia del método de prueba
Determinación de la Granulometría por Tamizado	Suelo	M = % que pasa cada tamiz IM = 1 % a 100% CSR = 3 cifras significativas con aproximación decimal a 0,1 % cada medición y el promedio	ASTM D6913/D6913M-17
Determinación el Contenido de Humedad de Suelos, con base en la Masa (Método B)	Suelo	M = % humedad IM = 1 % a 100% CSR = 4 cifras significativas con aproximación decimal a 0,01 % cada medición y el promedio	ASTM D2216-19
Determinación de la Gravedad específica de suelos (Método B)	Suelo	M = Gravedad específica IM = 1,90 g/cm ³ a 2,85 g/cm ³ CSR = 4 cifras significativas con aproximación decimal a 0,001 cada medición y el promedio	ASTM D854-14
Determinación del Límite Líquido, del Límite Plástico y del Índice de Plasticidad de los Suelos Cohesivos (Método A).	Suelo	M = % Límite líquido, % límite plástico, % Índice de plasticidad IM = 1 % a 100% CSR = 4 cifras significativas con aproximación decimal a 0,01 % cada medición y el promedio	ASTM D4318-17
Determinación de las Relaciones de Humedad - Peso Unitario Seco en los Suelos, (Ensayo Estándar de Compactación) (Método A).	Suelo	M = % humedad optima IM = 5 % a 45 % CSR = 3 cifras significativas con aproximación decimal a 0,01 % cada medición y el promedio M = Peso unitario seco máximo IM = 11,76 kN/m ³ a 23,04 kN/m ³ CSR = 5 cifras significativas con aproximación decimal a 0,001 kN/m ³ cada medición y el promedio	ASTM D698-12(2021)
Determinación de las Relaciones de Humedad - Peso Unitario Seco en los Suelos, (Ensayo	Suelo	M = % humedad optima IM = 5 % a 45 % CSR = 3 cifras significativas con aproximación decimal a 0,01 % cada medición y el promedio	ASTM D1557-12(2021)

Modificado de
Compactación)
(Método A).

M = Peso unitario seco máximo

IM = 11,76 kN/m³ a 23,04 kN/m³

CSR = 5 cifras significativas con
aproximación decimal a 0,001
kN/m³ cada medición y el
promedio

Las Incertidumbres Expandidas son reportadas con (2) dos cifras significativas, y los resultados de cada uno de los mensurandos evaluados, así como su promedio, se ha redondeado al número de decimales que tiene la incertidumbre reportada.

3.1.10. Incertidumbre estándar para la medición de masa

La medición de masa es imprescindible para evaluar las diferentes propiedades físicas de los suelos. Utilizar balanzas calibradas por organismos acreditados con resolución adecuada para el nivel requerido de precisión, realizar varias mediciones para identificar posibles errores y permitir el análisis estadístico, evaluar la incertidumbre de la medición son algunos de los requisitos para obtener datos confiables durante medidas de masa.

Hay una serie de factores que pueden afectar la precisión de una medición de masa, incluida la dispersión de las lecturas (expresada a través de la desviación estándar experimental), la resolución de la balanza, la incertidumbre de calibración de la balanza, la no linealidad y variación del cero de la balanza.

Para evaluar la incertidumbre de la medición de masa, en este trabajo, se consideraron las siguientes variables: corrección asociada a la desviación estándar de los valores indicados por la balanza ($\Delta s(L_{eCB})$); variación de la resolución de la balanza (ΔRes_B); variación de la calibración de la balanza (ΔCal_B); variación de la corrección de la balanza ($\Delta Corr_B$); variación de la linealidad de la balanza (ΔLin_B) y variación de la excentricidad de la balanza (ΔExc_B).

La ecuación (22) presenta el modelo matemático propuesto para evaluar la incertidumbre de la medición de masa.

$$M = \Delta s(L_{eB}) + \Delta Res_B + \Delta Cal_B + \Delta Corr_B + \Delta Lin_B + \Delta Exc_B \quad (22)$$

Donde M es la lectura realizada por la balanza.

La incertidumbre estándar de la dispersión de los valores del mensurando puede ser obtenida a través de una evaluación del Tipo A.

En este trabajo para determinar la incertidumbre estándar asociada a las variables (ResB, CalB, CorrB, LinB y ExcB) se realiza mediante una evaluación tipo B y sus valores son extraídos del certificado de calibración de la balanza.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre en la Ecuación (22) se obtiene la Ecuación (23), que permite calcular la incertidumbre estándar combinada de la medición.

$$\begin{aligned} u_c^2(M) = & \left(\frac{\partial M}{\partial s(L_B)} * u(s(L_B)) \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial Res_B} * u(Res_B) \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial Cal_B} * u(Cal_B) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial M}{\partial Corr_B} * u(Corr_B) \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial Lin_B} * u(Lin_B) \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial M}{\partial Exc_B} * u(Exc_B) \right)^2 \end{aligned} \quad (23)$$

En la Ecuación (23), las derivadas parciales son los coeficientes de sensibilidad, los cuales indican la contribución relativa de cada variable de entrada en la incertidumbre combinada. Dado que el modelo matemático de la medición, representado por la Ecuación (22), resulta de la suma de correcciones relacionadas con las variables influyentes, todas las derivadas parciales son igualmente unitarias.

$$\frac{\partial M}{\partial s(L_B)} = \frac{\partial M}{\partial Res_B} = \frac{\partial M}{\partial Cal_B} = \frac{\partial M}{\partial Cero_B} = \frac{\partial M}{\partial Lin_B} = \frac{\partial M}{\partial Exc_B} = 1 \quad (24)$$

3.1.11. Incertidumbre de medida del análisis granulométrico por tamizado

3.1.11.1. Identificación del mensurando y su principio de medición

El mensurando para el método de prueba es la determinación del porcentaje que pasa en cada tamiz. El modelo matemático propuesto para evaluar la incertidumbre del porcentaje que pasa en cada tamiz es dado en la Ecuación (25).

$$\%Pasa = \left(1 - \frac{Mr}{M_{si}}\right) * 100 \quad (25)$$

Donde:

Mr = Masa retenida en cada tamiz, g

M_{si} = Masa seca inicial de la muestra ensayada, g

3.1.11.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Para identificar las fuentes de incertidumbre se ha empleado el método de causa - efecto, Ishikawa o espina de pescado.

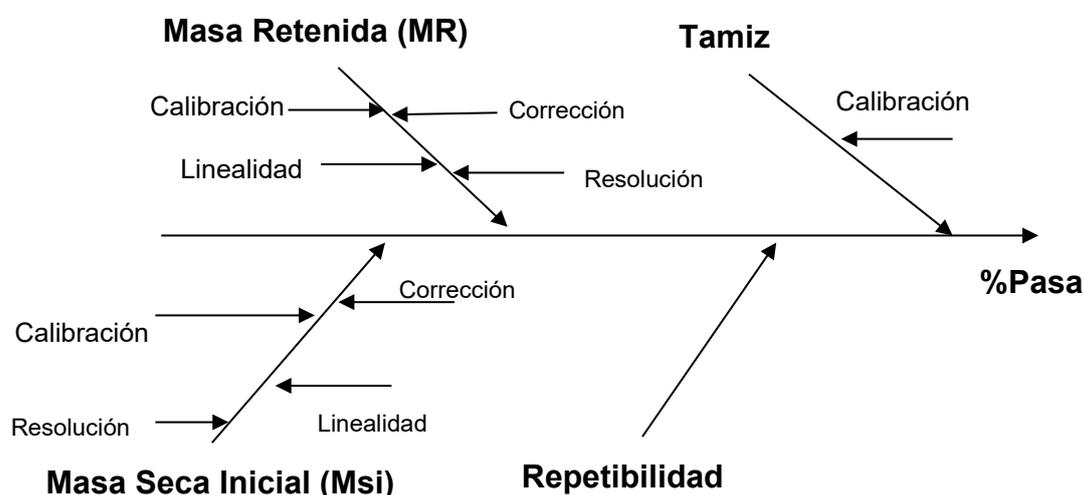


Gráfico 2. Diagrama detallado de causa - efecto para el método de análisis granulométrico por tamizado

3.1.11.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada

El resultado del porcentaje que pasa tiene asociado como variables a la masa retenida en cada tamiz, la masa seca inicial, el tamiz que produce el retenido y la repetibilidad del ensayo. Aplicando la ley de propagación de incertidumbre en la Ecuación (25) se obtiene la Ecuación (26), que permite calcular la incertidumbre estándar combinada del porcentaje que pasa en cada tamiz.

$$u_{\%Pasa}^2 = \left(\frac{\partial \%Pasa}{\partial MR} * u_{MR} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Pasa}{\partial M_{total}} * u_{M_{total}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Pasa}{\partial \theta_{tamiz}} * u_{\theta_{tamiz}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \%Pasa}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}} \right)^2 \quad (26)$$

En la Ecuación (26), las derivadas parciales representan los coeficientes de sensibilidad que se describen en las ecuaciones (27), (28) y (29).

$$\frac{\partial \%Pasa}{\partial MR} = \frac{-1}{M_{total}} * 100 \quad (27)$$

$$\frac{\partial \%PASA_n}{\partial M_{Total}} = \frac{MR}{M_{Total}^2} * 100 \quad (28)$$

$$\frac{\partial \%Pasa}{\partial \theta_{Tamiz}} = \frac{\partial \%Pasa}{\partial \theta_{rep}} = 1 \quad (29)$$

3.1.12. Incertidumbre de medida del contenido de humedad de suelos

3.1.12.1. Identificación del mensurando y su principio de medición

Determinación del contenido de humedad en suelos. En este método de ensayo se determina el porcentaje de agua que contiene una muestra de suelo determinado en laboratorio por secado. El modelo matemático que se usa para evaluar la incertidumbre del contenido de humedad según la norma ASTM D216 es dado en la ecuación (30).

$$w = \frac{(M_{cms} - M_{cds})}{(M_{cds} - M_c)} * 100 \quad (30)$$

Donde:

w = contenido de agua, %,

Mcms = masa del recipiente y espécimen húmedo, g,

Mcds = masa del recipiente y la muestra seca al horno, g,

Mc = masa del recipiente, g.

3.1.12.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre identificadas en el método de prueba se presentan en el diagrama de causa – efecto y son:

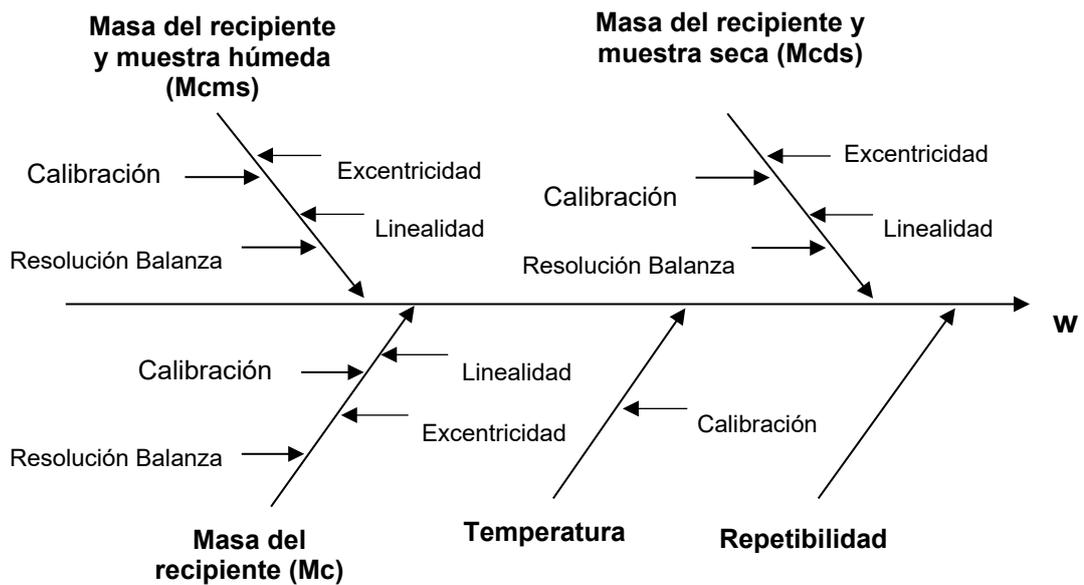


Gráfico 3. Diagrama causa – efecto. Ensayo de contenido de humedad de suelos.

En este diagrama se contemplan las posibles fuentes de incertidumbre que intervienen en el proceso de medida.

3.1.12.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada

Las fuentes de incertidumbre para el contenido de humedad esta dado por las siguientes variables: Masa de la muestra húmeda, masa de la muestra seca, masa de la tara que contiene la muestra de suelo, la variación de los ensayos de repetibilidad del laboratorio y la temperatura de la estufa en el proceso de secado.

Aplicando la ley de la propagación de la incertidumbre en la ecuación (30) se obtiene la ecuación (31) que permite estimar la incertidumbre estándar combinada para el contenido de humedad.

$$u_c^2(w) = \left(\frac{\partial w}{\partial M_{cms}} * u_{(M_{cms})} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial M_{c ds}} * u_{(M_{c ds})} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial M_c} * u_{(M_c)} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial \theta_{tem}} * u_{\theta_{tem}} \right)^2 \quad (31)$$

De la ecuación (31) las derivadas parciales son los coeficientes de sensibilidad, los valores calculados se dan en las ecuaciones (32), (33), (34) y (35).

$$\frac{\partial w}{\partial M_{cms}} = \frac{100}{(M_{c ds} - M_c)} \quad (32)$$

$$\frac{\partial w}{\partial M_{c ds}} = - \frac{M_c - M_{cms}}{(M_{c ds} - M_c)^2} * 100 \quad (33)$$

$$\frac{\partial w}{\partial M_c} = - \frac{100 * (M_{cms} - M_{c ds})}{(M_{c ds} - M_c)^2} \quad (34)$$

$$\frac{\partial w}{\partial \theta_{rep}} = \frac{\partial w}{\partial \theta_{tem}} = 1 \quad (35)$$

3.1.13. Incertidumbre de medida del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

3.1.13.1. Identificación del mensurando y su principio de medición

Estos métodos de ensayo se calcula el porcentaje de agua que contiene una muestra de suelo por secado. El modelo matemático propuesto para determinar el proceso de medida para el límite líquido se da en la ecuación (36).

$$LL = A * LN(X) + B \quad (36)$$

Donde:

LL = Límite líquido

X = Número de golpes igual a 25

A = Pendiente de la función logarítmica

B = Intercepto de la función logarítmica

La ecuación (36) relaciona el contenido de humedad con el número de golpes para cada punto, la relación es semilogarítmica en el eje del número de golpes, convirtiéndose en una estimación lineal cuyos pares ordenados están dados por (Golpes; w).

La ecuación (30) se emplea para calcular el contenido de humedad para el límite plástico.

El índice de plasticidad (IP) está definido como la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP); la ecuación que describe el proceso de medición se da en la ecuación (37).

$$IP = LL - LP \quad (37)$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

3.1.13.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre identificadas en el método de prueba se presentan en el diagrama de Ishikawa o espina de pescado y son:

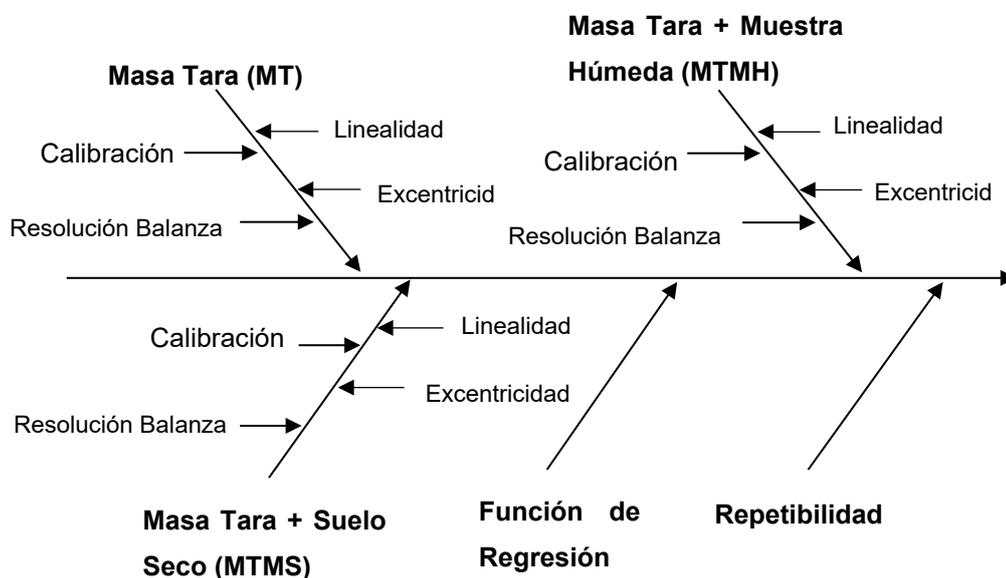


Gráfico 4. Diagrama causa – efecto para identificar las fuentes de incertidumbre del ensayo de plasticidad

3.1.13.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada

Las variables que intervienen en el proceso de medida para el límite líquido (LL) son: El contenido de humedad de cada punto, el número de golpes, la función de regresión lineal, la repetibilidad del ensayo y la variación de la temperatura del horno.

Las variables que intervienen en el proceso de medida para el límite plástico (LP) son: La masa de la tara que contiene la muestra, la masa de la muestra húmeda, la masa de la muestra seca, la repetibilidad del ensayo y la variación de la temperatura del horno de secado.

Las variables que intervienen en el proceso de medida para el índice de plasticidad (IP) son el límite líquido, límite plástico y la repetibilidad del ensayo.

La expresión general para estimar la incertidumbre estándar combinada para el límite líquido se da en la ecuación (38).

$$\begin{aligned}
u_c^2(LL) = & \left(\frac{\partial LL}{\partial FR} * u_{FR} \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial w} * u_w \right)^2 + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}} \right)^2 \\
& + \left(\frac{\partial LL}{\partial \theta_{tem}} * u_{\theta_{tem}} \right)^2
\end{aligned} \tag{38}$$

De la ecuación (38) las derivadas parciales son los coeficientes de sensibilidad, cuyos valores se dan en la ecuación (39).

$$\frac{\partial LL}{\partial FR} = \frac{\partial LL}{\partial w} = \frac{\partial LL}{\partial \theta_{rep}} = \frac{\partial LL}{\partial \theta_{tem}} = 1 \tag{39}$$

La expresión general para estimar la incertidumbre estándar combinada para el límite plástico $u_{c(LP)}$ es el mismo que para el contenido de humedad descrito en el numeral 3.1.13.2 ecuación (31).

De la ecuación (38) aplicando la ley de la propagación de la incertidumbre se obtiene la ecuación (40) para estimar la incertidumbre estándar combinada del índice de plasticidad. El IP es la diferencia ente el LL y LP, los coeficientes de sensibilidad es la unidad ya que la relación entre variables es una resta.

$$u_{c(IP)} = \sqrt{(u_{LL})^2 + (u_{LP})^2 + (u_{\theta_{rep}})^2} \tag{40}$$

a) Evaluación de la incertidumbre en regresión lineal

A menudo es necesario realizar ajustes a modelos lineales cuando una de las variables medidas depende de otra. En tales circunstancias, la información que se busca son los parámetros que definen la función que relaciona ambas variables. El caso más simple es una relación lineal, donde se deben encontrar la pendiente y el punto de intersección de una línea.

La técnica más sencilla para ajustar una línea a un conjunto de datos experimentales es la regresión lineal, conocida también como método de mínimos cuadrados. En este enfoque, se minimiza la suma de las diferencias

al cuadrado entre los datos experimentales y la línea ajustada, utilizando las variables de pendiente (m) y punto de intersección (b). Esto conduce a un sistema de ecuaciones cuya solución es la siguiente:

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (41)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2 \sum_{i=1}^N y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N x_i y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (42)$$

En estas ecuaciones, N representa el número de puntos experimentales, con (xi, yi) como las coordenadas del punto i. Debido a que estos parámetros se derivan de resultados experimentales, están sujetos a incertidumbre. Esta incertidumbre se puede evaluar a partir de las desviaciones entre los puntos experimentales y las predicciones de la línea caracterizada por los parámetros de las ecuaciones (41) y (42). Se utiliza una medida equivalente a la desviación estándar, denominada Sy, como se expresa en la ecuación (43).

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - b)^2}{N - 2}} \quad (43)$$

Una vez que se ha calculado esta desviación estándar, las incertidumbres en la pendiente (sm) y en el punto de intersección (sb) se determinan mediante las ecuaciones (44) y (45).

$$s_m = s_y \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}} \quad (44)$$

$$s_b = s_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2}} \quad (45)$$

Es importante destacar que estas expresiones son válidas solamente si las incertidumbres de cada punto experimental son idénticas. Sin embargo, en el

caso de una línea, considerar incertidumbres distintas en las coordenadas x e y no genera diferencias significativas.

3.1.14. Incertidumbre de medida de la gravedad específica de sólidos

3.1.14.1. Identificación del mensurando y su principio de medición

Este método de ensayo abarca la medición de la densidad relativa de las partículas sólidas presentes en el suelo que tienen un tamaño menor a 4,75 mm (tamaño No. 4), utilizando un matraz lleno de agua como herramienta.

El modelo matemático que describe el proceso de medición para la gravedad específica de sólidos según la norma ASTM D854 se da en la ecuación (46).

$$G_{s,t} = \frac{M_s}{M_s + M_{pw,t} - M_{pws,t}} \quad (46)$$

Donde:

M_s = Masa de la muestra seca al horno, g.

$M_{pw,t}$ = Masa del matraz lleno de agua a temperatura de ensayo (Tt), g.

$M_{pws,t}$ = Masa del matraz, el agua y la muestra seca a la temperatura de ensayo (Tt), g.

$G_{s,t}$ = Gravedad específica a temperatura de ensayo (Tt), (g/cm³).

La masa del matraz lleno de agua a temperatura de ensayo ($M_{pw,t}$) se debe calcular con la ecuación (47).

$$M_{pw,t} = M_p + V_p * \rho_{w,t} \quad (47)$$

Donde:

$M_{pw,t}$ = Masa del matraz lleno de agua a temperatura de ensayo (Tt); g.

M_p = Promedio de la masa del matraz calibrado, g.

V_p = Volumen promedio del matraz calibrado, ml.

$\rho_{w,t}$ = Densidad de la masa del agua a temperatura de ensayo (Tt), g/ml.

El volumen promedio del matraz calibrado (V_p) y la masa promedio del matraz calibrado (M_p) deben calcularse antes de realizar el ensayo siguiendo los pasos descritos en el procedimiento de ensayo de la norma ASTM D584. La ecuación (48) descrita en el procedimiento de ensayo se debe usar para calcular el volumen promedio.

$$V_p = \frac{(M_{pw,c} - M_p)}{\rho_{w,c}} \quad (48)$$

Dónde:

$M_{pw,c}$ = La masa del picnómetro y el agua a temperatura de calibración, g,

M_p = La masa media del picnómetro seco a temperatura de calibración, g, y

$\rho_{w,c}$ = La densidad de la masa del agua a la temperatura de calibración g/ml.

3.1.14.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre identificadas en el método de prueba se presentan en el diagrama de Ishikawa o espina de pescado y son:

- Masa de la muestra seca al horno, Ms
- Masa promedio del matraz calibrado, $M_{p,c}$
- Masa del matraz, agua y muestra seca, $M_{pws,t}$
- Masa del matraz con agua calibrada, $M_{pw,c}$
- Volumen promedio del matraz calibrado, V_p
- Densidad del agua a temperatura de calibración, $\rho_{w,c}$
- Densidad del agua a temperatura de ensayo, $\rho_{w,t}$
- Temperatura del ambiente, T
- Presión atmosférica, P_{atm} .
- Estufa de secado de la muestra
- Repetibilidad del ensayo

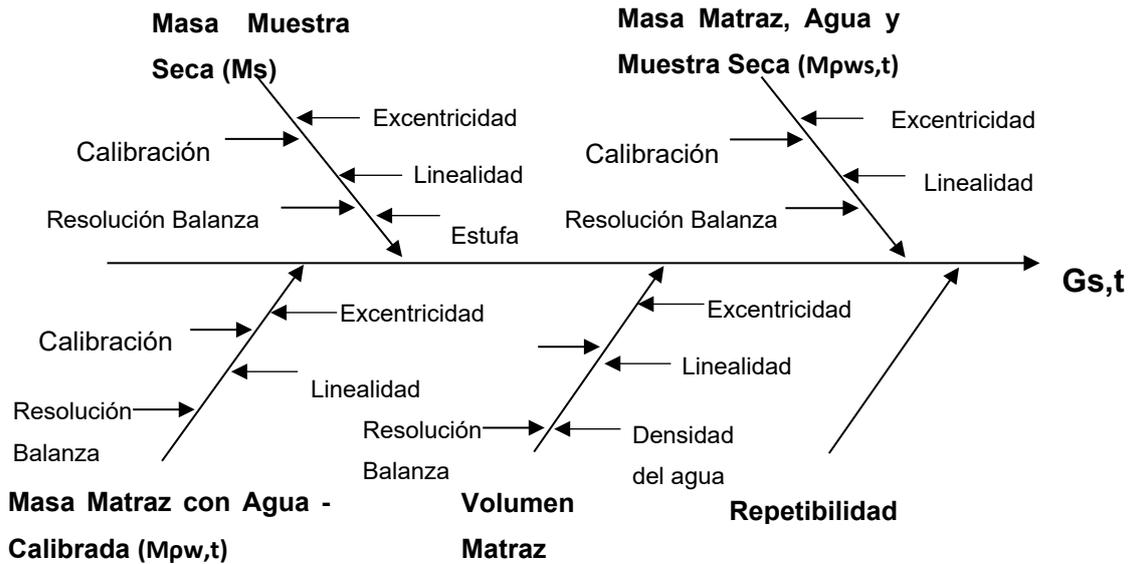


Gráfico 5. Diagrama detallado de causa y efecto para la determinación de la gravedad específica de sólidos.

En este diagrama se contemplan las posibles fuentes de incertidumbre que contribuyen a la variable de salida.

3.1.14.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada

a. Determinación de la incertidumbre estándar del volumen del matraz

La calibración de los utensilios volumétricos de vidrio utilizados en el laboratorio implica establecer el volumen de agua que pueden contener o dispensar. Este volumen de agua (V_p) se determina midiendo la masa del agua y calculando su densidad a la temperatura de prueba. Para esto, se registra la masa del recipiente vacío (M_m) y luego la masa del recipiente lleno con agua destilada hasta la marca de referencia ($M_{pw,c}$). La diferencia entre las masas de ambas mediciones representa la cantidad de agua contenida en el recipiente. De la ecuación (48) se obtiene la ecuación (49) para calcular la incertidumbre estándar combinada del volumen promedio.

$$u_c^2(V_p) = \left(\frac{\partial V_p}{\partial M_{pw,c}} * u(M_{pw,c}) \right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial M_p} * u(M_p) \right)^2 + \left(\frac{\partial V_p}{\partial \rho_{w,c}} * u(\rho_{w,c}) \right)^2 \quad (49)$$

Las derivadas parciales que se muestran en la ecuación (49), representan las diferentes contribuciones a la incertidumbre combinada del volumen, estas contribuciones son los coeficientes de sensibilidad c_i de cada fuente x_i en base al modelo, ecuación (48), los coeficientes de sensibilidad se presentan en las ecuaciones (50), (51) y (52).

$$\frac{\partial V_p}{\partial M_{pw,c}} = \frac{1}{\rho_{w,c}} \quad (50)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial M_p} = \frac{-1}{\rho_{w,c}} \quad (51)$$

$$\frac{\partial V_p}{\partial \rho_{w,c}} = \frac{M_{pw,c} - M_p}{\rho_{w,c}^2} \quad (52)$$

b. Determinación de la incertidumbre estándar de la masa del matraz y agua a T° de ensayo, $M_{pw,t}$

Aplicando la ley de la propagación de incertidumbre en la ecuación (48), se obtiene la ecuación (53), que permite estimar la incertidumbre combinada de la masa del matraz calibrado a temperatura de ensayo.

$$u_c^2(M_{pw,t}) = \left(\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial M_p} * u_{(M_p)} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial V_p} * u_{(V_p)} \right)^2 + \left(\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial \rho_{w,t}} * u_{\rho_{w,t}} \right)^2 \quad (53)$$

En la ecuación (53) las derivadas parciales representan los coeficientes de sensibilidad. Estos coeficientes de sensibilidad se presentan en las ecuaciones (54), (55) y (56).

$$\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial M_p} = 1 \quad (54)$$

$$\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial V_p} = \rho_{w,t} \quad (55)$$

$$\frac{\partial M_{pw,t}}{\partial \rho_{w,t}} = V_p \quad (56)$$

c. Determinación de la incertidumbre de la Gravedad Especifica $G_{s,t}$.

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre en la ecuación (46), se obtiene la ecuación (57), que permite estimar la incertidumbre estándar combinada de la gravedad específica de sólidos.

$$u_c^2(G_{s,t}) = \left(\frac{\partial G_{s,t}}{\partial Ms} * u_{Ms} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M\rho w, t} * u_{M\rho w, t} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M\rho ws, t} * u_{M\rho ws, t} \right)^2 + \left(\frac{\partial G_{s,t}}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}} \right)^2 \quad (57)$$

En la ecuación (57) las derivadas parciales representan los coeficientes de sensibilidad. Estos coeficientes de sensibilidad se presentan en las ecuaciones (58), (59), (60) y (61).

$$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial Ms} = \frac{M\rho w, t - M\rho ws, t}{(Ms + M\rho w, t - M\rho ws, t)^2} \quad (58)$$

$$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M\rho w, t} = \frac{-Ms}{(Ms + M\rho w, t - M\rho ws, t)^2} \quad (59)$$

$$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial M\rho ws, t} = \frac{Ms}{(Ms + M\rho w, t - M\rho ws, t)^2} \quad (60)$$

$$\frac{\partial G_{s,t}}{\partial \theta_{rep}} = 1 \quad (61)$$

3.1.15. Incertidumbre de medida de la máxima densidad seca y optimo contenido de humedad para los métodos de compactación

3.1.15.1. Identificación del mensurando y principio de medición

La finalidad de los ensayos de compactación utilizando energía estándar (ASTM D698) y energía modificada (ASTM D1557) es determinar la máxima densidad seca (Peso Unitario Seco Máximo) y el óptimo contenido de humedad de un suelo compactado. Para encontrar el Peso Unitario Seco primeramente calculamos la densidad húmeda con la Ecuación (62), la densidad seca con la Ecuación (63) y luego el Peso Unitario Seco con la Ecuación (64) como sigue:

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{V} \quad (62)$$

Donde:

ρ_m = Densidad Húmeda del espécimen compactado en (g/cm³).

M_t = Masa del espécimen húmedo y molde (g).

M_{md} = Masa del molde de compactación (g).

V = Volumen del molde de compactación (cm³).

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}} \quad (63)$$

Donde:

ρ_d = Densidad seca del espécimen compactado en (g/cm³).

w = Contenido de agua (%).

$$\gamma_d = 9,8066 * \rho_d \quad (64)$$

Donde:

γ_d = Peso unitario seco del espécimen compactado, kN/m³

La estimación y evaluación de la incertidumbre estándar del contenido de humedad se desarrolla siguiendo el mismo procedimiento descrito en el ítem 3.1.15.

3.1.15.2. Identificación de las fuentes de incertidumbre

Las fuentes de incertidumbre identificadas para estimar la incertidumbre estándar de la densidad seca son:

- Masa del molde de compactación, M_{md}
- Masa del molde y el espécimen húmedo, M_t
- Volumen del molde, V
- Contenido de humedad, w

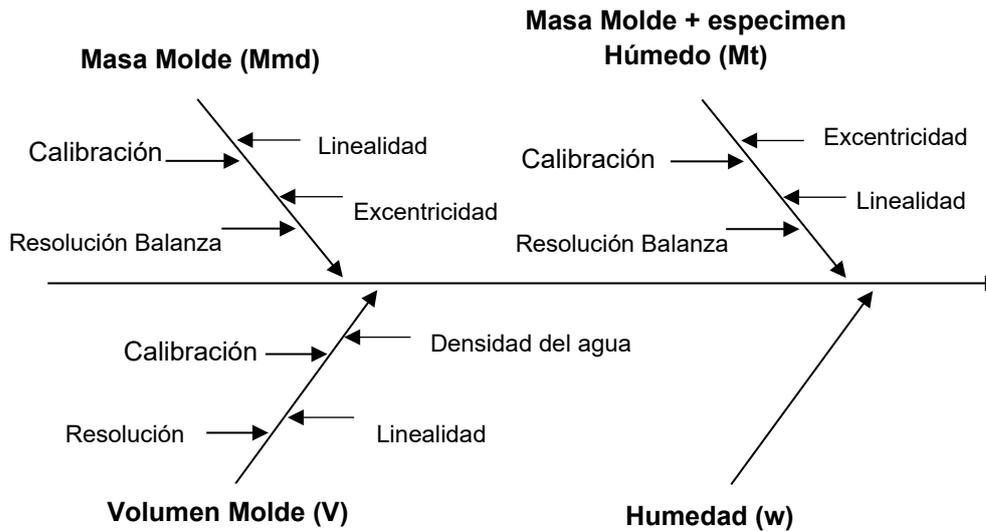


Gráfico 6. Diagrama causa – efecto para la determinación de las fuentes de incertidumbre de la Densidad Húmeda.

3.1.15.3. Determinar la incertidumbre estándar combinada

a. Incertidumbre estándar combinada de la densidad húmeda (ρ_m)

Aplicando la ley de la propagación de incertidumbre en la ecuación (62), se obtiene la ecuación (65), que permite estimar la incertidumbre estándar combinada de la densidad húmeda para cada especimen de ensayo.

$$u_c^2(\rho_m) = \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial M_t} * u_{M_t} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial M_{md}} * u_{M_{md}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_m}{\partial V} * u_V \right)^2 \quad (65)$$

En la ecuación (65) las derivadas parciales representan los coeficientes de sensibilidad, los valores calculados se dan en las ecuaciones (66), (67) y (68).

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial M_T} = \frac{1}{V} \quad (66)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial M_{md}} = \frac{-1}{V} \quad (67)$$

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial V} = -\frac{M_t - M_{md}}{V^2} \quad (68)$$

b. Incertidumbre estándar combinada de la densidad seca (ρ_d)

Aplicando la ley de la propagación de incertidumbre en la ecuación (62), se obtiene la ecuación (69), que permite estimar la incertidumbre estándar combinada de la densidad seca para cada espécimen de ensayo.

$$u_{\rho_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_d}{\partial \rho_m} * u_{\rho_m}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho_d}{\partial w} * u_w\right)^2} \quad (69)$$

En la ecuación (69) las derivadas parciales representan los coeficientes de sensibilidad, los valores calculados se dan en las ecuaciones (70) y (71).

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial \rho_m} = \frac{100}{100 + w} \quad (70)$$

$$\frac{\partial \rho_d}{\partial w} = \frac{100 * \rho_m}{(100 + w)^2} \quad (71)$$

c. Incertidumbre estándar combinada del Óptimo Contenido de Humedad (w_{opt})

En este estudio para evaluar la incertidumbre de medida del óptimo contenido de humedad, fueron consideradas las incertidumbres de humedad de cada espécimen de ensayo. En la ecuación (72) se da la expresión general para estimar la incertidumbre estándar combinada para el óptimo contenido de humedad.

$$u_c^2(w_{opt}) = \left(\frac{\partial w_{opt}}{\partial w_1} * u_{w1}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_{opt}}{\partial w_2} * u_{w2}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_{opt}}{\partial w_3} * u_{w3}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_{opt}}{\partial w_4} * u_{w4}\right)^2 + \left(\frac{\partial w_{opt}}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}}\right)^2 \quad (72)$$

De la ecuación (72), todas las derivadas parciales son unitarias porque la representación matemática de la medida es la suma algebraica de las incertidumbres relacionadas con las variables de influencia.

$$\frac{\partial w_{opt}}{\partial w_1} = \frac{\partial w_{opt}}{\partial w_2} = \frac{\partial w_{opt}}{\partial w_3} = \frac{\partial w_{opt}}{\partial w_4} = \frac{\partial w_{opt}}{\partial \theta_{rep}} = 1 \quad (73)$$

d. Incertidumbre estándar combinada del Peso unitario seco máximo (γ_{max})

Para estimar la incertidumbre estándar combinada del peso unitario seco máximo se toma como contribuciones directas la incertidumbre estándar de la densidad seca de cada especimen de ensayo. En la ecuación (74) se da la expresión general para estimar la incertidumbre estándar combinada para el peso unitario seco máximo.

$$\begin{aligned} u_c^2(\gamma_{max}) = & \left(\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_1} * u_{\gamma_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_2} * u_{\gamma_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_3} * u_{\gamma_3} \right)^2 \\ & + \left(\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_4} * u_{\gamma_4} \right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \theta_{rep}} * u_{\theta_{rep}} \right)^2 \end{aligned} \quad (74)$$

Como el modelo matemático de la medición, Ecuación (74), es el resultado de la suma algébrica de las incertidumbres asociadas a las variables de influencia, entonces todas las derivadas parciales son unitarias.

$$\frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_1} = \frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_2} = \frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_3} = \frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \gamma_4} = \frac{\partial \gamma_{max}}{\partial \theta_{rep}} = 1 \quad (75)$$

3.4. Análisis de datos y presentación de resultados

3.4.1. Ensayos de análisis granulométrico por tamizado

En la tabla 9 se presenta el resumen de los resultados del ensayo de análisis granulométrico por tamizado realizado por los 5 técnicos, cada técnico realizó 10 réplicas o determinaciones de ensayo.

Tabla 9. Resumen de resultados de análisis granulométrico por tamizado

Téc.	Tamices	Replicas									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1 1/2 in.	97,9	97,7	98,2	96,5	96,9	96,9	97,7	96,3	97,7	98,6
	1 in.	89,9	90,2	85,1	87,3	87,8	88,9	85,9	86,6	84,5	86,0
	3/4 in.	79,6	75,7	78,9	76,9	76,5	75,1	75,1	77,1	77,8	77,5
	1/2 in.	63,3	62,0	65,6	60,5	63,5	60,8	65,6	62,5	65,7	62,9
	3/8 in.	59,8	54,2	57,6	56,0	53,4	54,3	54,9	53,4	54,8	56,2
	1/4 in.	46,5	46,6	44,2	48,0	44,5	46,6	47,1	46,9	46,9	47,6
	No. 4	43,9	40,1	40,3	40,3	40,9	40,9	39,5	42,4	38,7	40,7
	No. 10	29,6	27,3	27,2	27,2	27,7	28,0	27,0	28,7	26,2	27,7
	No. 20	20,2	18,9	18,6	18,5	19,0	19,4	18,8	19,7	18,0	19,1
	No. 40	15,1	14,3	13,9	13,8	14,3	14,8	14,3	14,7	13,5	14,5
	No. 60	12,6	12,0	11,6	11,5	11,9	12,5	12,1	12,3	11,3	12,2
No. 100	8,1	8,0	7,5	7,3	7,8	8,4	8,2	8,0	7,4	8,1	
No. 200	5,1	5,3	4,8	4,6	5,0	5,8	5,6	5,2	4,8	5,4	
2	1 1/2 in.	98,3	97,1	96,6	98,4	96,5	97,5	96,5	96,4	97,4	97,1
	1 in.	85,3	88,3	88,6	89,4	88,9	87,4	92,2	91,8	86,9	89,7
	3/4 in.	75,1	73,4	74,1	76,2	79,5	76,7	76,8	78,0	77,7	75,2
	1/2 in.	62,1	62,3	64,3	65,9	63,9	63,2	62,8	67,1	61,3	61,1
	3/8 in.	57,0	54,0	55,5	53,8	58,3	55,6	55,7	55,9	53,9	55,6
	1/4 in.	46,2	44,0	44,7	44,8	46,2	47,9	46,7	49,0	46,1	44,2
	No. 4	40,1	39,1	41,5	40,5	40,3	41,1	42,4	40,0	41,2	40,1
	No. 10	27,1	26,4	28,2	27,5	27,4	27,8	28,6	27,0	28,1	27,4
	No. 20	18,5	18,0	19,4	18,9	18,9	19,0	19,5	18,4	19,5	19,0
	No. 40	13,8	13,4	14,6	14,2	14,3	14,3	14,5	13,7	14,9	14,4
	No. 60	11,5	11,1	12,3	11,9	12,0	11,9	12,1	11,4	12,5	12,1
No. 100	7,4	7,1	8,1	7,8	7,9	7,7	7,8	7,3	8,4	8,1	
No. 200	4,7	4,5	5,3	5,1	5,3	5,0	4,9	4,6	5,7	5,5	
3	1 1/2 in.	96,9	98,4	96,7	97,4	98,1	96,4	95,9	96,5	96,8	97,2
	1 in.	87,0	84,8	86,7	89,9	89,8	86,4	85,6	85,2	89,4	85,1
	3/4 in.	76,6	75,7	78,7	75,3	76,4	73,3	74,7	76,1	76,8	73,6
	1/2 in.	65,2	62,8	64,7	65,2	63,7	63,2	63,0	64,2	65,3	63,4
	3/8 in.	58,0	53,6	56,0	53,2	56,4	53,9	56,7	57,6	55,5	56,8
	1/4 in.	44,7	45,8	44,0	45,0	46,5	46,6	47,1	45,9	47,6	43,9
	No. 4	40,6	41,1	39,8	39,2	40,3	39,0	40,7	38,6	42,6	38,8
	No. 10	27,5	27,8	26,8	26,7	27,3	26,3	27,7	26,3	29,0	26,3
	No. 20	18,8	19,0	18,3	18,4	18,8	18,1	19,3	18,3	20,2	18,3
	No. 40	14,1	14,2	13,6	14,0	14,2	13,6	14,7	13,9	15,4	13,9
	No. 60	11,8	11,8	11,3	11,7	11,7	11,1	12,2	11,6	12,8	11,5
No. 100	7,7	7,7	7,3	7,8	7,6	7,1	8,1	7,6	8,4	7,5	
No. 200	4,9	4,9	4,6	5,2	4,8	4,3	5,3	5,0	5,5	4,8	

4	1 1/2 in.	96,2	96,7	96,1	97,0	98,8	98,2	95,1	97,4	97,2	98,1
	1 in.	89,1	86,2	89,2	89,9	87,5	91,5	90,1	88,2	89,6	85,3
	3/4 in.	76,2	78,3	73,4	73,6	74,9	78,0	76,5	74,4	78,9	75,3
	1/2 in.	62,5	60,6	64,6	60,8	64,8	63,3	64,5	63,7	61,0	65,8
	3/8 in.	57,5	57,3	53,3	56,8	55,5	57,8	54,0	54,0	57,9	58,1
	1/4 in.	48,8	47,7	44,2	45,0	46,6	48,6	44,6	47,8	46,6	45,4
	No. 4	40,2	41,4	39,0	40,1	42,1	41,8	39,2	41,8	39,0	40,6
	No. 10	27,3	28,1	26,4	27,2	28,6	28,2	26,6	28,4	26,6	27,7
	No. 20	18,9	19,5	18,3	18,8	19,9	19,5	18,5	19,7	18,5	19,3
	No. 40	14,4	14,8	13,8	14,2	15,1	14,6	14,1	15,0	14,1	14,8
	No. 60	11,9	12,3	11,4	11,8	12,6	12,1	11,7	12,4	11,7	12,3
	No. 100	7,8	8,0	7,4	7,6	8,2	7,7	7,6	8,1	7,7	8,2
No. 200	5,0	5,1	4,7	4,9	5,3	4,8	4,9	5,3	5,0	5,4	
5	1 1/2 in.	97,0	96,5	96,1	98,1	96,3	97,1	97,1	97,3	98,4	98,5
	1 in.	84,9	90,5	88,3	89,8	85,2	85,0	85,6	89,2	85,6	88,8
	3/4 in.	77,0	77,3	76,0	75,0	78,0	75,5	73,4	78,4	73,3	76,9
	1/2 in.	63,3	61,7	63,1	61,3	62,3	65,9	62,1	65,1	64,3	61,0
	3/8 in.	53,5	57,0	55,2	57,3	54,4	54,5	57,5	56,1	53,6	56,1
	1/4 in.	47,5	47,3	44,6	44,5	47,9	46,5	47,3	47,6	46,6	46,7
	No. 4	42,3	41,6	38,7	38,6	41,2	42,5	42,4	39,3	40,4	40,5
	No. 10	28,8	28,3	26,3	26,3	28,0	28,9	28,9	26,7	27,5	27,6
	No. 20	20,0	19,7	18,3	18,3	19,5	20,1	20,1	18,6	19,1	19,2
	No. 40	15,2	15,0	14,0	13,9	14,9	15,3	15,3	14,2	14,6	14,6
	No. 60	12,7	12,5	11,6	11,6	12,3	12,7	12,7	11,8	12,1	12,1
	No. 100	8,3	8,2	7,6	7,6	8,1	8,4	8,4	7,7	8,0	8,0
No. 200	5,4	5,3	5,0	5,0	5,3	5,5	5,5	5,1	5,2	5,2	

Con los resultados de los ensayos de análisis granulométrico por tamizado, presentados en la tabla 9, se realizó una evaluación de datos atípicos; luego se realizó una prueba de normalidad con el programa estadístico Minitab 19.

En los gráficos 7 – 10, se observa los resultados obtenidos de la prueba de normalidad donde el valor p para el porcentaje que pasa en cada tamiz es mayor al valor 0,05. Se puede concluir que los datos si describen una función de probabilidad normal.

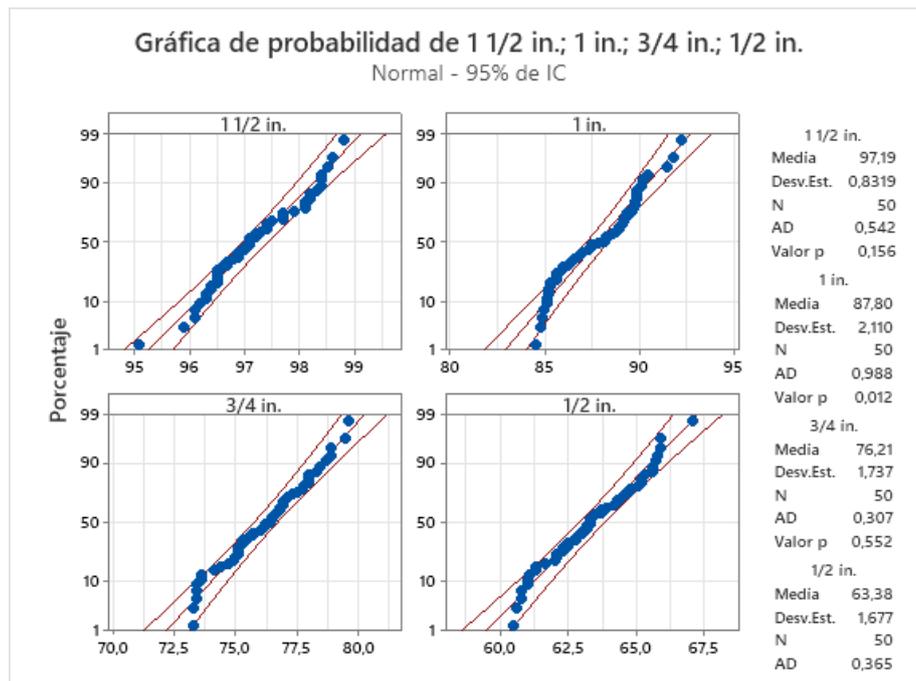


Gráfico 7. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices de 1 1/2 in., 1 in., 3/4 in. y 1/2 in,

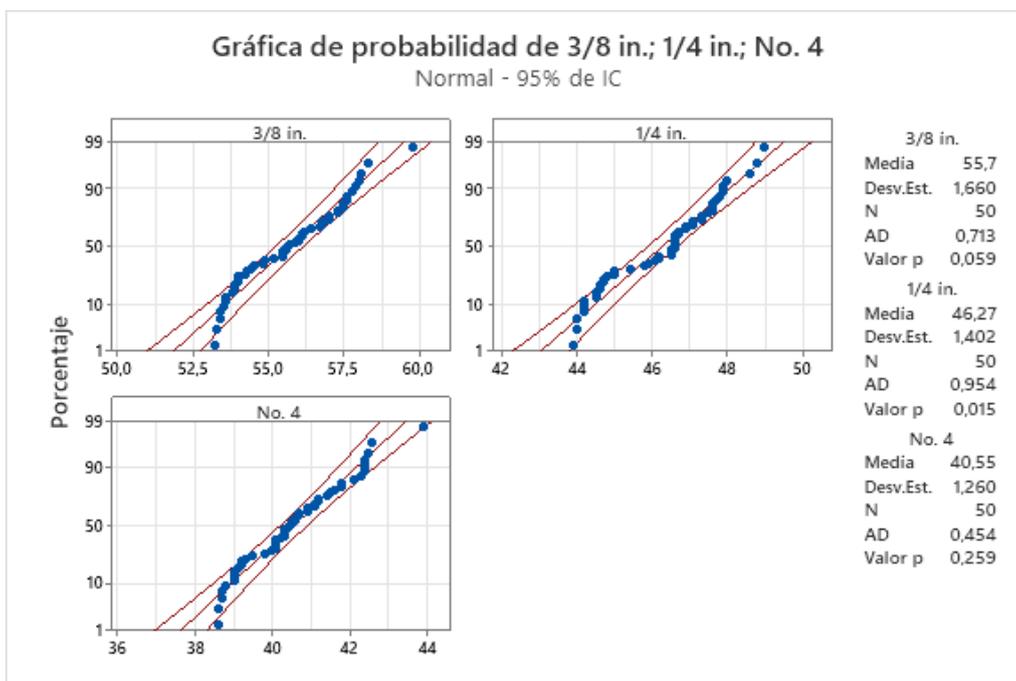


Gráfico 8. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices de 3/8 in., 1/4 in. y No. 4.

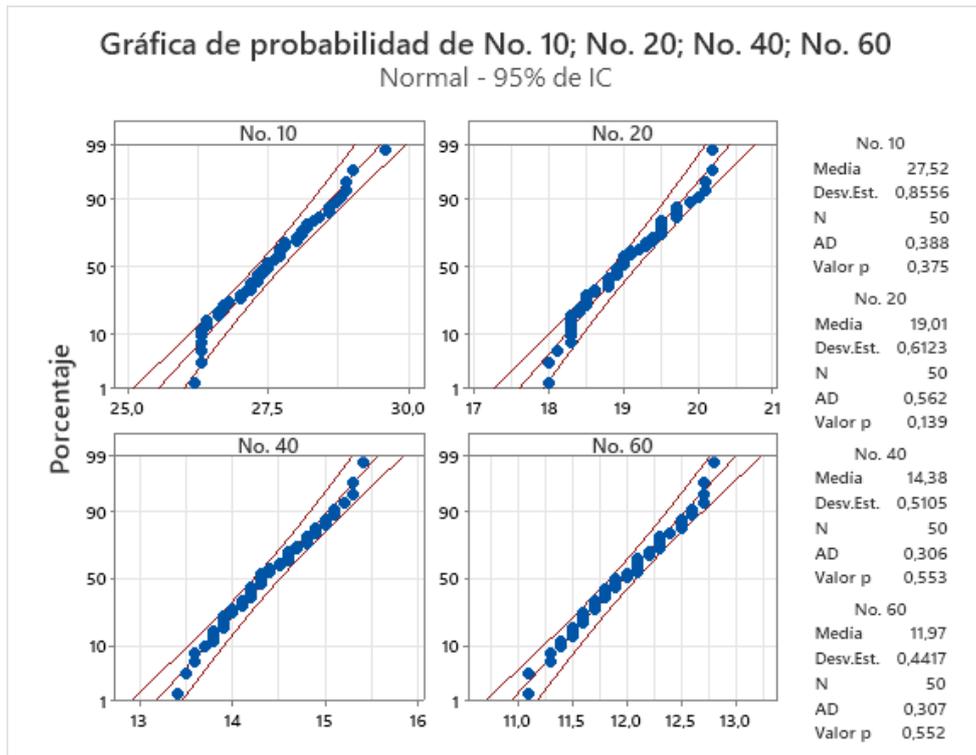


Gráfico 9. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices No. 10, No. 20, No. 40 y No. 60.

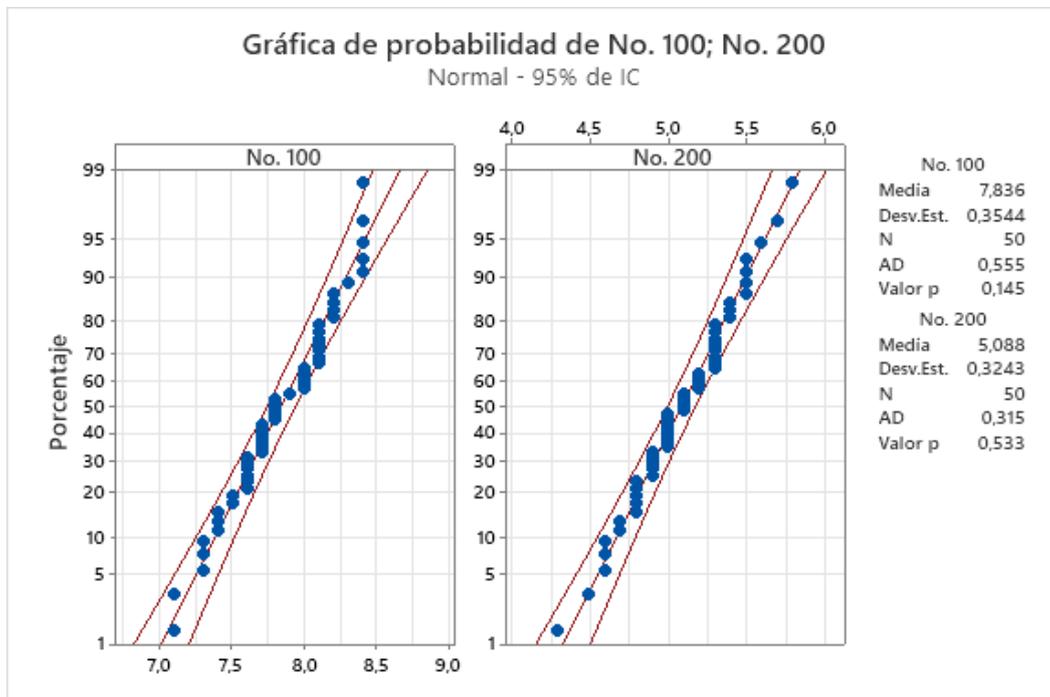


Gráfico 10. Prueba de normalidad del porcentaje que pasa en los tamices No. 100 y No. 200.

3.4.2. Ensayo de contenido de humedad

En la tabla 10, se muestran los resultados obtenidos del contenido de humedad por secado de los 5 técnicos. En este método de prueba, los resultados están reportados con una precisión de 0,01%, esto debido a que necesitamos una mayor precisión para evaluar la incertidumbre de medida del método de ensayo.

Tabla 10. Resultados para el método de prueba de contenido de humedad

Técnico	Resultados de la Prueba de Contenido de Humedad									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7,15	7,18	7,51	7,47	7,43	7,85	7,65	7,43	7,47	7,63
2	7,35	7,50	7,47	7,26	7,20	7,17	7,56	7,52	7,45	7,40
3	7,08	7,21	7,18	7,50	7,56	7,29	7,25	7,22	7,15	7,33
4	7,49	7,48	7,54	7,60	7,33	7,55	7,29	7,56	7,29	7,37
5	7,47	7,61	7,58	7,64	7,61	7,73	7,46	7,55	7,54	7,47

Con los resultados de la Tabla 10, se realizó una evaluación de datos atípicos y una prueba de normalidad para determinar si los datos tienen una distribución normal. En la gráfica 11, se observa que el valor p obtenido es 0,057, y es mayor que 0,05; entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

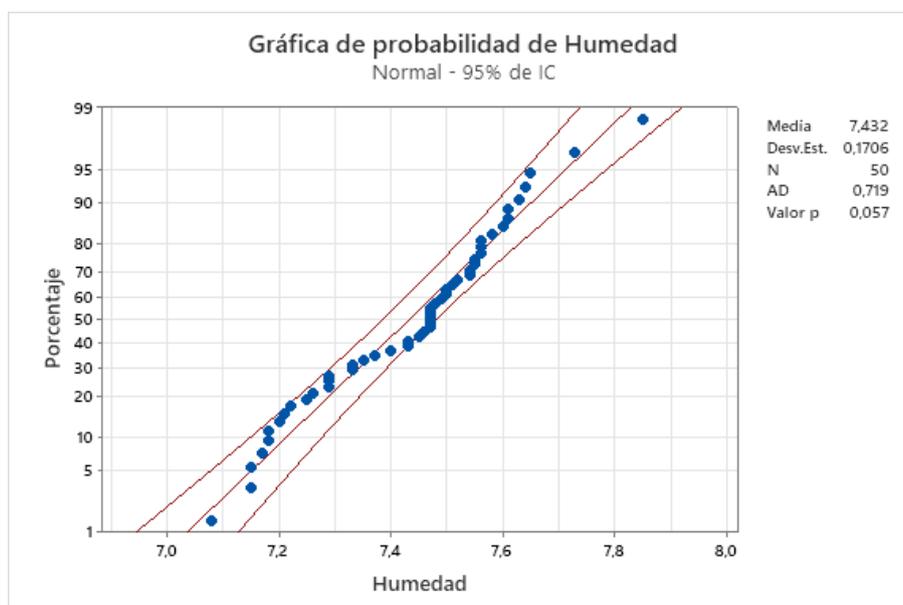


Gráfico 11. Prueba de normalidad de datos de contenido de humedad.

3.4.3. Ensayo de plasticidad (Límites de Atterberg)

En la tabla 11, se muestran los resultados del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de todos los técnicos. El método usado ha sido el Método A (método multipunto). La preparación de la muestra de ensayo ha sido la preparación en húmedo. El estudio se ha realizado por 5 técnicos; cada técnico ha realizado 10 réplicas de prueba. En este método de prueba los resultados están reportados con una precisión de 0,01%, lo que supone un dígito más de lo que exige el método de ensayo para lograr una mayor precisión para poder estimar la incertidumbre de medida del método.

Tabla 11. Resultados para el método de prueba de Límite Líquido (LL), Límite plástico (LP) e Índice Plástico (IP)

Técnico	Replicas									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Resultado de la Prueba de Límite Líquido (LL)										
1	25,76	26,02	25,78	25,70	25,95	25,86	25,99	25,72	25,71	25,81
2	25,79	25,82	25,85	26,03	25,89	25,72	25,88	25,69	25,66	25,81
3	25,95	25,90	25,79	25,96	25,92	25,95	26,04	25,73	25,77	26,02
4	25,73	25,78	25,80	25,74	25,91	25,87	25,82	25,70	25,94	25,76
5	26,05	26,11	26,15	26,03	25,94	25,99	26,02	26,13	26,01	25,85
Resultado de la Prueba de Límite Plástico (LP)										
1	16,09	16,10	16,08	16,04	16,11	16,09	16,15	16,13	15,95	15,95
2	15,76	16,05	15,96	15,99	15,80	16,02	16,03	15,94	15,85	15,97
3	15,73	15,77	15,94	15,97	15,99	15,79	15,98	15,70	15,88	15,95
4	15,80	15,72	16,01	15,87	15,90	15,76	15,93	15,88	16,03	16,01
5	15,82	15,89	15,81	15,64	15,74	15,93	15,73	15,66	15,68	15,76
Resultado de la Prueba de Índice de Plasticidad (IP)										
1	9,67	9,92	9,70	9,66	9,84	9,77	9,84	9,59	9,76	9,86
2	10,03	9,77	9,89	10,04	10,09	9,70	9,85	9,75	9,81	9,84
3	10,22	10,13	9,85	9,99	9,93	10,16	10,06	10,03	9,89	10,07
4	9,93	10,06	9,79	9,87	10,01	10,11	9,89	9,82	9,91	9,75
5	10,23	10,22	10,34	10,39	10,20	10,06	10,29	10,47	10,33	10,09

Con los datos de la tabla 11, se realizó una evaluación de datos atípicos usando la herramienta del diagrama de cajas del programa Minitab; luego se realizó una prueba de normalidad usando Anderson-Darling para evaluar si los datos siguen una distribución normal.

En el gráfico 12, se observa que el valor p para el límite líquido es 0,114; para el límite plástico es 0,158 y para el índice de plasticidad es de 0,198; estos valores son mayores que 0,05; entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

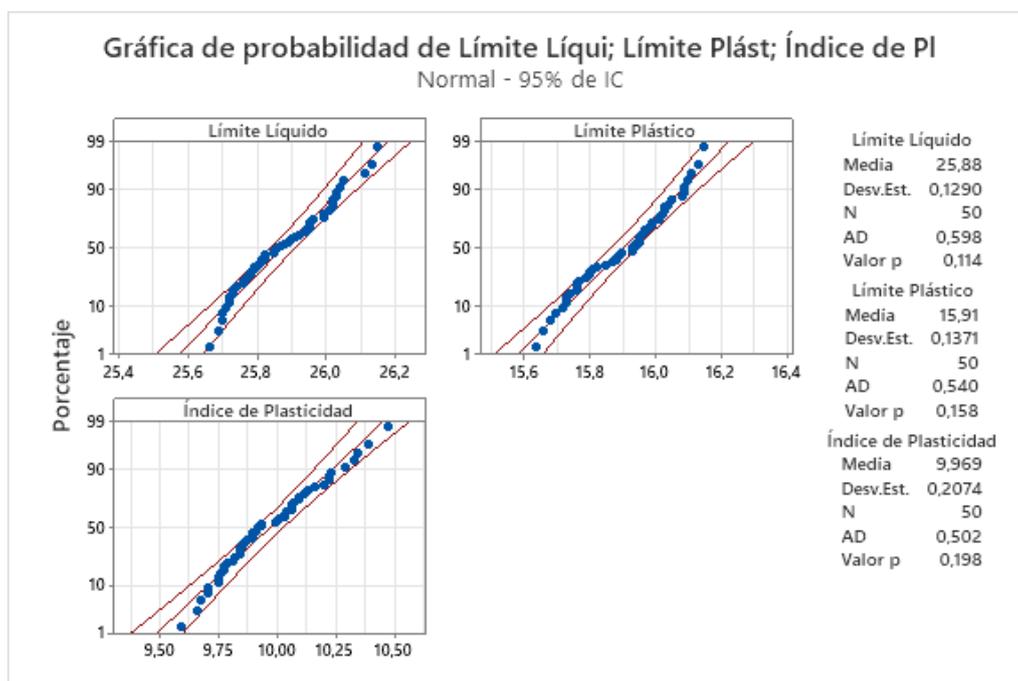


Gráfico 12. Prueba de normalidad de datos de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

3.4.4. Ensayo de gravedad específica de sólidos

En la tabla 12, se muestran los resultados de los ensayos de gravedad específica de sólidos de todos los técnicos. El estudio se realizó por 5 técnicos; cada técnico ha realizado 6 determinaciones de prueba. En este método de prueba los resultados están reportados con una precisión de $0,001 \text{ g/cm}^3$, lo que supone un dígito más de lo que exige el método de ensayo para lograr una mayor precisión al estimar la incertidumbre de medida del método.

Tabla 12. Resultados para el método de prueba de Gravedad Específica de Sólidos

Técnico	Resultado de la Prueba de Gravedad Específica de Sólidos					
	1	2	3	4	5	6
1	2,639	2,644	2,651	2,655	2,647	2,648
2	2,650	2,656	2,658	2,661	2,659	2,660
3	2,653	2,652	2,651	2,649	2,648	2,651
4	2,637	2,641	2,643	2,645	2,647	2,645
5	2,647	2,649	2,651	2,653	2,654	2,655

Con los datos de la tabla 12 se realizó una evaluación de datos atípicos; luego se realizó una prueba de normalidad usando Anderson-Darling para evaluar si los datos siguen una distribución normal.

En el gráfico 13, se observa que el valor p para la gravedad específica de sólidos es 0,981; este valor es mayor que 0,05; entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

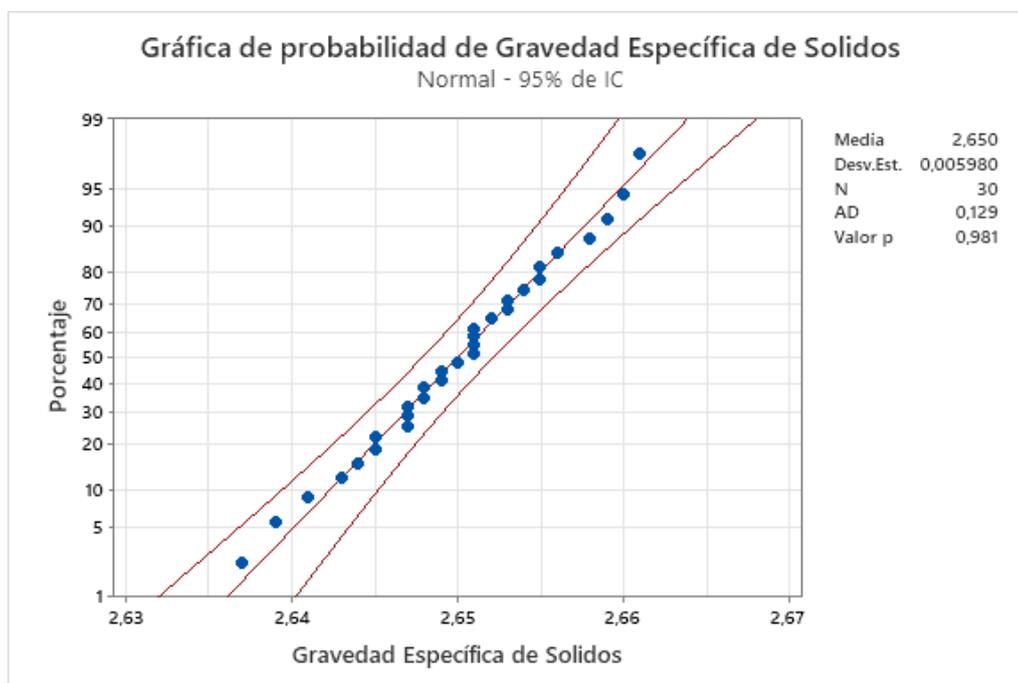


Gráfico 13. Prueba de normalidad de datos de Gravedad específica de Sólidos – Método B

3.4.5. Ensayos de compactación aplicando energía estándar

En la tabla 13, se presentan los resultados de compactación aplicando energía estándar para el óptimo contenido de humedad y Peso Unitario Seco Máximo utilizando el método A. El estudio ha sido realizado por 5 técnicos, cada técnico ha realizado 4 réplicas del método de prueba.

Tabla 13. Resultados para el Óptimo contenido de humedad y el Peso Unitario seco máximo en el método de prueba de Proctor Estándar

Técnico	Replicas			
	1	2	3	4
Óptimo Contenido de Humedad - W_{opt} (%)				
1	7,41	7,40	7,39	7,40
2	8,18	8,23	8,25	7,98
3	7,94	7,61	7,78	7,82
4	7,48	7,75	7,65	7,55
5	7,87	7,93	7,91	8,15
Peso Unitario Seco Máximo – γ_{max} (kN/m³)				
1	20,250	20,224	20,238	20,286
2	20,216	20,138	20,178	20,222
3	20,254	20,204	20,278	20,298
4	20,266	20,172	20,240	20,234
5	20,188	20,136	20,214	20,186

Con los datos de la tabla 13 se realizó una evaluación de datos atípicos; luego se realizó una prueba de normalidad usando Anderson-Darling para evaluar si los datos siguen una distribución normal.

En el gráfico 14, se observa que el valor p para el óptimo contenido de humedad es 0,357 y para el peso unitario seco máximo es 0,955; estos valores son mayor que 0,05; entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

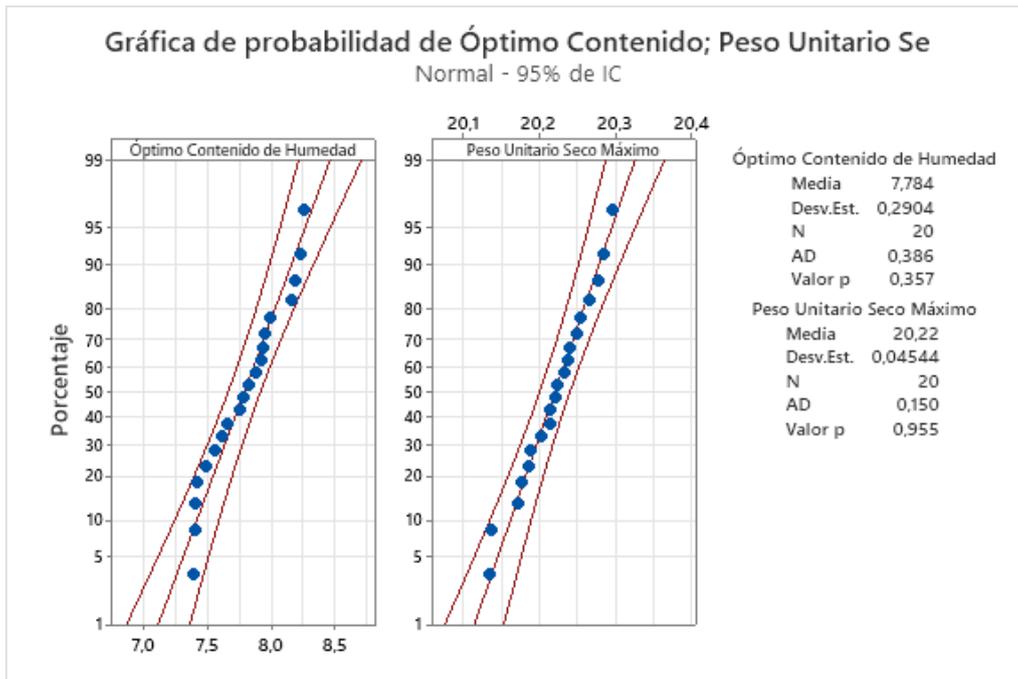


Gráfico 14. Prueba de normalidad de datos del Óptimo contenido de humedad y Peso unitario seco máximo – Método A

3.4.6. Ensayos de compactación aplicando energía modificada

En la tabla 14, se presentan los resultados de los ensayos del óptimo contenido de humedad y Peso Unitario Seco Máximo obtenidos por el método de compactación utilizando energía modificada (Proctor modificado) por cada técnico. El estudio ha sido realizado por 5 técnicos, cada técnico ha realizado 4 réplicas del método de prueba.

Tabla 14. Resultados del Óptimo Contenido de Humedad en la prueba de Proctor modificado

Técnico	Replicas			
	1	2	3	4
Óptimo Contenido de Humedad, W_{opt} (%)				
1	6,30	6,70	6,71	6,55
2	6,25	6,14	6,10	6,44
3	6,79	7,11	7,28	6,95
4	6,43	6,38	6,64	6,53
5	6,44	6,99	6,75	6,44

Peso Unitario Seco Máximo, $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)				
1	20,918	21,002	21,104	21,064
2	20,988	21,012	21,010	20,966
3	21,124	21,092	21,104	21,062
4	20,824	20,856	20,870	20,858
5	20,980	20,880	20,870	20,908

Con los datos de la tabla 14 se realizó una evaluación de datos atípicos; luego se realizó una prueba de normalidad usando Anderson-Darling para evaluar si los datos siguen una distribución normal.

En el grafico 15, se observa que el valor p para el óptimo contenido de humedad es 0,705 y para el peso unitario seco máximo es 0,215; estos valores son mayor que 0,05; entonces se concluye que los datos siguen una distribución normal.

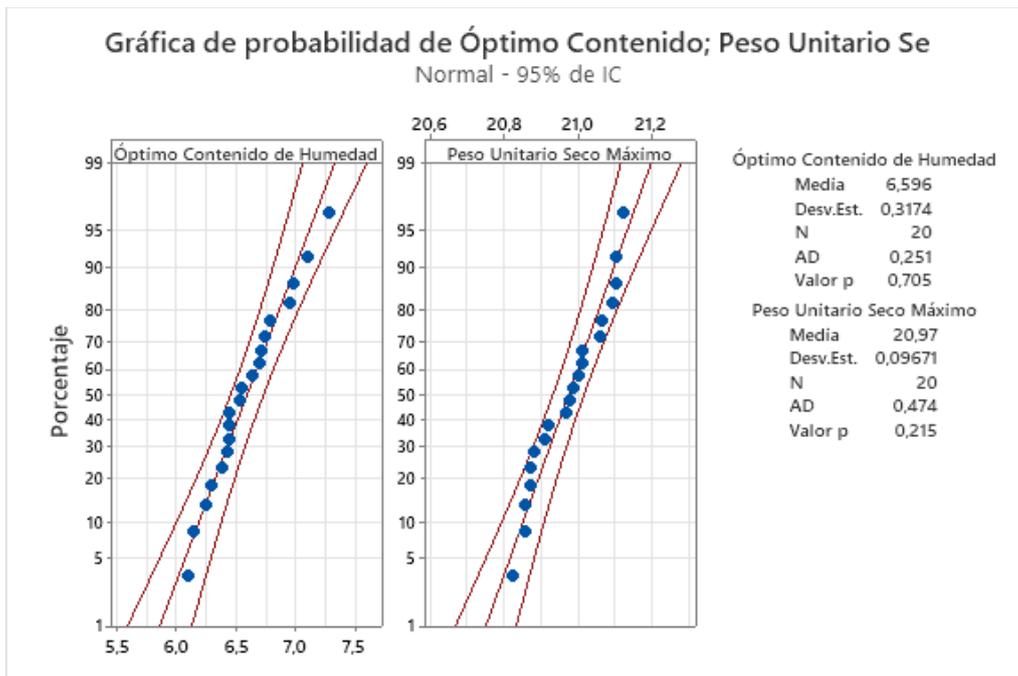


Gráfico 15. Prueba de normalidad de datos del Óptimo contenido de humedad y Peso unitarios seco máximo para el método de prueba de Proctor modificado

3.4.7. Resultados de la estimación de la incertidumbre de repetibilidad de los métodos de prueba

En las tablas 15, se muestran el resumen de los resultados de desviación estándar de repetibilidad, s_r ; desviación estándar de reproducibilidad, s_R ; y la incertidumbre de repetibilidad del método de prueba de análisis granulométrico por tamizado.

Tabla 15. Resumen de desviación estándar de repetibilidad, reproducibilidad e incertidumbre de repetibilidad para cada tamiz del método de análisis granulométrico por tamizado

Método de Prueba estándar	Tamices ASTM	s_r	s_R	$u(\text{rep})$
Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D6913/D6913M-17)	1 1/2 in.	0,8548	0,8548	0,27
	1 in.	2,0396	2,1255	0,64
	3/4 in.	1,7517	1,7517	0,55
	1/2 in.	1,7066	1,7066	0,54
	3/8 in.	1,7063	1,7063	0,54
	1/4 in.	1,4125	1,4125	0,45
	No. 4	1,2867	1,2867	0,41
	No. 10	0,8692	0,8692	0,27
	No. 20	0,6101	0,6128	0,19
	No. 40	0,4903	0,5150	0,16
	No. 60	0,4317	0,4439	0,14
No. 100	0,3483	0,3558	0,11	
No. 200	0,3183	0,3256	0,10	

En el gráfico 16, se puede observar cómo varía la incertidumbre de repetibilidad por cada tamaño de tamiz, esta variación va desde 0,1 %, en los tamices de menor abertura hasta 0,64 % en los tamices de mayor abertura.

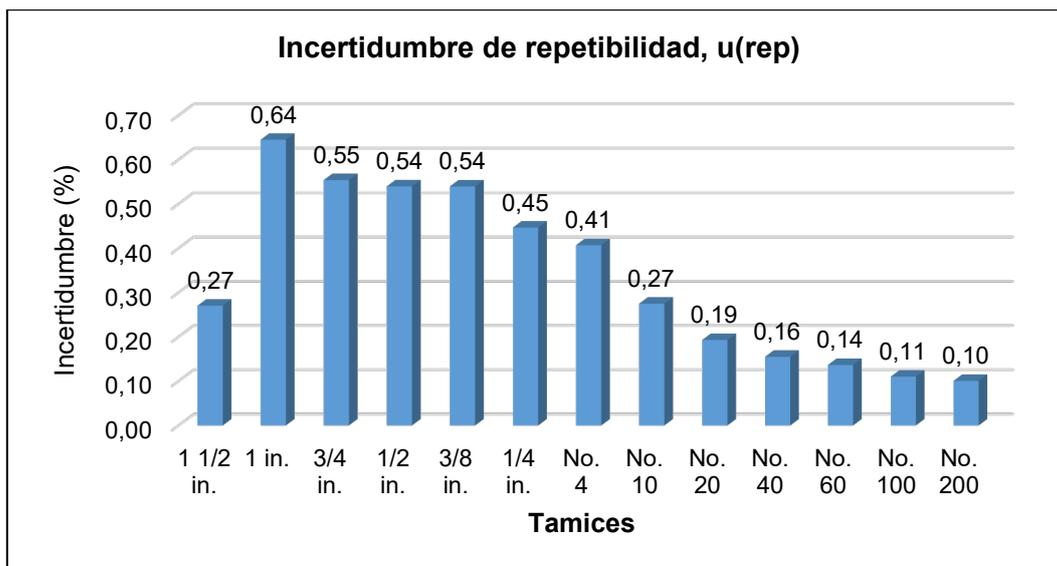


Gráfico 16. Variación de la incertidumbre de repetibilidad para el método de prueba estándar de análisis granulométrico por tamizado

En la tabla 16, se muestran el resumen de los resultados de desviación estándar de repetibilidad, sr; desviación estándar entre los técnicos, sL; desviación estándar de reproducibilidad, sR; y la incertidumbre de repetibilidad de los métodos de prueba evaluados de contenido de humedad, límites de Atterberg, gravedad específica de sólidos, Proctor estándar y Proctor modificado.

Tabla 16. Resultados de desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad, precisión de repetibilidad y reproducibilidad para cada método de prueba estándar

Método de Prueba Estándar		sr	sL	sR	u(rep)
Contenido de humedad	w	0,1464	0,0974	0,1758	0,046
Gravedad Especifica de Solidos	Gs	0,0038	0,0000	0,0063	0,002
Limite Liquido	LL	0,1018	0,0876	0,1343	0,032
Limite Plástico	LP	0,0983	0,1058	0,1444	0,031
Índice de plasticidad	IP	0,1211	0,1863	0,2222	0,038
Proctor Estándar	Wopt	0,1129	0,2916	0,3126	0,056
	yd,max	0,0361	0,0301	0,0470	0,018

Proctor Modificado	Wopt	0,1942	0,2737	0,3356	0,097
	yd,max	0,0460	0,0927	0,1035	0,023

Donde:

sr: Desviación estándar de repetibilidad

sL: Desviación estándar entre técnicos

sR: Desviación estándar de reproducibilidad

u(rep): Incertidumbre de repetibilidad

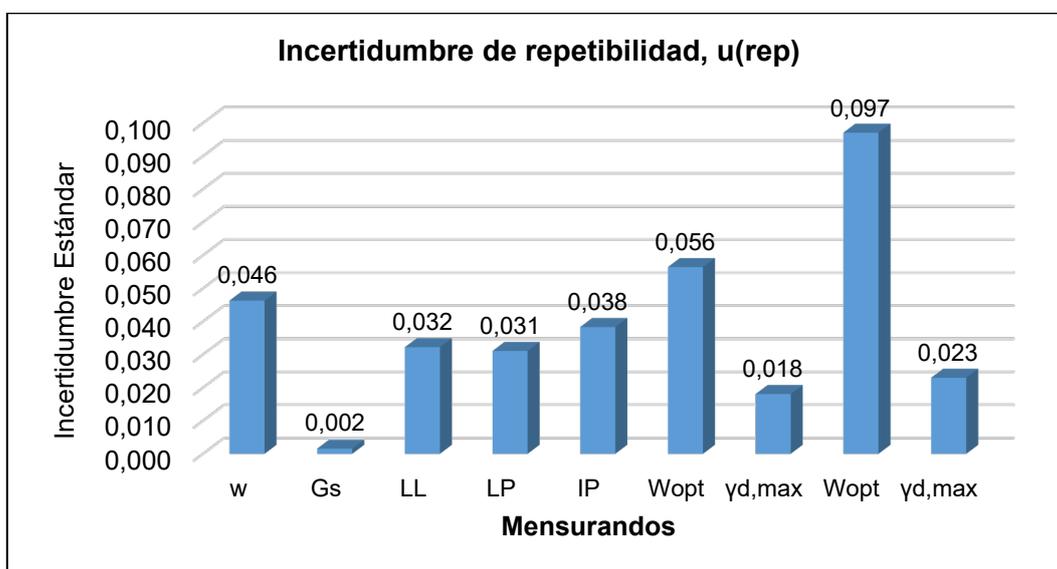


Gráfico 17. Incertidumbre de repetibilidad para cada método de prueba estándar evaluado

En el gráfico 17, se puede observar los resultados de la incertidumbre de repetibilidad de cada método de prueba estándar evaluado, se puede observar que la incertidumbre de repetibilidad para el contenido de humedad, método D2216 es 0,046%; la incertidumbre de repetibilidad para el método de gravedad específica de sólidos (D854) es 0,002 g/cm³; la incertidumbre de repetibilidad para el método de prueba de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad (D4318) es 0,032; 0,031% y 0,038% respectivamente. La incertidumbre de

repetibilidad del óptimo contenido de humedad para los métodos de prueba D698 y D1557 es 0,056% y 0,097% respectivamente. La incertidumbre de repetibilidad del peso unitario seco máximo de los métodos de prueba D698 y D1557 es 0,018 kN/m³ y 0,023 kN/m³ respectivamente.

3.5. Resultados de la estimación de la incertidumbre de medida

3.5.1. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de análisis granulométrico por tamizado

La tabla 17, muestra el resumen de los resultados de la incertidumbre estándar combinada $u(c)$, los grados de libertad efectivos (ν_{ef}), el valor k a un nivel de confianza del 95,45 % y la incertidumbre expandida (U) del porcentaje que pasa para cada tamiz del método evaluado.

Tabla 17. Resumen de resultados de incertidumbre estándar combinada $u(c)$ e incertidumbre expandida por cada tamiz

Tamices ASTM	Abertura (mm)	% que pasa	$u(c)$	ν_{ef}	k	Incertidumbre expandida U
1 1/2 in.	37,500	98,3	0,4	43,9	2,06	0,8
1 in.	25,000	85,3	0,6	60,5	2,04	1,2
3/4 in.	19,000	75,1	0,5	46,7	2,06	1,0
1/2 in.	12,500	62,1	0,5	36,7	2,07	1,0
3/8 in.	9,500	57,0	0,5	60,5	2,04	1,0
1/4 in.	6,300	46,2	0,4	43,9	2,06	0,8
No. 4	4,750	40,1	0,4	60,5	2,04	0,8
No. 10	2,360	27,1	0,3	96,9	2,03	0,6
No. 20	1,180	18,5	0,2	60,5	2,04	0,4
No. 40	0,600	13,8	0,2	125,4	2,02	0,4
No. 60	0,300	11,5	0,1	19,1	2,14	0,2
No. 100	0,106	7,4	0,1	19,1	2,14	0,2
No. 200	0,075	4,7	0,1	60,5	2,04	0,2

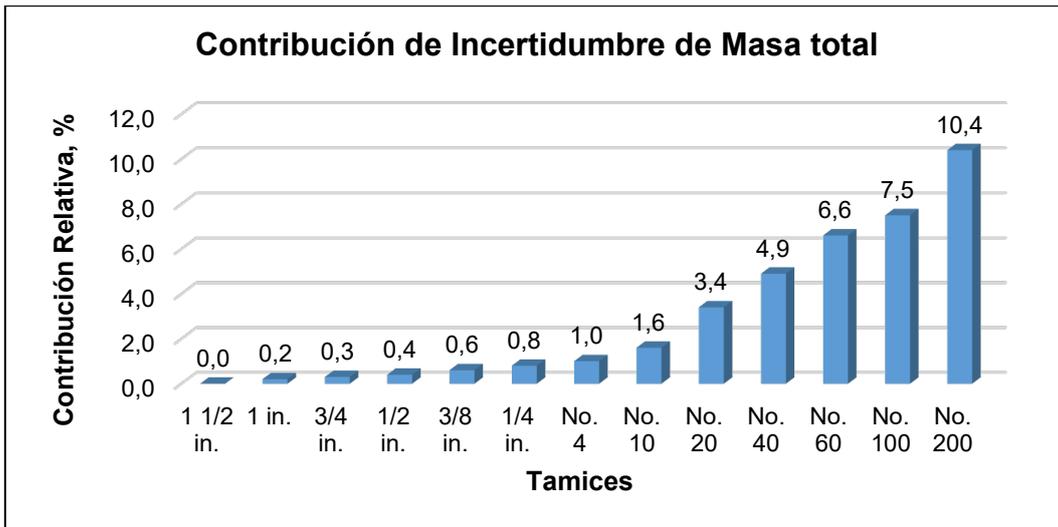


Gráfico 18. Contribución de incertidumbre de la masa total en la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa

En el grafico 18, se presenta la contribución relativa de incertidumbre de la masa total, en la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa en cada tamiz. La contribución es menor en los tamices de mayor abertura y es mayor en los tamices de menor abertura. El porcentaje de contribución varía del 0,0% hasta 10,0% de la incertidumbre de medida.

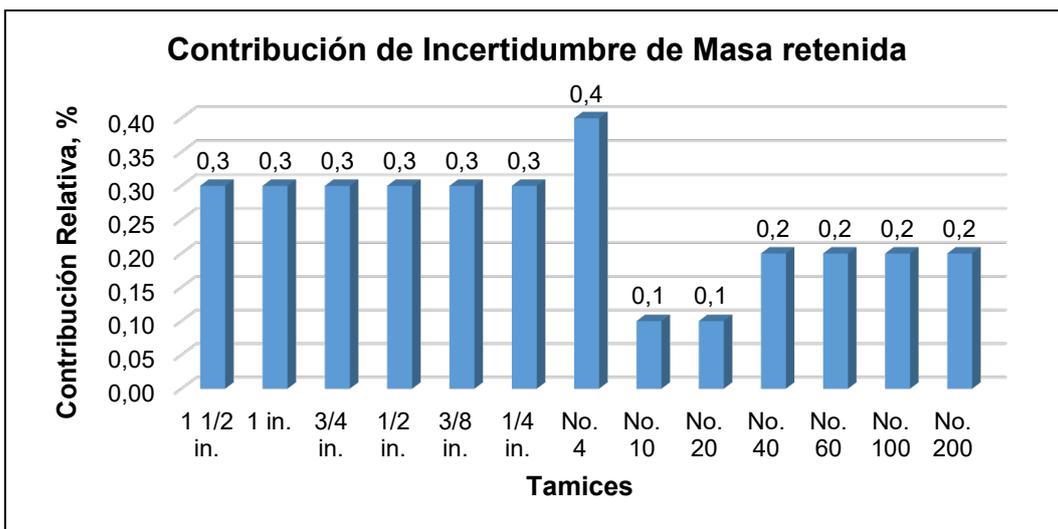


Gráfico 19. Contribución de incertidumbre de la masa retenida a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa.

En el gráfico 19, se presenta la contribución relativa de incertidumbre de la masa retenida en cada tamiz, que influye en la incertidumbre combinada. Se observa que la contribución de la incertidumbre de la masa retenida no es muy significativa en relación con las otras fuentes de incertidumbre ya que el aporte es del 0,1 % al 0,4 % de la incertidumbre de medida. Las mayores contribuciones están en los tamices de serie gruesa, pero que por sí sola no es muy significativa. Esta fuente de incertidumbre puede ser excluidas en la evaluación de la incertidumbre de medida del método debido a que no supera el 5%.

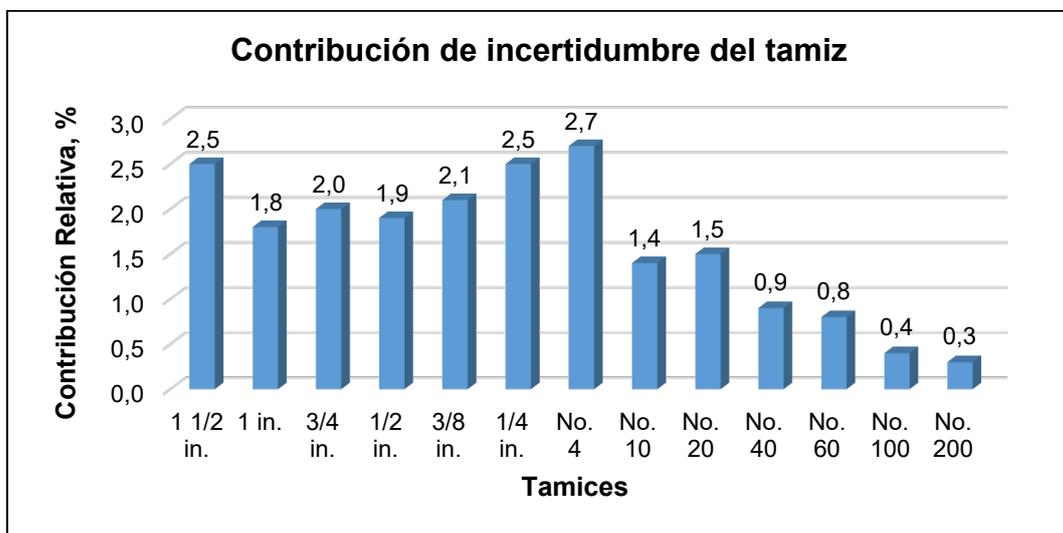


Gráfico 20. Contribución de incertidumbre del tamiz a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa

En el gráfico 20, se presenta la contribución de incertidumbre relativa del tamiz (calibración del tamiz) que aporta a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa en cada tamiz. Se observa que el porcentaje de contribución es mayor en los tamices de serie gruesa (mayor al tamiz No. 4) y menor en los tamices de serie fina (menores al tamiz No. 4). El porcentaje de contribución solo representa del 0,3 % al 2,7 % de la incertidumbre de medida.

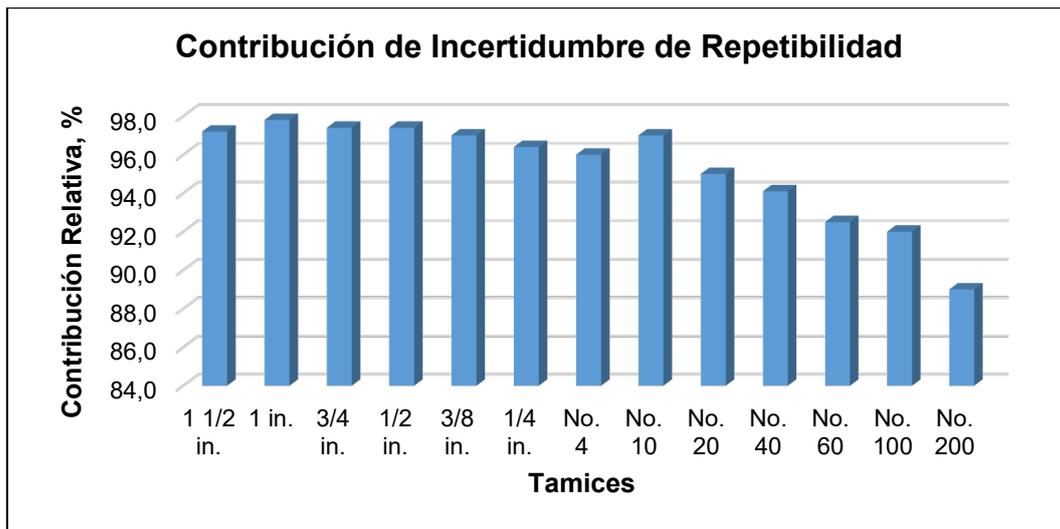


Gráfico 21. Contribución de incertidumbre de repetibilidad a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa

En el gráfico 21, se presentan la contribución relativa de incertidumbre de repetibilidad que aporta a la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa en cada tamiz. Se observa que el porcentaje de contribución varía desde el 89,0 % hasta el 98,0 % de la incertidumbre combinada u(c).

De los gráficos 18, 19, 20 y 21 se concluye que la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada del porcentaje que pasa es la repetibilidad del ensayo con un porcentaje de aporte que va desde el 89,0% hasta el 98,0%; seguida de la masa total con una contribución que va desde el 0,0% hasta el 10,0%. Las variables que pueden ser excluidas como fuentes de incertidumbre son la masa retenida y el tamiz, que en conjunto solo representan menos del 3,0%.

3.5.2. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de contenido de humedad

En la tabla 18, se presenta el presupuesto de la incertidumbre de medida del contenido de humedad con la contribución de cada fuente de incertidumbre que interviene en el proceso de medida.

Tabla 18. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de contenido de humedad

Presupuesto de Incertidumbre de medida para el contenido de humedad						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
Mc	84,10	0,015099	0,012731	3089,94	0,000192	0,4
Mcms	706,80	0,019603	0,172446	1649,58	0,003380	6,3
Mcds	663,99	0,019122	-0,185177	1718,05	0,003541	6,6
θ_{rep}	0,1464	0,046296	1	49,00	0,046296	86,7
Incertidumbre estándar combinada			u_c		0,05	
Grados de libertad efectivos			ν_{ef}		66,67	
Factor de cobertura			k		2,04	
Incertidumbre expandida			U		0,10	

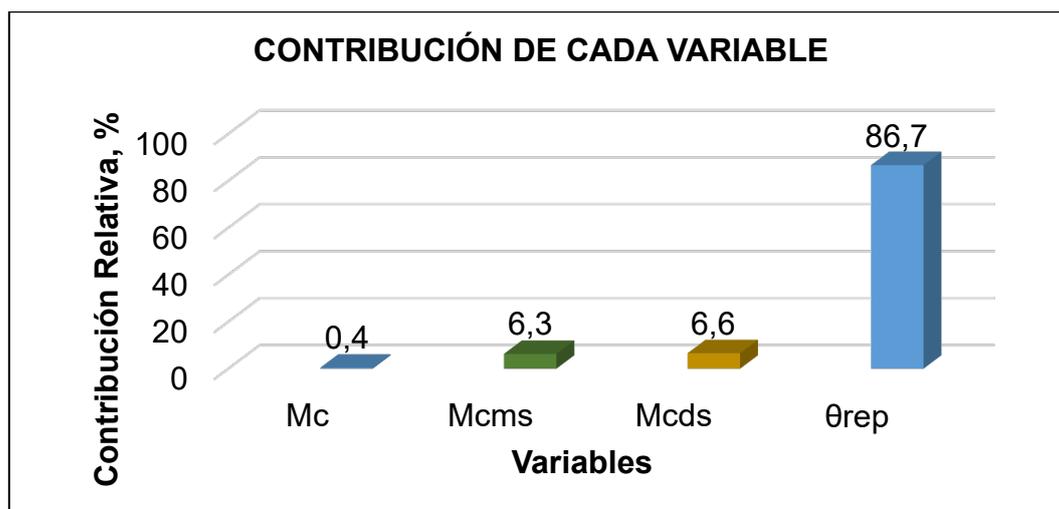


Gráfico 22. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del contenido de humedad.

En el gráfico 22, se muestran la contribución que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del contenido de humedad. En el gráfico 22, también se observa que la variable de mayor contribución a la incertidumbre es la repetibilidad del ensayo, que representa el 86,7 % de la incertidumbre combinada, le siguen las variables de masa del recipiente y muestra seca al horno (Mcds) y la masa del recipiente y muestra humedad (Mcms) con 6,6 % y 6,3 % respectivamente. La variable que menor incidencia tiene es la masa del recipiente (Mc) solo representa el 0,4 %; en estos casos cuando la contribución de la incertidumbre es menor del 5%, la contribución de la incertidumbre de la variable se puede eliminar o no considerar en el proceso de estimación de la incertidumbre combinada. Esta eliminación se debe a que los cálculos de la incertidumbre se realizan con un nivel de confianza del 95 %.

3.5.3. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad

En la tabla 19, se presenta el presupuesto de incertidumbre y resultados de incertidumbre combinada y expandida del ensayo de limite liquido (LL), también se muestra los coeficientes de sensibilidad, c_i ; los grados de libertad efectivos; ν_{ef} y la contribución de cada fuente de incertidumbre en la incertidumbre final del método de ensayo.

Tabla 19. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de límite líquido.

Presupuesto de Incertidumbre de Límite Líquido - LL						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coeficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
w	25,76	0,14159149	1	6207,85	0,141591	60,4
FR	-	0,06081185	1	2	0,060812	25,9
θ_{rep}	0,1018	0,03219199	1	49	0,032192	13,7

Incertidumbre combinada	u_c	0,2
Grados de libertad efectivos	v_{ef}	88,7
Factor de cobertura	k	1,99
Incertidumbre expandida	U	0,3

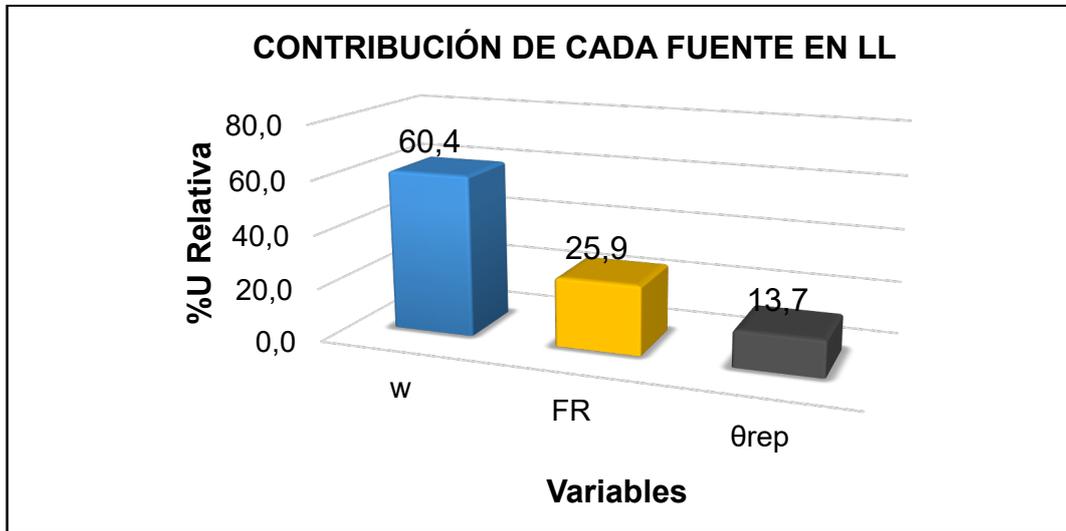


Gráfico 23. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del límite líquido

En el gráfico 23, se muestran la contribución que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del límite líquido (LL). En el gráfico, se puede observar que la variable de mayor contribución es la humedad del ensayo, que representa el 60,4 % de la incertidumbre combinada, le sigue la variable de la función de regresión (FR) con 25,9 % y la variable que menor contribución aporta es la repetibilidad (Rep) solo representa el 13,7 %.

En la tabla 20, se presenta el presupuesto y resultados de incertidumbre combinada y expandida del ensayo de índice de plasticidad (IP), también se muestra la contribución de cada fuente de incertidumbre en la incertidumbre final del método de ensayo.

Tabla 20. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de límite plástico.

Presupuesto de Incertidumbre para el Límite Plástico - LP						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
Mc	37,22	0,01503010	-2,05047395	3127,20	0,03081883	6,5
Mcms	46,36	0,01503292	12,70648030	3116,76	0,19101550	40,2
Mcds	45,09	0,01503249	14,75695426	3118,35	0,22183377	46,7
θ_{rep}	0,0983	0,03108519	1	49,0	0,03108519	6,5
Incertidumbre combinada			u_c		0,3	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		6276,1	
Factor de cobertura			k		1,96	
Incertidumbre expandida			U		0,6	

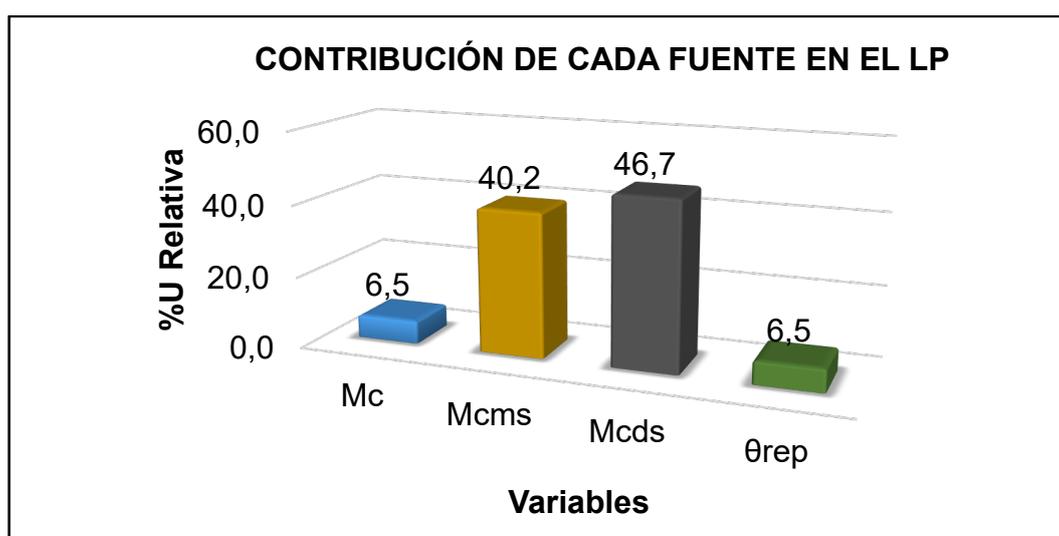


Gráfico 24. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del límite plástico.

En el gráfico 24, se muestran la contribución que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del límite plástico (LP). En el gráfico se puede observar que la variable de mayor contribución es la masa del recipiente y muestra seca (Mcds) del ensayo, que representa el 46,7 % de la incertidumbre combinada, le sigue la variable de la masa del recipiente y muestra húmeda (Mcms) con 40,2 % y finalmente están las variables de la

masa del recipiente (M_c) y repetibilidad (Rep) del ensayo con una contribución del 6,5 % cada una.

En la tabla 21, se presenta el presupuesto y resultados de incertidumbre combinada y expandida del ensayo de índice de plasticidad (IP), también se muestra la contribución de cada fuente de incertidumbre en la incertidumbre final del método de ensayo.

Tabla 21. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de Índice de plasticidad.

Presupuesto de Incertidumbre para el Índice de plasticidad - IP						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
LL	25,8	0,15742476	1	88,70	0,157424	33,2
LP	16,1	0,29599532	1	6276,11	0,295995	62,3
θ_{rep}	0,1211	0,03829518	1	49,0	0,038295	8,1
Incertidumbre combinada			u_c		0,3	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		988,8	
Factor de cobertura			k		1,96	
Incertidumbre expandida			U		0,6	

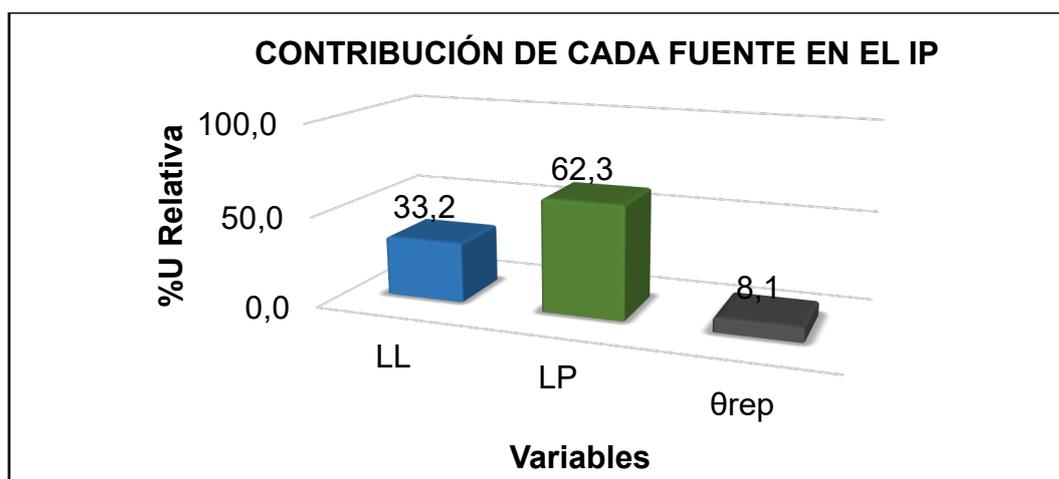


Gráfico 25. Contribución de cada variable a la incertidumbre combinada del índice de plasticidad.

En el gráfico 25, se muestran la contribución que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del índice de plasticidad (IP). En el gráfico se puede observar que la variable de mayor contribución es el límite plástico (LP) del ensayo, con una contribución del 62,3 % de la incertidumbre combinada, le sigue la variable de límite líquido (LL) con 33,2 % y finalmente está la variable de repetibilidad (Rep) del ensayo con una contribución del 8,1 %.

3.5.4. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de prueba de gravedad específica de sólidos

En la tabla 22, se presenta el presupuesto y la estimación de la incertidumbre combinada $u_c(y)$ y expandida U , de la gravedad específica de sólidos (G_s); también se muestra la contribución relativa de cada fuente de incertidumbre que interviene en el proceso de medida en la gravedad específica de sólidos. En la parte inferior de la tabla se muestran la incertidumbre expandida del método con los grados de libertad efectivos, v_{ef} , y el factor de cobertura, k al 95,45% de nivel de confianza.

Tabla 22. Presupuesto de incertidumbre de medida para el método de prueba de gravedad específica de sólidos

Presupuesto de Incertidumbre para la Gravedad Específica - G_s						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
Ms	107,78	0,01506783	-0,04039516	2992,24	0,000608	8,6
M_{pws,t}	770,08	0,01707588	0,06494187	775,10	0,001108	15,7
M_{pw,t}	703,04	0,05853627	-0,06494187	8,43	0,003801	53,8
θ_{rep}	0,0038	0,001551	1	29,00	0,001551	21,9
Incertidumbre combinada			u_c		0,004	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		10,25	
Factor de cobertura			k		2,23	
Incertidumbre expandida			U		0,01	

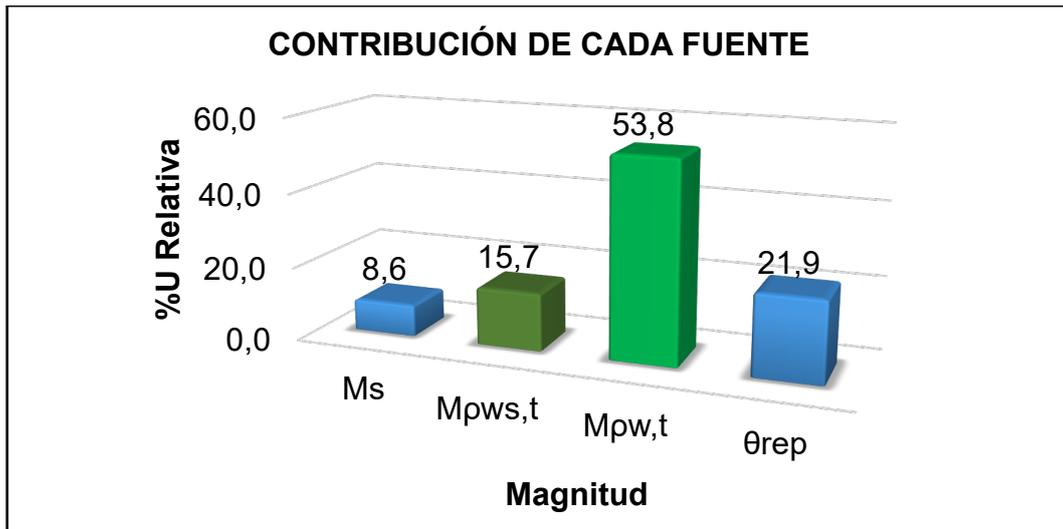


Gráfico 26. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada de la gravedad específica de sólidos.

En el gráfico 26, se muestran la contribución que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición de la gravedad específica de sólidos. También se puede observar que la variable que tiene mayor contribución a la incertidumbre de medida de la gravedad específica es la masa del matraz y agua a temperatura de ensayo ($M_{pw,t}$), con una contribución relativa del 53,8% esto es debido a que en la calibración del volumen del matraz se tiene una mayor dispersión de los datos de calibración. La segunda variable con mayor contribución relativa es la repetibilidad del método de ensayo (θ_{rep}) con 21,9%; le sigue la variable de la masa del matraz con agua y muestra seca al horno a temperatura de ensayo ($M_{pws,t}$) con 15,7% y finalmente está la variable de masa seca al horno de la muestra (M_s) con una contribución de 8,6%.

3.5.5. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de compactación con esfuerzo estándar

3.5.5.1. Estimación de la incertidumbre de medida del Peso unitario seco máximo (γ_d, \max)

En la tabla 23, se presenta el presupuesto y estimación de la incertidumbre combinada $u_c(\gamma)$ y expandida U , del peso unitario seco máximo (γ_d, \max). En la tabla también se presenta los coeficientes de sensibilidad, C_i , los grados de libertad efectivos, v_{ef} , y la contribución relativa de cada magnitud x_i que intervienen en el proceso de medición del peso unitario seco máximo. En la parte inferior de la tabla 24 se muestran la incertidumbre combinada, u_c , los grados de libertad efectivos, el factor de cobertura k al 95.45% de nivel de confianza y la incertidumbre expandida U .

Tabla 23. Presupuesto de incertidumbre de medida del peso unitario seco máximo, γ_d, \max .

Presupuesto de Incertidumbre para el Peso unitario seco máximo - γ_d, \max						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
γ_1	19,800	0,06588588	1014,5	1	0,065885	23,9
γ_2	20,220	0,06485617	986,0	1	0,064856	23,6
γ_3	20,160	0,06377225	974,5	1	0,063772	23,2
γ_4	19,780	0,06256041	974,8	1	0,062560	22,7
θ_{rep}	0,0361	0,018	19	1	0,018	6,6
Incertidumbre combinada			u_c		0,13	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		3797,9	
Factor de cobertura			k		2,00	
Incertidumbre expandida			U		0,26	

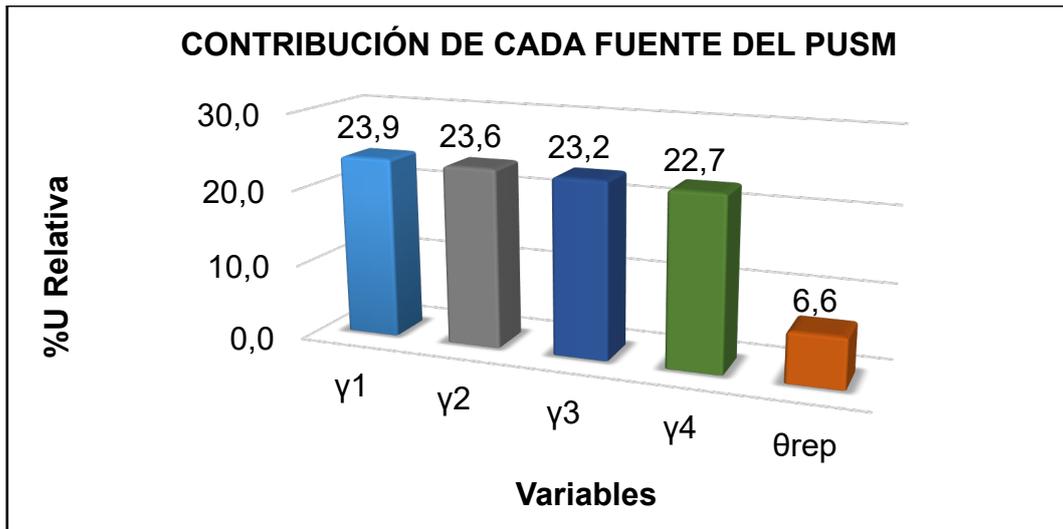


Gráfico 27. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.

En el gráfico 27, se muestran las contribuciones relativas que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del peso unitario seco máximo. Se puede observar que las variables que mayor contribución tienen en la incertidumbre combinada es el peso unitario seco de cada espécimen de ensayo y represente entre el 22,7% y 23,9% de la incertidumbre combinada; y lo sigue la variable de repetibilidad del método de ensayo con 6,6% de contribución relativa.

3.5.5.2. Estimación de la incertidumbre de medida del Óptimo contenido de humedad (W_{opt})

En la tabla 24, se presenta el presupuesto y estimación de la incertidumbre combinada, u_c , y expandida, U , para el óptimo contenido de humedad; también se presenta la contribución relativa de cada magnitud, x_i que contribuye en la incertidumbre combinada.

Tabla 24. Presupuesto de incertidumbre de medida del óptimo contenido de humedad, W_{opt} .

Presupuesto de incertidumbre del Óptimo contenido de humedad, W_{opt}						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	Grados de libertad efectivos	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
w1	4,6	0,00284975	925,4	1	0,002849	3,4
w2	6,7	0,00303398	1009,2	1	0,003034	3,6
w3	8,7	0,00301290	964,2	1	0,003013	3,6
w4	10,8	0,00312102	1018,7	1	0,003121	3,7
θ_{rep}	0,1429	0,0715	19	1	0,07145	85,6
Incertidumbre combinada			u_c		0,07	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		19,3	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,2	

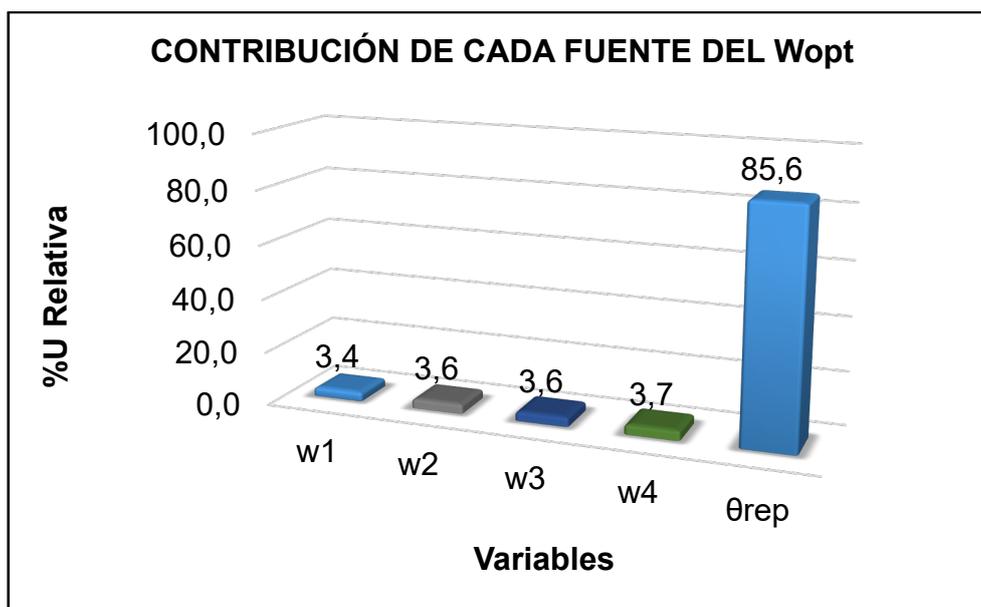


Gráfico 28. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.

En el gráfico 28, se muestran las contribuciones que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del óptimo contenido de humedad. También se observa que la variable que tiene mayor contribución a la incertidumbre combinada del óptimo contenido de humedad es

la repetibilidad del ensayo con un 82,4 % de contribución, este valor corresponde a la precisión de los técnicos del laboratorio y las variables que menor contribución aportan es la humedad de cada espécimen de ensayo que representa del 4,2% al 4,6%.

3.5.6. Estimación de la Incertidumbre de medida en el método de compactación con esfuerzo modificado

3.5.6.1. Estimación de la incertidumbre de medida Peso unitario seco máximo, $\gamma_{d,max}$ con esfuerzo modificado

En la tabla 25, se presenta el presupuesto y estimación de la incertidumbre combinada $u_c(y)$ y expandida U , del peso unitario seco máximo ($\gamma_{d,max}$). En la tabla también se presenta los coeficientes de sensibilidad, C_i , los grados de libertad efectivos, v_{ef} , y la contribución relativa de cada magnitud x_i que intervienen en el proceso de medición del peso unitario seco máximo.

Tabla 25. Presupuesto de incertidumbre de medida del peso unitario seco máximo, $\gamma_{d,max}$, con esfuerzo modificado

Presupuesto de incertidumbre para la medición del peso unitario seco máximo, γ_{max}						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
γ_1	20,600	0,066723	993,6	1	0,066723	23,5
γ_2	20,900	0,065635	969,2	1	0,065635	23,2
γ_3	20,860	0,064698	958,9	1	0,064698	22,8
γ_4	20,360	0,063374	961,5	1	0,063374	22,4
θ_{rep}	0,046	0,023	19	1	0,023	8,1
Incertidumbre combinada			u_c		0,13	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		3442,4	
Factor de cobertura			k		2,00	
Incertidumbre expandida			U		0,26	

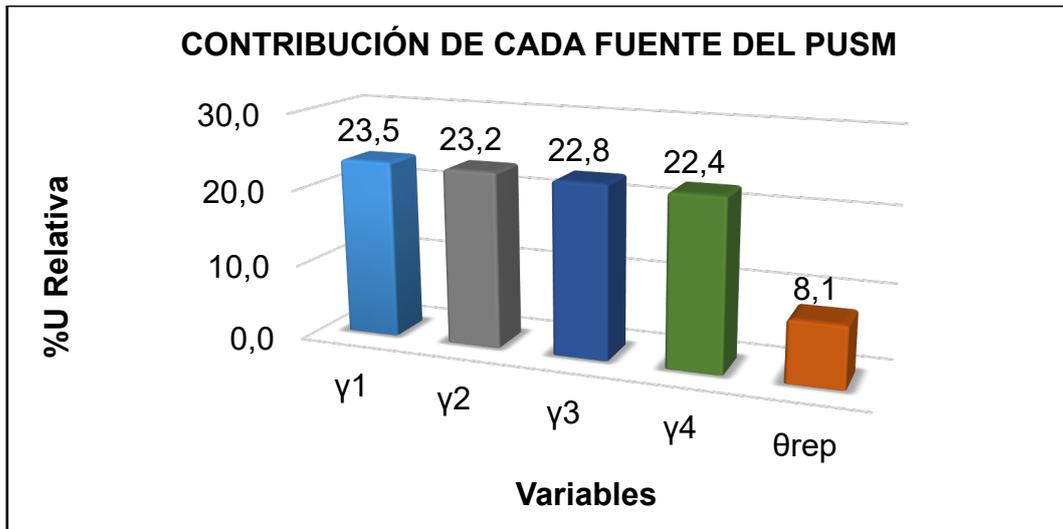


Gráfico 29. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.

En el gráfico 29, se muestran las contribuciones relativas que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del peso unitario seco máximo. Se puede observar que las variables con mayor influencia en la incertidumbre de medida combinada son el peso unitario seco de cada muestra de ensayo y representan del 22,4% al 23,5% de la incertidumbre combinada; y seguido está la repetibilidad del método de prueba con una contribución relativa 8,1%.

3.5.6.2. Estimación de la incertidumbre de medida del Óptimo contenido de humedad (W_{opt}), con esfuerzo modificado

En la tabla 26 se presenta el presupuesto y estimación de la incertidumbre combinada, u_c , y expandida, U , para el óptimo contenido de humedad; también se presenta la contribución relativa de cada magnitud, x_i que contribuye en la incertidumbre combinada.

Tabla 26. Presupuesto de incertidumbre de medida del óptimo contenido de humedad, W_{opt} , con esfuerzo modificado

Presupuesto de incertidumbre para la medición del Óptimo contenido de humedad (W_{opt})						
Magnitud, X_i	Estimación, x_i	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, C_i	$C_i \cdot u(x_i)$	Contribución Relativa (%)
w1	3,6	0,003317	1288,3	1	0,003317	3,0
w2	5,7	0,003319	1267,5	1	0,003319	3,0
w3	7,4	0,003601	1424,2	1	0,003601	3,2
w4	9,6	0,003565	1317,8	1	0,003565	3,2
θ_{rep}	0,1942	0,0971	19	1	0,0971	87,6
Incertidumbre combinada			u_c		0,1	
Grados de libertad efectivos			ν_{ef}		19,2	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,2	

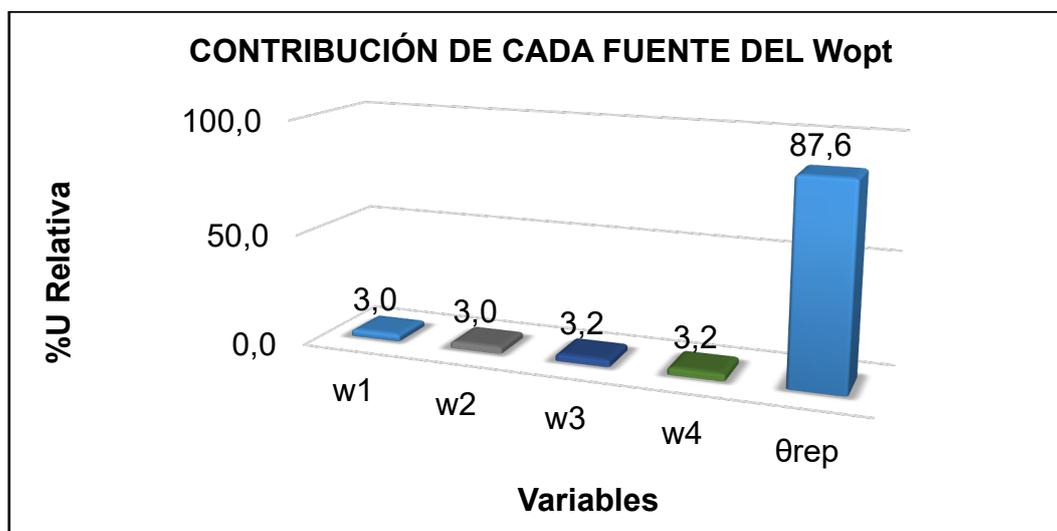


Gráfico 30. Contribución de cada variable de entrada a la incertidumbre combinada del peso unitario seco máximo.

En el gráfico 30, se muestran las contribuciones que tiene cada variable de entrada en la incertidumbre combinada $u_c(y)$ del proceso de medición del óptimo contenido de humedad. También se observa que la variable que tiene mayor contribución a la incertidumbre combinada del óptimo contenido de humedad es

la repetibilidad del ensayo con un 87,6 % de contribución, este valor corresponde a la precisión de los técnicos del laboratorio y las variables que menor contribución aportan es la humedad de cada espécimen de ensayo que representa del 3,0% al 3,2%.

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Método de análisis granulométrico por tamizado

Respecto a la incertidumbre de medida del método de ensayo de análisis granulométrico se pudo observar que la mayor fuente de incertidumbre es la repetibilidad del método, el porcentaje de contribución varía del 89,0 % al 98,0 % de la incertidumbre combinada, le sigue la masa total de la muestra ensayada con un porcentaje de contribución que va desde el 0,0% hasta el 10,0%. Estas variaciones dependen mucho de las aberturas de los tamices que se utilizan para separar las partículas y de la cantidad de material que se usa para realizar el ensayo. Por último, las variables que menor contribución tienen es la masa retenida en cada tamiz y la calibración del tamiz, que en conjunto solo representan menos del 3, 0% de la incertidumbre combinada.

La incertidumbre expandida, U , con un nivel de confianza del 95,45 % para el método de prueba estándar del análisis granulométrico por tamizado, varía desde 0,2% hasta 1,2%.

4.2. Método de contenido de humedad en suelos

Respecto a la incertidumbre de medida del método de ensayo de contenido de humedad en suelos, se pudo observar que la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre es la repetibilidad del ensayo que representa el 86,7% de la incertidumbre combinada, le siguen las variables de masa del recipiente y muestra seca al horno (M_{cds}) y la masa del recipiente y muestra humedad (M_{cms}) con 6,6 % y 6,3 % respectivamente. La variable que menor incidencia tiene es la masa del recipiente (M_c) solo representa el 0,4 %; en estos casos cuando la contribución de la incertidumbre es menor del 5%, la contribución de la incertidumbre de la variable se puede eliminar o no considerar en el proceso de estimación de la incertidumbre combinada. Esta eliminación se debe a que los cálculos de la incertidumbre se realizan con un nivel de confianza del 95 %.

La incertidumbre expandida, U , con un nivel de confianza del 95,45 % para el método es de 0,1%; este método de prueba no presenta datos de precisión, esto es debido a la naturaleza y diversidad de tipos de suelos, Según los ensayos de repetibilidad y reproducibilidad realizados, se ha obtenido una precisión de 0,5%. Si comparamos estos valores se observa que la incertidumbre es menor que la precisión del método de prueba estándar.

4.3. Método de límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad

Respecto a la incertidumbre de medida del método D4318, se observó que la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada para el límite líquido es el contenido de humedad, w , de cada punto de ensayo que representa el 60,4% y la variable que menor incidencia aporta a la incertidumbre combinada es la repetibilidad del ensayo con un porcentaje de 13,7%. La variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada para el límite plástico es la masa del recipiente y muestra seca, $M_{c ds}$, que representa el 46,7% y la variable que menor incidencia aporta a la incertidumbre combinada es la repetibilidad del ensayo y la masa del recipiente con un porcentaje de 6,5%. La variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada para el índice de plasticidad es el límite líquido, que representa el 62,3% y la variable que menor incidencia aporta a la incertidumbre combinada es la repetibilidad del ensayo con un porcentaje de 8,1%.

La incertidumbre expandida, U , con un nivel de confianza del 95,45 % para el límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) es 0,4 %, 0,6 % y 0,6 % respectivamente. La precisión del método según D4318 es de 1,0% para el LL, LP e IP; por lo tanto, la incertidumbre de medida es menor que la precisión del método de prueba estándar.

4.4. Método de gravedad específica de sólidos

Respecto a la incertidumbre de medida del método de ensayo de gravedad específica de sólidos D854, la variable que mayor contribución tiene en la

incertidumbre es la masa del matraz y agua a temperatura de ensayo, $M_{pw,t}$ con una contribución relativa del 53,8% esto es debido a que en la calibración del volumen del matraz se tiene una mayor dispersión de los datos de calibración. La segunda variable con mayor contribución relativa es la repetibilidad del método de ensayo (Rep) con 21,9%; le sigue la variable de la masa del matraz con agua y muestra seca al horno a temperatura de ensayo ($M_{pws,t}$) con 15,7% y finalmente está la variable de masa seca al horno de la muestra (M_s) con una contribución de 8,6%.

La incertidumbre expandida, U , con un nivel de confianza del 95,45 % es de 0,01 g/cm³, y la precisión según el método D854 es de 0,02 g/cm³, por lo tanto, la incertidumbre de medida es menor a la precisión del método de prueba estándar.

4.5. Método de compactación con esfuerzo estándar y esfuerzo modificado

Respecto a la incertidumbre de medida del método de ensayo D698 y D1557, se pudo observar que la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada para el peso unitario seco máximo, γ_{max} , es el peso unitario seco, γ , y representa el 23,0% para ambos métodos y la variable que menor incidencia aporta es la repetibilidad del ensayo con una contribución del 8,1% para el método D1557 y 6,6% para el método D698. Además, la variable que mayor contribución tiene en la incertidumbre combinada para el óptimo contenido de humedad, W_{max} , es la repetibilidad del ensayo y representa el 82,4% para el método D698 y 87,6% para el método D1557 y la variable que menor incidencia aporta es la humedad de cada especimen de ensayo, con un porcentaje menor al 5,0% en ambos métodos.

El valor de la incertidumbre expandida, U , con un nivel de confianza del 95,45 % del peso unitario seco máximo, γ_{max} , es de 0,26 kN/m³; y del óptimo contenido de humedad, W_{max} , es de 0,2% para ambos métodos de prueba estándar. La precisión del peso unitario seco máximo, γ_{max} es 1,3 kN/m³ y 1,9 kN/m³ para el método D698 y D1557 respectivamente; mientras que, para el óptimo contenido de humedad, W_{opt} , es de 0,9% y 1,0% en los métodos D698 y D1557

respectivamente; por lo tanto, la incertidumbre de medida es menor que la precisión del método de prueba estándar.

En la tabla 27, se presenta el resumen general de la incertidumbre de medida de los métodos de prueba estándar evaluados en el proyecto de investigación. Además se presenta la precisión de cada uno de los métodos indicados en cada una de las normas de referencia.

Tabla 27. Resumen general de la incertidumbre de media de los métodos de prueba estándar y precisión de ensayo

Método de ensayo		Resultado de ensayo	Incert. combinada $u(c)$	Factor de cobertura k	Incert. Expandida U	Precisión del Método
Contenido de humedad	w (%)	7,5	0,05	2	0,1	1,0
Gravedad específica de sólidos	Gs (g/cm ³)	2,65	0,004	2	0,01	0,02
Límite líquido	LL (%)	25,8	0,2	2	0,4	1,0
Límite plástico	LP (%)	16,1	0,3	2	0,6	1,0
Índice plástico	IP (%)	9,7	0,30	2	0,6	1,0
Proctor estándar	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	20,24	0,13	2	0,26	1,30
	Wmax (%)	7,4	0,06	2	0,1	0,9
Proctor modificado	$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	20,92	0,13	2	0,26	1,80
	Wmax (%)	6,3	0,1	2	0,2	1,0

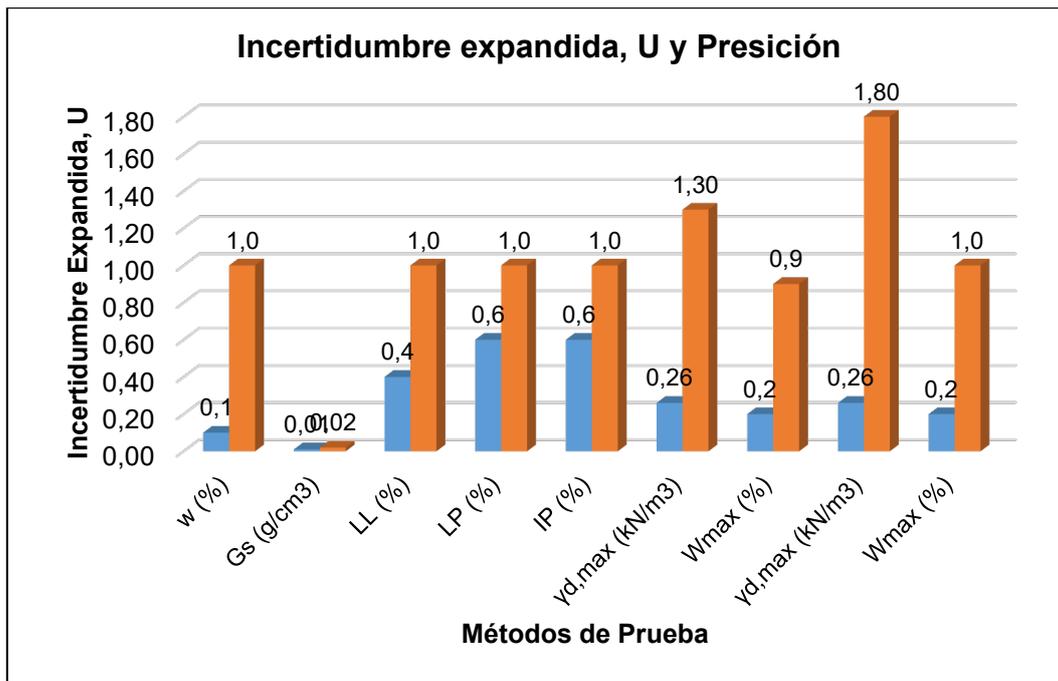


Gráfico 31. Comparación de la incertidumbre de medida, U con la precisión de cada método de prueba estándar.

En el gráfico 31, se puede observar que la incertidumbre expandida, U, de los métodos de prueba estándar evaluados es menor que la precisión del método, esto significa que los resultados son confiables y garantizan el aseguramiento de la calidad de los resultados reportados.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La incertidumbre de medida de los métodos de prueba estándar evaluados está por debajo de la precisión del método indicado en las normas ASTM de referencia, esto garantiza la confiabilidad y el aseguramiento de la calidad de los resultados emitidos por el laboratorio.
- La mayor fuente de contribución a la incertidumbre estándar se origina en la incertidumbre asociada al proceso de medición (repetibilidad). Es importante destacar que esta incertidumbre puede variar según el método de prueba empleado. Sin embargo, es relevante señalar que esta variación no tiene un impacto significativo en los resultados, ya que el laboratorio dispone de un sólido procedimiento para la ejecución de los ensayos y cuenta con la experiencia de analistas que siguen meticulosamente dicho procedimiento.
- La variable que presenta la mayor influencia en la incertidumbre de medida en los métodos de prueba estándar D6913/D6913M y D2216 es la repetibilidad del método, con un rango que oscila entre el 82,8% y el 98,0%. En el caso del método D854, la variable que más contribuye es la masa del matraz con agua ($M_{pw,t}$), con una contribución del 53,8%. En cuanto al método D4318, la variable predominante es el contenido de humedad (w) en cada punto de ensayo, con una contribución del 60,4%. Y en los métodos D698 y D1557, la variable preponderante es el peso unitario seco (γ), con una contribución del 91,9%.
- La incertidumbre expandida (U) con un nivel de confianza del 95,45% varía según el método aplicado. En el caso del método D6913/D6913M, oscila entre el 0,2% y el 1,2%. Para el método de prueba D2216, la

incertidumbre es del 0,1%. En el método D4818, la incertidumbre es del 0,3% en el límite líquido (LL) y del 0,6% en el límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP). En cuanto al método D854, la incertidumbre es de 0,01 g/cm³. Y en los métodos D698 y D1557, la incertidumbre es de 0,26 kN/m³ en el peso unitario seco máximo (γ_d , max) y del 0,2% en el óptimo contenido de humedad (W_{opt}).

5.2. Recomendaciones

- Recomendamos seguir investigando en estos temas, considerando las distintas propiedades y tipos de suelos y agregados para poder tener un mejor nivel de conocimiento de la incertidumbre de medida de métodos estándar aplicados a la mecánica de suelos.
- Se recomienda estimar la incertidumbre de medida mediante el método de Monte Carlo, validar los resultados obtenidos mediante la GUM y comparar qué método da la menor incertidumbre de medida.
- Para garantizar la precisión de los equipos de medición, se recomienda implementar protocolos de calibración y mantenimiento periódico. Esto ayudará a minimizar las contribuciones de incertidumbre relacionadas con los instrumentos utilizados.
- Dado que la estimación de incertidumbre es un proceso en constante evolución, se recomienda establecer un plan para la actualización continua de los procedimientos y la revisión de los métodos en función de los resultados obtenidos y cualquier cambio normativo. Además, se recomienda realizar pruebas de repetibilidad y reproducibilidad cada un año para verificar que las variaciones de incertidumbre siempre se mantengan en los rangos establecidos en los procedimientos de medición del laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2022. Form and Style for ASTM Standards. Estados Unidos.
2. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2017. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis. Norma ASTM D6913/D6913M-17. Estados Unidos. 15 feb, 2021. 34 p.
3. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2019. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. Norma ASTM D2216-19. Estados Unidos. 19 mars. 7 p.
4. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2017. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. Norma ASTM D4318-17. Estados Unidos. 17 abr, 2018. 20 p.
5. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. Norma ASTM D854-14. Estados Unidos. 27 dic, 2016. 8 p.
6. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m^{3- 7. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2021. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³}

8. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2014. Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods. Norma ASTM E177 – 14. Estados Unidos. 17 dic, 2019. 9 p.
9. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2019. Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. Norma ASTM E691 – 19. Estados Unidos. 23 abr, 2020. 26 p.
10. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2022. Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Test Program to Determine the Precision of Test Methods for Construction Materials. Norma ASTM C802 – 14 (2022). Estados Unidos. 12 oct, 2022. 24 p.
11. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2020. Standard Guide for Reporting Uncertainty of Test Results and Use of the Term Measurement Uncertainty in ASTM Test Methods. Norma ASTM E2655 – 14(2020). Estados Unidos. 07 feb, 2020. 7 p.
12. CEM (Centro Español de Metrología). 2012. Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). JCGM 200: 2012. 3° Edición en español. Traducción de la 3° edición del VIM 2008. Madrid, España. 88 p.
13. CEM (Centro Español de Metrología). 2008. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. JCGM 100: 2008. 3ª edición en español. Madrid, España. Sept. 142 p.
14. Castaño, A; Valencia, S. 2015. Cálculo de la incertidumbre en la medición para los ensayos de alcalinidad, conductividad y nitritos por fotometría visible de acuerdo con la GTC 51. Tesis de Pregrado. Pereira, Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. 82 p.

15. Cuello Mejía, DA. 2015. Metodología para la estimación de incertidumbre de medición en la calibración en un laboratorio de metrología. Tesis de Pregrado. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 66 p.
16. EURACHEM/CITAC. 2012. Cuantificación de la Incertidumbre en Medidas Analíticas. Guía CG 4 EURACHEM / CITAC. QUAM: 2012.P1-ES. 1era edición. España. 144 p.
17. Espinosa Lloréns, Ma. del C.; Hernández, Y. León; Correa Senciales, O.; Álvarez Llaguno, Y.; Rodríguez Petit, X.; Gutiérrez Navarrete, J.; Martín Viaña, E.; Mayarí Navarro, R. 2009. Resultados en la estimación de la incertidumbre de la medición en ensayos de aguas residuales. Revista Cubana de Química, XXI (1), 58-67.
18. García Pisco, EG. 2018. Estimación y validación de la incertidumbre en el método de ensayo a compresión del concreto en estructuras de f_c 280 kg/cm² obtenidas a edades de 3 y 28 días. Tesis de Pregrado. Lima, Perú. Universidad Cesar Vallejo. 157p.
19. ISO/IEC (International Organization for Standardization / International Electrotechnical Commission). 2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). ISO/IEC GUIDE 98-3:2008 (E). First edition. Suiza. 130 p.
20. ISO (International Organization for Standardization). 2015. Sistemas de gestión de la calidad – Fundamentos y vocabulario. Norma ISO 9000: 2015 (traducción oficial). Cuarta edición. Suiza. 15 sept. 60 p.
21. INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo). 2016. CR-09/2015. Determinación de la incertidumbre de medida de agentes químicos. Utilización de los resultados de participación en programas de ensayo de aptitud en la estimación de la incertidumbre de medida de un procedimiento analítico. Madrid, España. 17 p.

22. J. J. Cárdenas, A. F. Ramírez, y E. Delgado. 2018. Evaluación y aplicación de la incertidumbre de medición en la determinación de las emisiones de fuentes fijas: una revisión. *Tecnológicas*. Colombia. XXI (42), 231-244.
23. Jiménez Hernández, JL. 2016. Cálculo de la Incertidumbre de un recipiente volumétrico de vidrio usando el método gravimétrico de acuerdo con la “Guía para la expresión de la incertidumbre de la medición” (GUM). Tesis de Pregrado. Ciudad de México, México. Instituto Politécnico Nacional. 127 p.
24. Llamosa, L., Gómez, J.; Ramírez, A. 2009. Metodología para la estimación de la incertidumbre en mediciones directas. *Scientia et Technica*, XV (41), 384-390.
25. Marín Pérez, JD. 2017. Estimación de la incertidumbre en el proceso de calibración de una micropipeta mediante la guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Tesis de Pregrado. Ciudad de México, México. Instituto Politécnico Nacional. 111 p.
26. Marín Pérez, JD. 2017. Estimación de la incertidumbre en el proceso de calibración de una micropipeta mediante la guía para la expresión de la incertidumbre de medida (GUM). Tesis de Pregrado. Ciudad de México, México. Instituto Politécnico Nacional. 111 p.
27. NTP (Norma Técnica Peruana). 2017. Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Norma NTP-ISO/IEC 17025: 2017. 3° Edición. Lima, Perú. 27 dic. 60 p.
28. Núñez Cruz, RG. 2017. Validación de métodos de ensayo para la determinación de compuestos fenólicos y turbidez en agua para el laboratorio de la refinería Esmeraldas. Tesis de Pregrado. Quito, Ecuador. Universidad Central del Ecuador. 139p.

29. Portuondo, Y; Portuondo, J. 2010. La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición. Revista Tecnología Química. Santiago de Cuba, Cuba. XXX (2), 117 – 121.
30. Quispe Rondan, K. 2019. Estimación de la incertidumbre en la determinación de humedad, ceniza, grasa y proteína en mezcla de harinas (alimento de reconstitución instantánea). Tesis de Pregrado. Cusco, Perú. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. 132p.
31. Roca Rado, AP. 2017. Estimación de la Incertidumbre de los equipos del laboratorio de materiales UCSM para el servicio de pruebas de calidad externa. Tesis de Pregrado. Arequipa, Perú. Universidad Católica de Santa María. 334p.
32. Salazar Cortez, SA. 2018. Estimación de Incertidumbre de Medida para Mensurandos del Laboratorio de Bioquímica del INEN 2016. Tesis de Pregrado. Lima, Perú. Universidad Nacional Federico Villarreal. 101p.
33. Sánchez Gavidia, ME. 2010. Incertidumbre de los resultados medidos en el ensayo de tracción, obtenidos en las máquinas del laboratorio de materiales de ing. mecánica PUCP. Tesis de Pregrado. Lima, Perú. Pontificia Universidad Católica del Perú. 106 p.
34. Ávila Garces W.; Arada Pérez CM; Hechavarría Hernández A. 2018. Estimación de la Incertidumbre de medida en ensayos por Espectrometría de Emisión Óptica en aceros al carbono y de baja aleación. Revista Afinidad. Cuba. LXXV, 584, 290 – 295.

ANEXOS

ANEXO.1. PANEL FOTOGRÁFICO



Imagen 1. Mezclado de la muestra de suelo con maquinaria



Imagen 2. Obtención de las muestras de suelo en la cantera



Imagen 3. Ensayo de análisis granulométrico



Imagen 4. Secado de muestras de granulometría



Imagen 5. Ensayo de contenido de humedad



Imagen 6. Ensayo de limite liquido



Imagen 7. Ensayo de limite líquido y limite plástico



Imagen 8. Ensayo de gravedad específica de solidos

ANEXO.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LOS METODOS DE PRUEBA

ANEXO 2.A. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de análisis granulométrico por tamizado: ASTM D6913/D6913M-17

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D6913/D6913M - 17)														
Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis ¹														
DATOS GENERALES														
Tesis	:	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicañ SAC de Cajamarca												
Tesista	:	Villy Beiner Núñez Mejía												
Asesor	:	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez												
Material	:	Base granular												
Procedencia	:	Acopio de agregados Lift 12 La Quinua												
Técnico	:	Técnico 1												
FECHAS														
Muestreo		Recepción		Inicio de Ensayo		Fin de Ensayo		Informe						
2023-01-12		2023-01-16		2023-01-16		2023-01-19		2023-02-23						
CUADRO RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO (ASTM D6913/D6913M - 17)														
Tamices ASTM	Abertura (mm)	E - 01	E - 02	E - 03	E - 04	E - 05	E - 06	E - 07	E - 08	E - 09	E - 10	% Pasa Promedio	Ds	
		% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa			
3 in.	75,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000	
2 1/2 in.	65,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000	
2 in.	50,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000	
1 1/2 in.	37,500	97,9	97,7	98,2	96,5	96,9	96,9	97,7	96,3	97,7	98,6	97,44	0,753	
1 in.	25,000	89,9	90,2	85,1	87,3	87,8	88,9	85,9	86,6	84,5	86,0	87,22	1,965	
3/4 in.	19,000	79,6	75,7	78,9	76,9	76,5	75,1	75,1	77,1	77,8	77,5	77,02	1,507	
1/2 in.	12,500	63,3	62,0	65,6	60,5	63,5	60,8	65,6	62,5	65,7	62,9	63,24	1,913	
3/8 in.	9,500	59,8	54,2	57,6	56,0	53,4	54,3	54,9	53,4	54,8	56,2	55,46	2,012	
1/4 in.	6,300	46,5	46,6	44,2	48,0	44,5	46,6	47,1	46,9	46,9	47,6	46,49	1,222	
No. 4	4,750	43,9	40,1	40,3	40,3	40,9	40,9	39,5	42,4	38,7	40,7	40,77	1,464	
No. 10	2,000	29,6	27,3	27,2	27,2	27,7	28,0	27,0	28,7	26,2	27,7	27,66	0,948	
No. 20	0,850	20,2	18,9	18,6	18,5	19,0	19,4	18,8	19,7	18,0	19,1	19,02	0,629	
No. 40	0,425	15,1	14,3	13,9	13,8	14,3	14,8	14,3	14,7	13,5	14,5	14,32	0,487	
No. 60	0,250	12,6	12,0	11,6	11,5	11,9	12,5	12,1	12,3	11,3	12,2	12	0,429	
No. 100	0,150	8,1	8,0	7,5	7,3	7,8	8,4	8,2	8,0	7,4	8,1	7,88	0,368	
No. 200	0,075	5,1	5,3	4,8	4,6	5,0	5,8	5,6	5,2	4,8	5,4	5,16	0,378	
CLASIFICACIÓN SUCS ASTM D2487 - 17						GW-GM - Well - gradel gravel with silt and sand						-		
GRÁFICA														
<p style="text-align: center;">CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA</p> <p style="text-align: center;">% QUE PASA</p> <p style="text-align: center;">DIÁMETRO DE PARTÍCULAS (mm)</p> <p style="text-align: center;"> ● E-01 ● E-02 ● E-03 ● E-04 ● E-05 ● E-06 ● E-07 ● E-08 ● E-09 ● E-10 </p>														

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis¹

DATOS GENERALES

Tesis	: Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista	: Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor	: Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material	: Base granular
Procedencia	: Acopio de agregados Lift 12 La Quinua

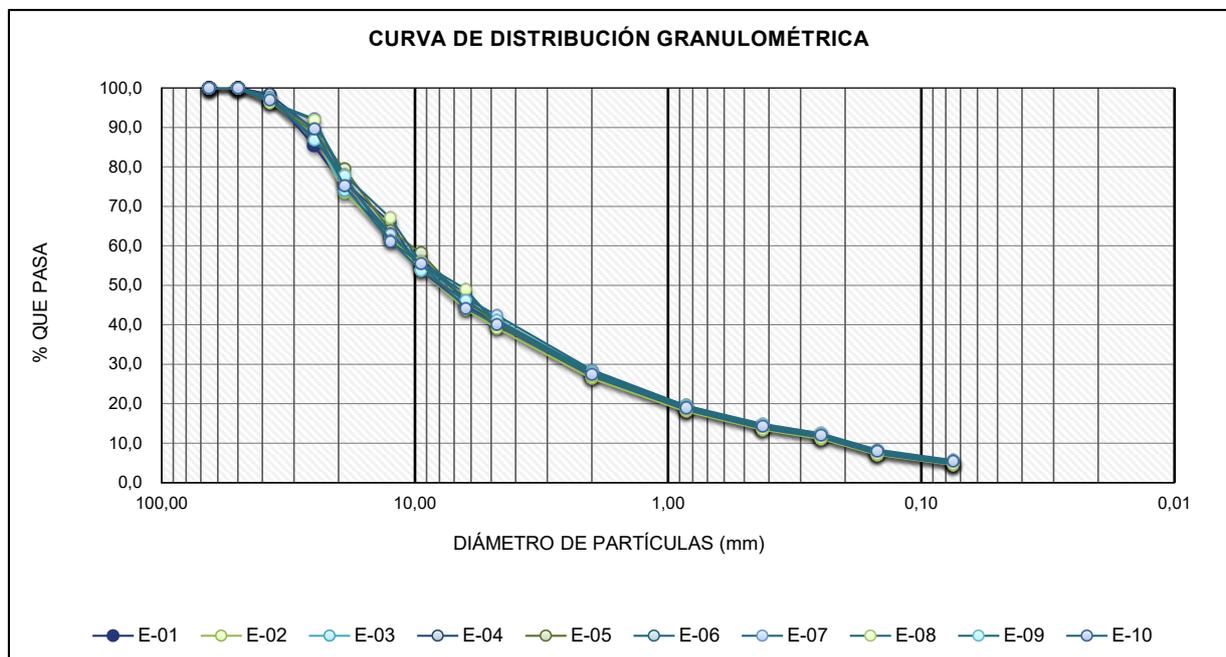
FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-01-12	2023-01-16	2023-01-20	2023-01-24	2023-02-23

**CUADRO RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Tamices ASTM	Abertura (mm)	E - 01	E - 02	E - 03	E - 04	E - 05	E - 06	E - 07	E - 08	E - 09	E - 10	% Pasa Promedio	Ds
		% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa		
3 in.	75,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 1/2 in.	65,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 in.	50,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
1 1/2 in.	37,500	98,3	97,1	96,6	98,4	96,5	97,5	96,5	96,4	97,4	97,1	97,18	0,728
1 in.	25,000	85,3	88,3	88,6	89,4	88,9	87,4	92,2	91,8	86,9	89,7	88,85	2,104
3/4 in.	19,000	75,1	73,4	74,1	76,2	79,5	76,7	76,8	78,0	77,7	75,2	76,27	1,868
1/2 in.	12,500	62,1	62,3	64,3	65,9	63,9	63,2	62,8	67,1	61,3	61,1	63,4	1,944
3/8 in.	9,500	57,0	54,0	55,5	53,8	58,3	55,6	55,7	55,9	53,9	55,6	55,53	1,414
1/4 in.	6,300	46,2	44,0	44,7	44,8	46,2	47,9	46,7	49,0	46,1	44,2	45,98	1,618
No. 4	4,750	40,1	39,1	41,5	40,5	40,3	41,1	42,4	40,0	41,2	40,1	40,63	0,935
No. 10	2,000	27,1	26,4	28,2	27,5	27,4	27,8	28,6	27,0	28,1	27,4	27,55	0,647
No. 20	0,850	18,5	18,0	19,4	18,9	18,9	19,0	19,5	18,4	19,5	19,0	18,91	0,495
No. 40	0,425	13,8	13,4	14,6	14,2	14,3	14,3	14,5	13,7	14,9	14,4	14,21	0,453
No. 60	0,250	11,5	11,1	12,3	11,9	12,0	11,9	12,1	11,4	12,5	12,1	11,88	0,429
No. 100	0,150	7,4	7,1	8,1	7,8	7,9	7,7	7,8	7,3	8,4	8,1	7,76	0,401
No. 200	0,075	4,7	4,5	5,3	5,1	5,3	5,0	4,9	4,6	5,7	5,5	5,06	0,395
CLASIFICACIÓN SUCS ASTM D2487 - 17					GW - Well - graded gravel with sand							-	

GRÁFICA



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis¹

DATOS GENERALES

Tesis	: Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista	: Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor	: Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material	: Base granular
Procedencia	: Acopio de agregados Lift 12 La Quinua

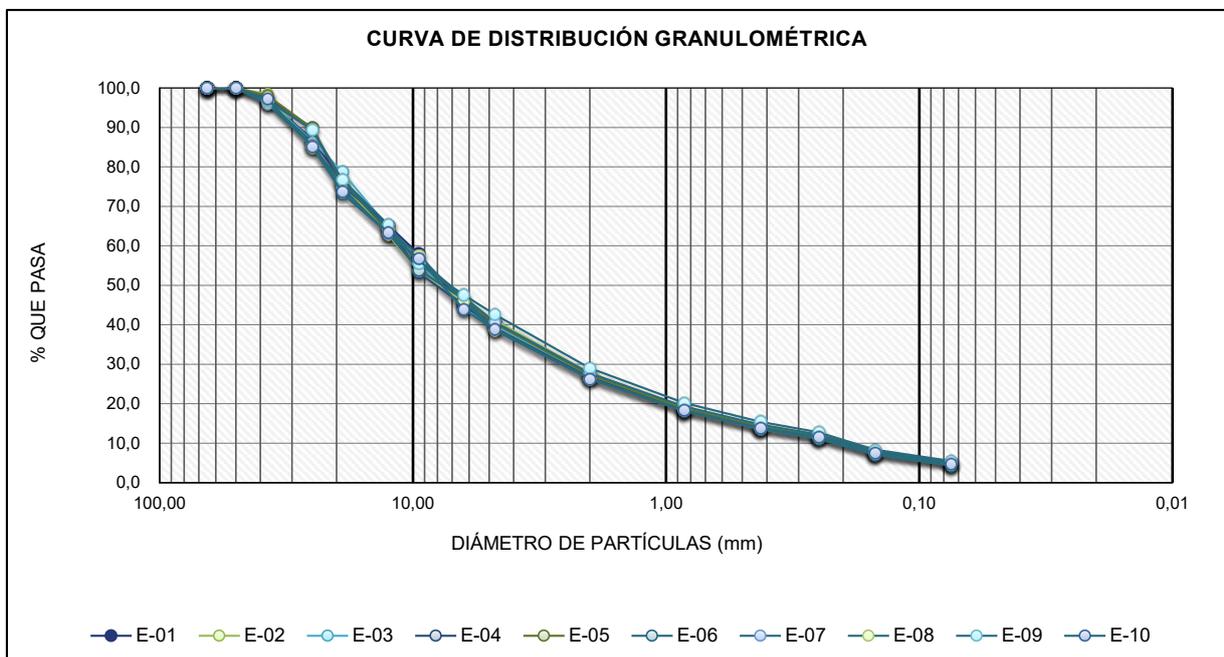
FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-01-12	2023-01-16	2023-01-25	2023-01-28	2023-02-23

**CUADRO RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Tamices ASTM	Abertura (mm)	E - 01	E - 02	E - 03	E - 04	E - 05	E - 06	E - 07	E - 08	E - 09	E - 10	% Pasa Promedio	Ds
		% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa		
3 in.	75,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 1/2 in.	65,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 in.	50,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
1 1/2 in.	37,500	96,9	98,4	96,7	97,4	98,1	96,4	95,9	96,5	96,8	97,2	97,03	0,769
1 in.	25,000	87,0	84,8	86,7	89,9	89,8	86,4	85,6	85,2	89,4	85,1	86,99	2,003
3/4 in.	19,000	76,6	75,7	78,7	75,3	76,4	73,3	74,7	76,1	76,8	73,6	75,72	1,598
1/2 in.	12,500	65,2	62,8	64,7	65,2	63,7	63,2	63,0	64,2	65,3	63,4	64,07	0,976
3/8 in.	9,500	58,0	53,6	56,0	53,2	56,4	53,9	56,7	57,6	55,5	56,8	55,77	1,686
1/4 in.	6,300	44,7	45,8	44,0	45,0	46,5	46,6	47,1	45,9	47,6	43,9	45,71	1,278
No. 4	4,750	40,6	41,1	39,8	39,2	40,3	39,0	40,7	38,6	42,6	38,8	40,07	1,245
No. 10	2,000	27,5	27,8	26,8	26,7	27,3	26,3	27,7	26,3	29,0	26,3	27,17	0,868
No. 20	0,850	18,8	19,0	18,3	18,4	18,8	18,1	19,3	18,3	20,2	18,3	18,75	0,635
No. 40	0,425	14,1	14,2	13,6	14,0	14,2	13,6	14,7	13,9	15,4	13,9	14,16	0,540
No. 60	0,250	11,8	11,8	11,3	11,7	11,7	11,1	12,2	11,6	12,8	11,5	11,75	0,474
No. 100	0,150	7,7	7,7	7,3	7,8	7,6	7,1	8,1	7,6	8,4	7,5	7,68	0,371
No. 200	0,075	5,0	4,9	4,6	5,2	4,8	4,3	5,3	5,0	5,5	4,8	4,94	0,347
CLASIFICACIÓN SUCS ASTM D2487 - 17					GP - Poorly graded gravel with sand							-	

GRÁFICA



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis¹

DATOS GENERALES

Tesis	: Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista	: Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor	: Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material	: Base granular
Procedencia	: Acopio de agregados Lift 12 La Quinua

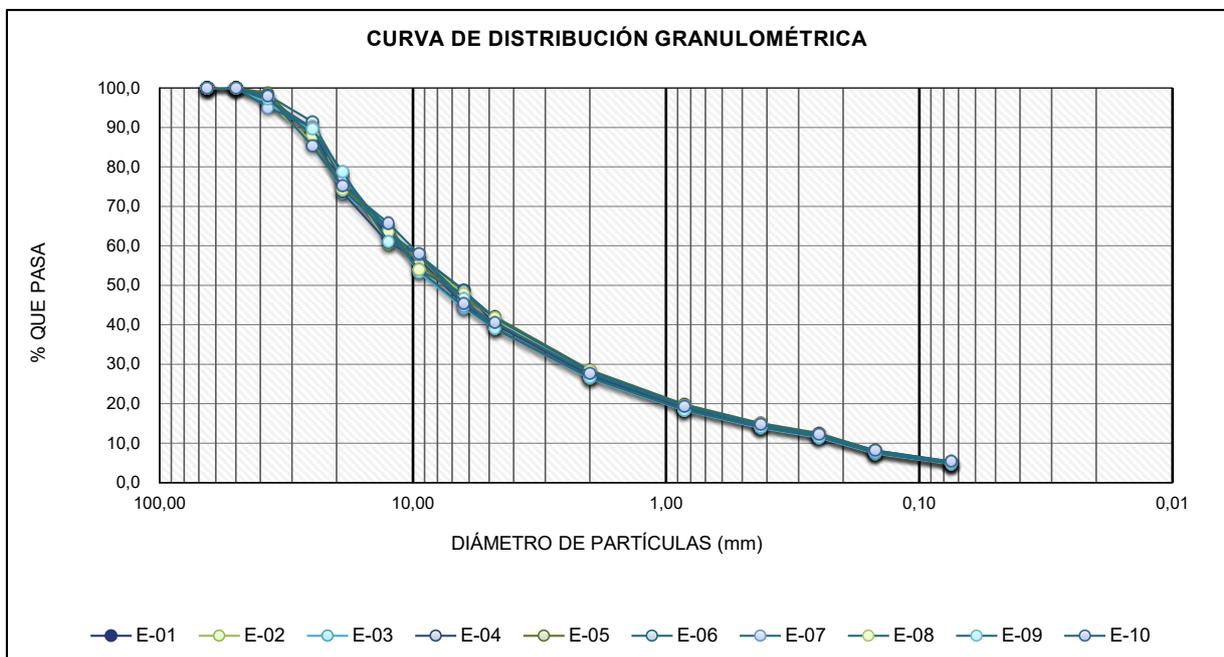
FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-01-12	2023-01-16	2023-01-30	2023-02-02	2023-02-23

**CUADRO RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Tamices ASTM	Abertura (mm)	E - 01	E - 02	E - 03	E - 04	E - 05	E - 06	E - 07	E - 08	E - 09	E - 10	% Pasa Promedio	Ds
		% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa		
3 in.	75,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 1/2 in.	65,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 in.	50,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
1 1/2 in.	37,500	96,2	96,7	96,1	97,0	98,8	98,2	95,1	97,4	97,2	98,1	97,08	1,114
1 in.	25,000	89,1	86,2	89,2	89,9	87,5	91,5	90,1	88,2	89,6	85,3	88,66	1,884
3/4 in.	19,000	76,2	78,3	73,4	73,6	74,9	78,0	76,5	74,4	78,9	75,3	75,95	1,965
1/2 in.	12,500	62,5	60,6	64,6	60,8	64,8	63,3	64,5	63,7	61,0	65,8	63,16	1,858
3/8 in.	9,500	57,5	57,3	53,3	56,8	55,5	57,8	54,0	54,0	57,9	58,1	56,22	1,853
1/4 in.	6,300	48,8	47,7	44,2	45,0	46,6	48,6	44,6	47,8	46,6	45,4	46,53	1,673
No. 4	4,750	40,2	41,4	39,0	40,1	42,1	41,8	39,2	41,8	39,0	40,6	40,52	1,211
No. 10	2,000	27,3	28,1	26,4	27,2	28,6	28,2	26,6	28,4	26,6	27,7	27,51	0,808
No. 20	0,850	18,9	19,5	18,3	18,8	19,9	19,5	18,5	19,7	18,5	19,3	19,09	0,563
No. 40	0,425	14,3	14,8	13,8	14,2	15,1	14,6	14,1	15,0	14,1	14,8	14,48	0,439
No. 60	0,250	11,8	12,3	11,4	11,8	12,6	12,1	11,7	12,4	11,7	12,3	12,01	0,384
No. 100	0,150	7,7	8,0	7,4	7,6	8,2	7,7	7,6	8,1	7,7	8,2	7,82	0,282
No. 200	0,075	4,9	5,1	4,7	4,9	5,3	4,8	4,9	5,3	5,0	5,4	5,03	0,236
CLASIFICACIÓN SUCS ASTM D2487 - 17					GW-GM - Well - gradel gravel with silt and sand							-	

GRÁFICA



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis¹

DATOS GENERALES

Tesis	: Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista	: Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor	: Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material	: Base granular
Procedencia	: Acopio de agregados Lift 12 La Quinua

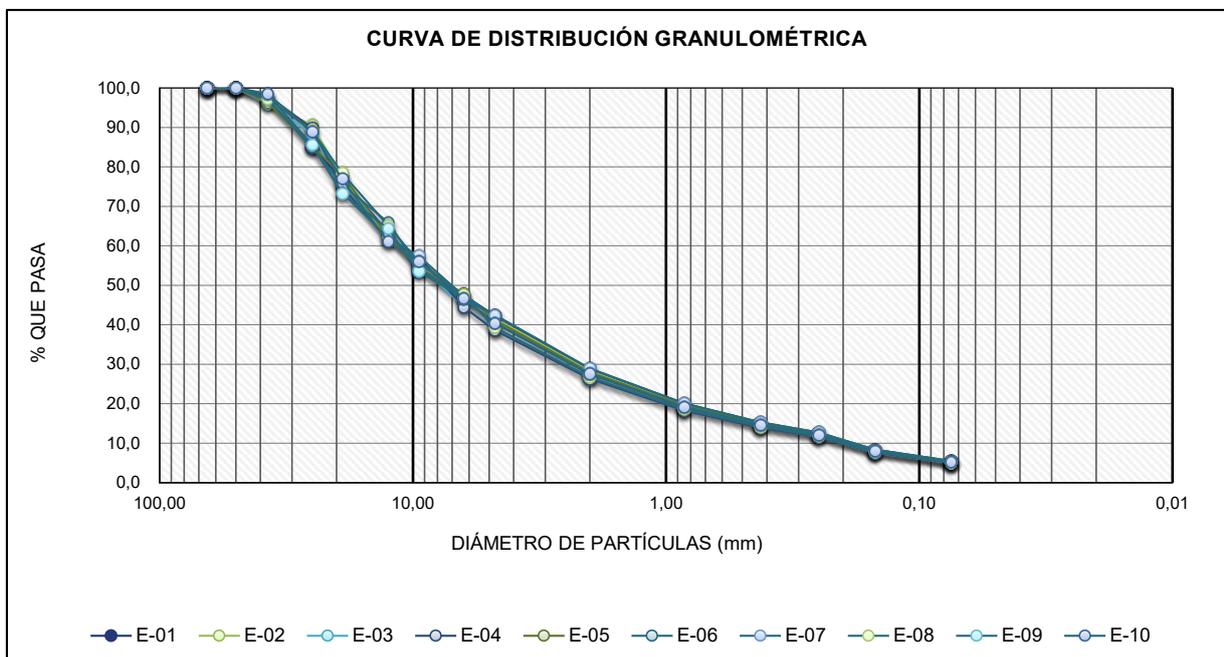
FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-01-12	2023-01-16	2023-02-03	2023-02-06	2023-02-23

**CUADRO RESUMEN DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO
(ASTM D6913/D6913M - 17)**

Tamices ASTM	Abertura (mm)	E - 01	E - 02	E - 03	E - 04	E - 05	E - 06	E - 07	E - 08	E - 09	E - 10	% Pasa Promedio	Ds
		% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa		
3 in.	75,00	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 1/2 in.	65,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
2 in.	50,000	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	0,000
1 1/2 in.	37,500	97,0	96,5	96,1	98,1	96,3	97,1	97,1	97,3	98,4	98,5	97,24	0,850
1 in.	25,000	84,9	90,5	88,3	89,8	85,2	85,0	85,6	89,2	85,6	88,8	87,29	2,226
3/4 in.	19,000	77,0	77,3	76,0	75,0	78,0	75,5	73,4	78,4	73,3	76,9	76,08	1,779
1/2 in.	12,500	63,3	61,7	63,1	61,3	62,3	65,9	62,1	65,1	64,3	61,0	63,01	1,650
3/8 in.	9,500	53,5	57,0	55,2	57,3	54,4	54,5	57,5	56,1	53,6	56,1	55,52	1,495
1/4 in.	6,300	47,5	47,3	44,6	44,5	47,9	46,5	47,3	47,6	46,6	46,7	46,65	1,197
No. 4	4,750	42,3	41,6	38,7	38,6	41,2	42,5	42,4	39,3	40,4	40,5	40,75	1,499
No. 10	2,000	28,8	28,3	26,3	26,3	28,0	28,9	28,9	26,7	27,5	27,6	27,73	1,027
No. 20	0,850	20,0	19,7	18,3	18,3	19,5	20,1	20,1	18,6	19,1	19,2	19,29	0,708
No. 40	0,425	15,2	15,0	14,0	13,9	14,9	15,3	15,3	14,2	14,6	14,6	14,7	0,527
No. 60	0,250	12,6	12,5	11,6	11,6	12,3	12,7	12,7	11,8	12,1	12,1	12,2	0,429
No. 100	0,150	8,3	8,2	7,6	7,6	8,1	8,4	8,4	7,7	8,0	8,0	8,03	0,309
No. 200	0,075	5,4	5,3	5,0	5,0	5,3	5,5	5,5	5,1	5,2	5,2	5,25	0,184
CLASIFICACIÓN SUCS ASTM D2487 - 17					GW-GM - Well - gradel gravel with silt and sand							-	

GRÁFICA



ANEXO 2.B. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de contenido de humedad: ASTM D2216-19

CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS (ASTM D2216 - 19)																		
Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass ¹																		
DATOS DEL CLIENTE																		
Tesis	:	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca																
Tesista	:	Villy Beiner Núñez Mejía																
Asesor	:	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez																
Material	:	Relleno																
Procedencia	:	Acopio de Agregados Lift 12 - La Quinua																
Técnico	:	Técnico 1, 2, 3, 4 y 5																
FECHAS																		
Muestreo (*)		Recepción		Inicio de Ensayo		Fin de Ensayo		Informe										
2023-02-13		2023-02-13		2023-02-14		2023-02-17		2023-02-27										
<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>CONDICIONES AMBIENTALES</th> <th>Inicial</th> <th>Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T°</td> <td>16,93 °C</td> <td>18,33 °C</td> </tr> <tr> <td>HR</td> <td>65,57 %</td> <td>53,76 %</td> </tr> </tbody> </table>										CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final	T°	16,93 °C	18,33 °C	HR	65,57 %	53,76 %
CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final																
T°	16,93 °C	18,33 °C																
HR	65,57 %	53,76 %																
MÉTODO B																		
Temperatura de secado:	110 ± 5 °C			Cantidad de material en capas:	01													
Tamaño máximo de partículas	3/8 in.			Material Excluido de la muestra de ensayo:	NINGUNO													
RESUMEN DE ENSAYOS																		
No. Ensayo	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio	Desviación estandar	Rango aceptable Máximo	Rango Max - Min.									
1	7,15	7,35	7,08	7,49	7,47	7,31	0,186	0,52	0,41									
2	7,18	7,50	7,21	7,48	7,61	7,40	0,190	0,53	0,43									
3	7,51	7,47	7,18	7,54	7,58	7,46	0,159	0,45	0,40									
4	7,47	7,26	7,50	7,60	7,64	7,49	0,148	0,42	0,38									
5	7,43	7,20	7,56	7,33	7,61	7,43	0,167	0,47	0,41									
6	7,85	7,17	7,29	7,55	7,73	7,52	0,287	0,80	0,68									
7	7,65	7,56	7,25	7,29	7,46	7,44	0,171	0,48	0,40									
8	7,43	7,52	7,22	7,56	7,55	7,46	0,142	0,40	0,34									
9	7,47	7,45	7,15	7,29	7,54	7,38	0,158	0,44	0,39									
10	7,63	7,40	7,33	7,37	7,47	7,44	0,118	0,33	0,30									
Promedio				7,43														
Desvesta G.				0,06														
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,27														
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,21														
Aceptación				Acepta														

ANEXO 2.C. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad de suelos cohesivos. ASTM D4318-17

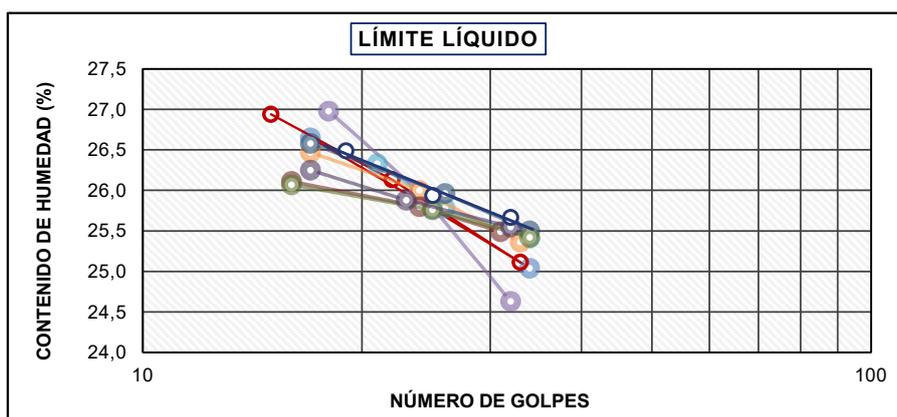
LÍMITES DE ATTERBERG (ASTM D4318 - 17^{e1})
Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils¹

DATOS GENERALES	
Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material propio (Suelo)
Procedencia :	Calicata C-01 / E-03
Técnico :	Técnico 1, 2, 3, 4 y 5

FECHAS				
Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-17	2023-02-17	2023-02-20	2023-02-22	2023-03-09

MÉTODO A				
Equipo de Prueba Utilizado			Preparación del Especimen de Ensayo:	
Equipo para Límite Plástico:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>	Preparación Húmeda	<input checked="" type="checkbox"/>
Equipo para Límite Líquido:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>	Tamizado por lavado en el tamiz No. 40	<input checked="" type="checkbox"/>
Ranurador:	Plástico <input checked="" type="checkbox"/>	Metálico <input type="checkbox"/>	Preparación con agua destilada	<input checked="" type="checkbox"/>
Clasificación SUCS (ASTM D2487 - 17) (*) :	CL - Lean clay with sand			

RESUMEN DE ENSAYOS - LÍMITE LÍQUIDO									
No. Ensayo	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio	Desviación estandar	Rango aceptable Máximo	Rango Max - Min.
1	25,76	25,79	25,95	25,73	26,05	25,86	0,138	0,39	0,32
2	26,02	25,82	25,90	25,78	26,11	25,93	0,138	0,39	0,33
3	25,78	25,85	25,79	25,80	26,15	25,87	0,157	0,44	0,37
4	25,70	26,03	25,96	25,74	26,03	25,89	0,160	0,45	0,33
5	25,95	25,89	25,92	25,91	25,94	25,92	0,024	0,07	0,06
6	25,86	25,72	25,95	25,87	25,99	25,88	0,104	0,29	0,27
7	25,99	25,88	26,04	25,82	26,02	25,95	0,095	0,27	0,22
8	25,72	25,69	25,73	25,70	26,13	25,79	0,188	0,53	0,44
9	25,71	25,66	25,77	25,94	26,01	25,82	0,151	0,42	0,35
10	25,81	25,81	26,02	25,76	25,85	25,85	0,100	0,28	0,26
Promedio						25,88			
Desvesta G.						0,05			
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)						0,22			
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)						0,16			
Aceptación						Acepta			



LÍMITES DE ATTERBERG (ASTM D4318 - 17^{ε1})

Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material propio (Suelo)
Procedencia :	Calicata C-01 / E-03
Técnico :	Técnico 1, 2, 3, 4 y 5

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-17	2023-02-17	2023-02-20	2023-02-22	2023-03-09

MÉTODO A

Equipo de Prueba Utilizado				Preparación del Especimen de Ensayo:	
Equipo para Límite Plástico:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>		Preparación Húmeda	<input checked="" type="checkbox"/>
Equipo para Límite Líquido:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>		Tamizado por lavado en el tamiz No. 40	<input checked="" type="checkbox"/>
Ranurador:	Plástico <input checked="" type="checkbox"/>	Metálico <input type="checkbox"/>		Preparación con agua destilada	<input checked="" type="checkbox"/>
Clasificación SUCS (ASTM D2487 - 17) (*) :				CL - Lean clay with sand	

RESUMEN DE ENSAYOS - LÍMITE PLÁSTICO

No. Ensayo	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio	Desviación estándar	Rango aceptable Máximo	Rango Max - Min.
1	16,09	15,76	15,73	15,80	15,82	15,84	0,144	0,40	0,36
2	16,10	16,05	15,77	15,72	15,89	15,91	0,167	0,47	0,38
3	16,08	15,96	15,94	16,01	15,81	15,96	0,100	0,28	0,27
4	16,04	15,99	15,97	15,87	15,64	15,90	0,159	0,45	0,40
5	16,11	15,80	15,99	15,90	15,74	15,91	0,148	0,41	0,37
6	16,09	16,02	15,79	15,76	15,93	15,92	0,143	0,40	0,33
7	16,15	16,03	15,98	15,93	15,73	15,96	0,154	0,43	0,42
8	16,13	15,94	15,70	15,88	15,66	15,86	0,191	0,53	0,47
9	15,95	15,85	15,88	16,03	15,68	15,88	0,131	0,37	0,35
10	15,95	15,97	15,95	16,01	15,76	15,93	0,097	0,27	0,25
Promedio						15,91			
Desvesta G.						0,04			
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)						0,18			
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)						0,12			
Aceptación						Acepta			

LÍMITES DE ATTERBERG (ASTM D4318 - 17^{ε1})

Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material propio (Suelo)
Procedencia :	Calicata C-01 / E-03
Técnico :	Técnico 1, 2, 3, 4 y 5

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-17	2023-02-17	2023-02-20	2023-02-22	2023-03-09

MÉTODO A

Equipo de Prueba Utilizado				Preparación del Especimen de Ensayo:	
Equipo para Límite Plástico:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>		Preparación Húmeda	<input checked="" type="checkbox"/>
Equipo para Límite Líquido:	Manual <input checked="" type="checkbox"/>	Mecánico <input type="checkbox"/>		Tamizado por lavado en el tamiz No. 40	<input checked="" type="checkbox"/>
Ranurador:	Plástico <input checked="" type="checkbox"/>	Metálico <input type="checkbox"/>		Preparación con agua destilada	<input checked="" type="checkbox"/>
Clasificación SUCS (ASTM D2487 - 17) (*) :				CL - Lean clay with sand	

RESUMEN DE ENSAYOS - ÍNDICE DE PLASTICIDAD

No. Ensayo	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	Promedio	Desviación estándar	Rango aceptable Máximo	Rango Max - Min.
1	9,67	10,03	10,22	9,93	10,23	10,02	0,232	0,65	0,56
2	9,92	9,77	10,13	10,06	10,22	10,02	0,178	0,50	0,45
3	9,70	9,89	9,85	9,79	10,34	9,91	0,249	0,70	0,64
4	9,66	10,04	9,99	9,87	10,39	9,99	0,267	0,75	0,73
5	9,84	10,09	9,93	10,01	10,20	10,01	0,139	0,39	0,36
6	9,77	9,70	10,16	10,11	10,06	9,96	0,210	0,59	0,46
7	9,84	9,85	10,06	9,89	10,29	9,99	0,192	0,54	0,45
8	9,59	9,75	10,03	9,82	10,47	9,93	0,340	0,95	0,88
9	9,76	9,81	9,89	9,91	10,33	9,94	0,226	0,63	0,57
10	9,86	9,84	10,07	9,75	10,09	9,92	0,150	0,42	0,34
Promedio						9,97			
Desvesta G.						0,04			
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)						0,19			
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)						0,11			
Aceptación						Acepta			

ANEXO 2.D. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de gravedad específica de sólidos: ASTM D854-14

GRAVEDAD ESPECÍFICA DE SÓLIDOS (ASTM D854 - 14)																		
Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer ¹																		
DATOS GENERALES																		
Tesis	:	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca																
Tesista	:	Villy Beiner Núñez Mejía																
Asesor	:	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez																
Material	:	Material para rellenos																
Procedencia	:	Acopio Lift 12 - La Quinua																
Técnico	:	Técnico 1, 2,3,4 y 5																
FECHAS																		
Muestreo		Recepción		Inicio de Ensayo		Fin de Ensayo		Informe										
2023-02-13		2023-02-13		2023-03-13		2023-03-18		2023-03-20										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CONDICIONES AMBIENTALE</th> <th>Inicial</th> <th>Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T°</td> <td>18,43 °C</td> <td>20,73 °C</td> </tr> <tr> <td>HR</td> <td>58,05 %</td> <td>69,87 %</td> </tr> </tbody> </table>										CONDICIONES AMBIENTALE	Inicial	Final	T°	18,43 °C	20,73 °C	HR	58,05 %	69,87 %
CONDICIONES AMBIENTALE	Inicial	Final																
T°	18,43 °C	20,73 °C																
HR	58,05 %	69,87 %																
Método de Ensayo Utilizado	:	METODO B																
% que pasa el tamiz No. 4	:	100,0																
Material excluido de la muestra de ensayo	:	> No. 4 0,0																
Clasificación SUCS (ASTM D 2487 - 17) (*)	:	CL - Lean clay with sand																
GRAVEDAD ESPECÍFICA																		
No. Ensayo	T - 1	T - 2	T - 3	T - 4	T - 5	Promedio	Desviación estándar	Rango aceptable Máximo	Rango Max - Min.									
1	2,639	2,650	2,653	2,637	2,647	2,645	0,007	0,023	0,016									
2	2,644	2,656	2,652	2,641	2,649	2,648	0,006	0,020	0,015									
3	2,651	2,658	2,651	2,643	2,651	2,651	0,005	0,018	0,015									
4	2,655	2,661	2,649	2,645	2,653	2,653	0,006	0,020	0,016									
5	2,647	2,660	2,648	2,647	2,654	2,651	0,006	0,019	0,013									
6	2,648	2,660	2,651	2,645	2,655	2,652	0,006	0,019	0,015									
Promedio						2,650												
Desvesta G.						0,003												
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)						0,012												
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)						0,008												
Aceptación						Acepta												

ANEXO 2.E. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de Proctor estándar: ASTM D698-12(21)

**PROCTOR ESTÁNDAR
(ASTM D698 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 1

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-03	2023-04-04	2023-04-11

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,73 °C	21,63 °C
HR	72,02 %	54,83 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in. 0,0 %	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in. 2,4 %	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,0 cm ³
No. 4 17,2 %	Martillo No. :	VCF-EQ-MPE-001	Tipo de Pisón	Manual
Calsificación SUCS (ASTM D2487) (*)		SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel		

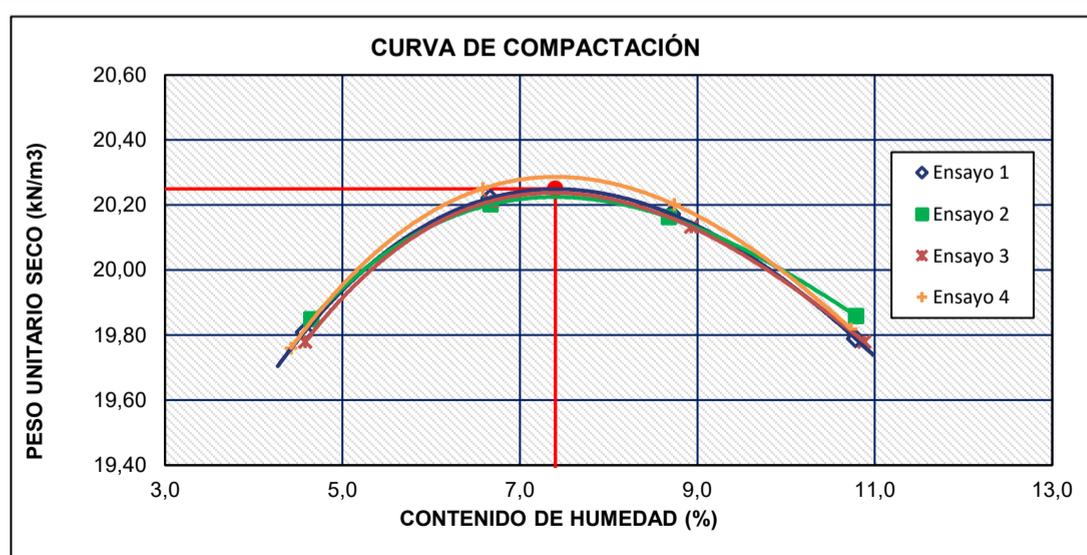
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	E-1	E-2	E-3	E-4		E-1	E-2	E-3	E-4	
1	4,6	6,7	8,7	10,8	7,41	19,809	20,221	20,172	19,790	20,250
2	4,7	6,7	8,7	10,8	7,40	19,849	20,202	20,162	19,858	20,224
3	4,6	6,7	8,9	10,9	7,39	19,780	20,212	20,133	19,780	20,238
4	4,4	6,6	8,7	10,7	7,40	19,760	20,251	20,202	19,819	20,286
Promedio					7,40	Promedio				20,250
Desvespta					0,008	Desvespta				0,027
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)					0,027	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,088
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)					0,020	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,062
CONFORMIDAD					Se Acepta	CONFORMIDAD				Se Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo
20,250 kN/m ³ 2,065 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad
7,40 %



**PROCTOR ESTÁNDAR
(ASTM D698 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 2

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-04	2023-04-05	2023-04-11

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	16,33 °C	22,43 °C
HR	69,87 %	56,98 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	3/4 in.	0,0 %	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002		
	3/8 in.	2,4 %		Color de la Muestra :		Marron Claro	Masa (g)	4 054
	No. 4	17,2 %		Preparación de la Muestra:		Seco al aire.	Volumen del Molde	938,0 cm ³
				Martillo No. :		VCF-EQ-MPE-001	Tipo de Pisón	Manual
Calsificación SUCS (ASTM D2487) (*)				SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel				

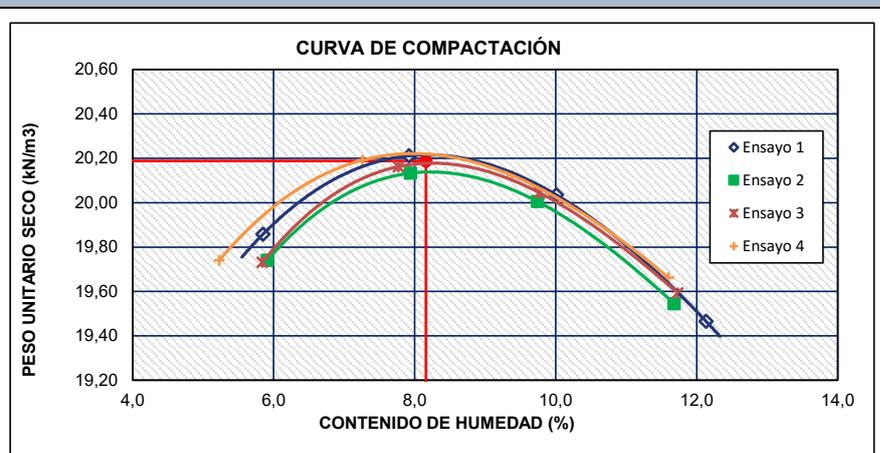
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	E-1	E-2	E-3	E-4		E-1	E-2	E-3	E-4	
1	5,9	7,9	10,0	12,1	8,18	19,858	20,212	20,035	19,466	20,216
2	5,9	7,9	9,7	11,7	8,23	19,741	20,133	20,006	19,545	20,138
3	5,8	7,8	9,8	11,7	8,25	19,731	20,162	20,045	19,594	20,178
4	5,2	7,3	9,4	11,6	7,98	19,741	20,192	20,123	19,662	20,222
Promedio					8,16	Promedio				20,188
Desvespta					0,124	Desvespta				0,039
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)					0,408	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,128
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)					0,270	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,084
CONFORMIDAD					Se Acepta	CONFORMIDAD				Se Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo
20,188 kN/m ³ 2,059 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad
8,16 %



**PROCTOR ESTÁNDAR
(ASTM D698 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 3

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-05	2023-04-06	2023-04-11

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,83 °C	21,53 °C
HR	72,02 %	59,13 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado		Método de Ensayo	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in.	0,0 %	Color de la Muestra	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in.	2,4 %	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,0 cm ³
No. 4	17,2 %	Martillo No.	VCF-EQ-MPE-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487) (*)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

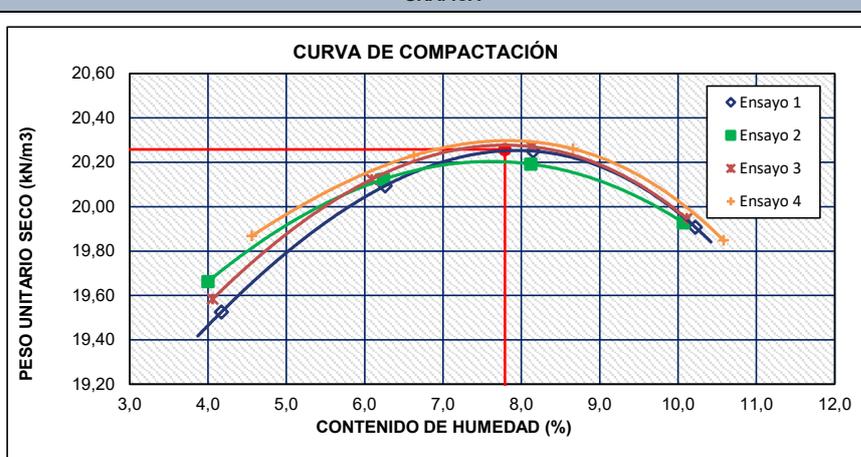
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	E-1	E-2	E-3	E-4		E-1	E-2	E-3	E-4	
1	4,2	6,3	8,2	10,2	7,94	19,525	20,094	20,251	19,907	20,254
2	4,0	6,2	8,1	10,1	7,61	19,662	20,123	20,192	19,927	20,204
3	4,1	6,1	8,1	10,1	7,78	19,584	20,123	20,270	19,947	20,278
4	4,6	6,6	8,7	10,6	7,82	19,868	20,231	20,261	19,849	20,298
Promedio					7,79	Promedio				20,258
Desvespta					0,136	Desvespta				0,041
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)					0,450	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,134
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)					0,330	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,094
CONFORMIDAD					Se Acepta	CONFORMIDAD				Se Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo
20,258 kN/m ³ 2,066 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad
7,79 %



**PROCTOR ESTÁNDAR
(ASTM D698 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 4

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-06	2023-04-07	2023-04-11

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,53 °C	19,43 °C
HR	74,16 %	65,57 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado		Método de Ensayo	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in.	0,0 %	Color de la Muestra	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in.	2,4 %	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,0 cm ³
No. 4	17,2 %	Martillo No.	VCF-EQ-MPE-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487) (*)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	E-1	E-2	E-3	E-4		E-1	E-2	E-3	E-4	
1	4,1	6,3	8,4	10,3	7,48	19,760	20,192	20,221	19,790	20,266
2	4,9	7,0	8,8	10,8	7,75	19,780	20,143	20,123	19,800	20,172
3	4,7	6,7	8,6	10,7	7,65	19,760	20,192	20,192	19,751	20,240
4	4,4	6,5	8,5	10,4	7,55	19,721	20,172	20,182	19,780	20,234
Promedio					7,61	Promedio				20,228
Desvespta					0,118	Desvespta				0,040
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)					0,389	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,131
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)					0,270	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,094
CONFORMIDAD					Se Acepta	CONFORMIDAD				Se Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

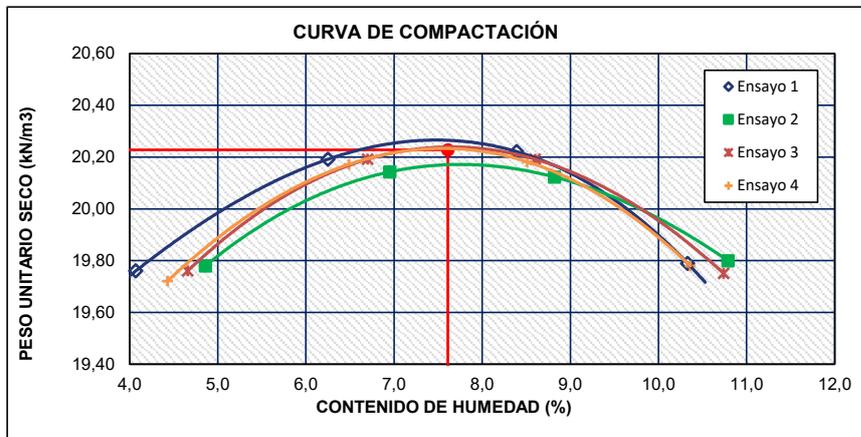
Peso Unitario Seco Máximo

20,228 kN/m³

2,063 g/cm³

Óptimo Contenido de Humedad

7,61 %



**PROCTOR ESTÁNDAR
(ASTM D698 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 5

FECHAS

Muestreo	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-07	2023-04-08	2023-04-11

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,93 °C	20,43 °C
HR	69,87 %	55,90 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado		Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in.	0,0 %	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in.	2,4 %	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,0 cm ³
No. 4	17,2 %	Martillo No. :	VCF-EQ-MPE-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487) (*)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

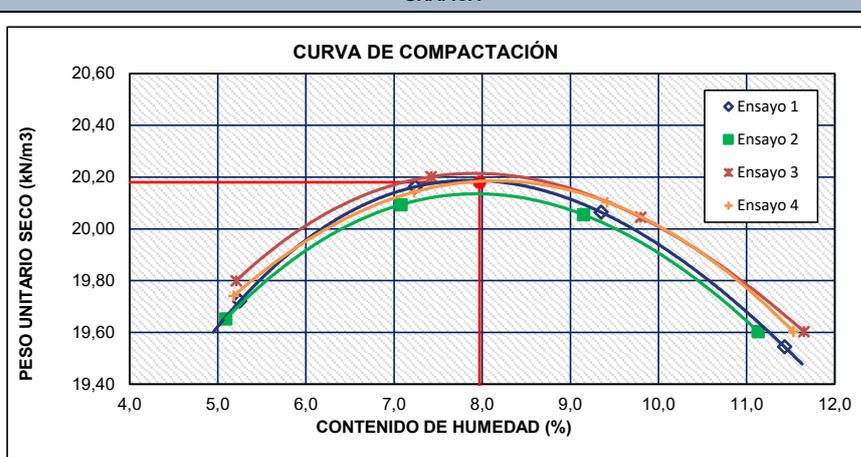
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	E-1	E-2	E-3	E-4		E-1	E-2	E-3	E-4	
1	5,3	7,2	9,4	11,4	7,87	19,721	20,162	20,064	19,545	20,188
2	5,1	7,1	9,2	11,1	7,93	19,653	20,094	20,055	19,603	20,136
3	5,2	7,4	9,8	11,7	7,91	19,800	20,202	20,045	19,603	20,214
4	5,2	7,2	9,4	11,5	8,15	19,741	20,143	20,104	19,603	20,186
Promedio					7,97	Promedio				20,180
Desvespta					0,126	Desvespta				0,033
Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)					0,415	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,108
Rango de resultados (Máximo - Mínimo)					0,280	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,078
CONFORMIDAD					Se Acepta	CONFORMIDAD				Se Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo
20,180 kN/m ³ 2,058 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad
7,97 %



ANEXO 2.F. Resultados de ensayos del estudio intralaboratorio para el método de prueba de Proctor modificado: ASTM D1557-12(21)

PROCTOR MODIFICADO (ASTM D1557 - 12(2021))																			
Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³))¹																			
DATOS GENERALES																			
Tesis	:	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca																	
Tesista	:	Villy Beiner Núñez Mejía																	
Asesor	:	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez																	
Material	:	Material para Relleno																	
Procedencia	:	Acopio Lift 12 - La Quinua																	
Técnico	:	Técnico 1																	
FECHAS																			
Muestreo (*)	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe															
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-10	2023-04-11	2023-04-18															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>CONDICIONES AMBIENTALES</th> <th>Inicial</th> <th>Final</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T°</td> <td>15,73 °C</td> <td>20,73 °C</td> </tr> <tr> <td>HR</td> <td>73,09 %</td> <td>59,13 %</td> </tr> </tbody> </table>											CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final	T°	15,73 °C	20,73 °C	HR	73,09 %	59,13 %
CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final																	
T°	15,73 °C	20,73 °C																	
HR	73,09 %	59,13 %																	
INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO																			
INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO																			
% Retenido Acumulado		Método de Ensayo	:	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002													
3/4 in.	-	Color de la Muestra	:	Marron Claro	Masa (g)	4 054													
3/8 in.	-	Preparación de la Muestra:	:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,2 cm ³													
No. 4	-	Martillo No.	:	VCF-EQ-MPM-001	Tipo de Pisón	Manual													
Calsificación SUCS (ASTM D2487)				SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel															
RESULTADOS DE COMPACTACIÓN																			
Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m³)				Peso Unitario Seco Máximo									
1	3,6	5,7	7,4	9,6	6,31	20,58	20,90	20,86	20,38	20,918									
2	3,7	5,8	7,6	10,2	6,70	20,54	20,96	20,96	20,34	21,002									
3	3,7	5,8	8,0	9,6	6,71	20,72	21,06	21,00	20,52	21,104									
4	3,8	5,9	8,1	10,0	6,55	20,66	21,04	20,92	20,32	21,064									
	Promedio				6,57	Promedio				21,022									
	Desvespta				0,19	Desvespta				0,081									
	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,62	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,267									
	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,40	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,186									
	Conformidad				Acepta	Conformidad				Acepta									
RESULTADOS					GRÁFICA														
Peso Unitario Seco Máximo		21,022 kN/m ³ 2,144 g/cm ³																	
Óptimo Contenido de Humedad		6,57 %																	

**PROCTOR MODIFICADO
(ASTM D1557 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA ENSAYADA

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 2

FECHAS

Muestreo (*)	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-11	2023-04-12	2023-04-18

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,53 °C	19,93 °C
HR	72,02 %	56,98 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in. -	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in. -	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,2 cm ³
No. 4 -	Martillo No. :	VCF-EQ-MPM-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

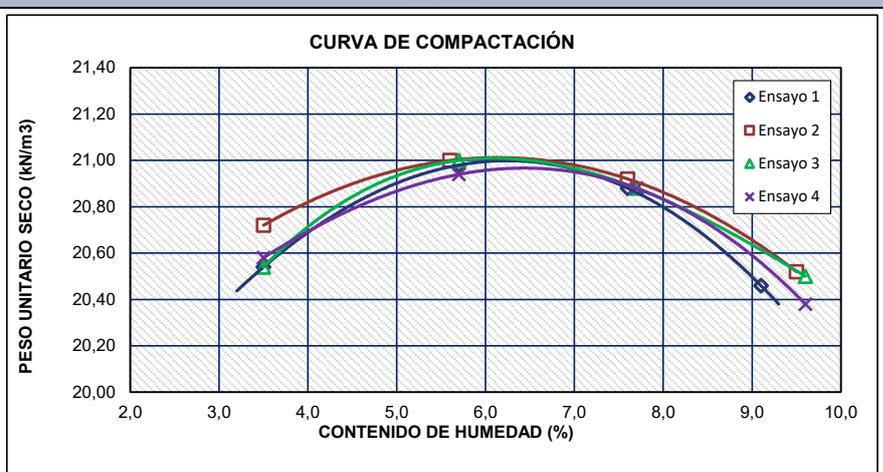
RESULTADOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	3,5	5,7	7,6	9,1		20,54	20,98	20,88	20,46	
1	3,5	5,7	7,6	9,1	6,25	20,54	20,98	20,88	20,46	20,998
2	3,5	5,6	7,6	9,5	6,14	20,72	21,00	20,92	20,52	21,012
3	3,5	5,7	7,7	9,6	6,10	20,54	21,00	20,88	20,50	21,010
4	3,5	5,7	7,7	9,6	6,44	20,58	20,94	20,88	20,38	20,966
	Promedio				6,23	Promedio				20,996
	Desvespta				0,15	Desvespta				0,021
	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,50	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,070
	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,34	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,046
	Conformidad				Acepta	Conformidad				Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo	20,996 kN/m ³ 2,141 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	6,23 %



**PROCTOR MODIFICADO
(ASTM D1557 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA ENSAYADA

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 3

FECHAS

Muestreo (*)	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-12	2023-04-13	2023-04-18

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	16,33 °C	20,63 °C
HR	65,57 %	56,98 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in. -	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in. -	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,2 cm ³
No. 4 -	Martillo No. :	VCF-EQ-MPM-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

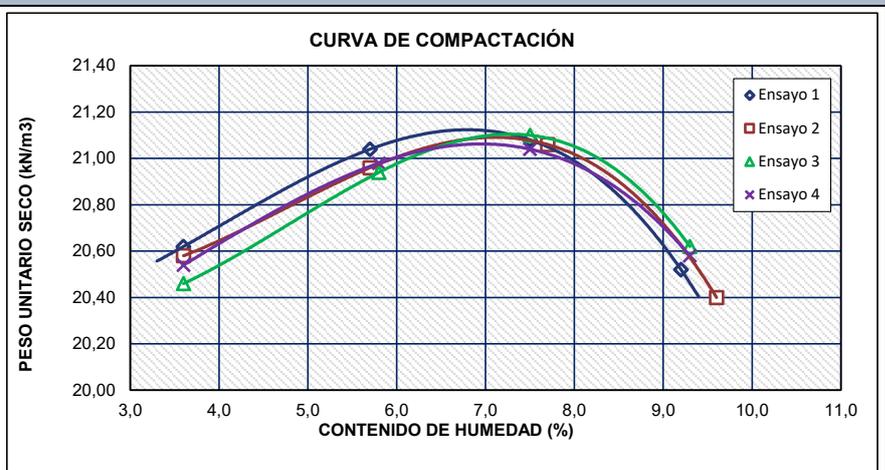
RESULTADOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	3,6	5,7	7,5	9,2		20,62	21,04	21,08	20,52	
1	3,6	5,7	7,5	9,2	6,79	20,62	21,04	21,08	20,52	21,124
2	3,6	5,7	7,7	9,6	7,11	20,58	20,96	21,06	20,40	21,092
3	3,6	5,8	7,5	9,3	7,28	20,46	20,94	21,10	20,62	21,104
4	3,6	5,8	7,5	9,3	6,95	20,54	20,98	21,04	20,58	21,062
	Promedio				7,03	Promedio				21,096
	Desvespta				0,21	Desvespta				0,026
	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,69	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,086
	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,49	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,062
	Conformidad				Acepta	Conformidad				Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo	21,096 kN/m ³ 2,151 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	7,03 %



**PROCTOR MODIFICADO
(ASTM D1557 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA ENSAYADA

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 4

FECHAS

Muestreo (*)	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-13	2023-04-14	2023-04-18

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,53 °C	21,33 °C
HR	73,09 %	55,90 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in. -	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in. -	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,2 cm ³
No. 4 -	Martillo No. :	VCF-EQ-MPM-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

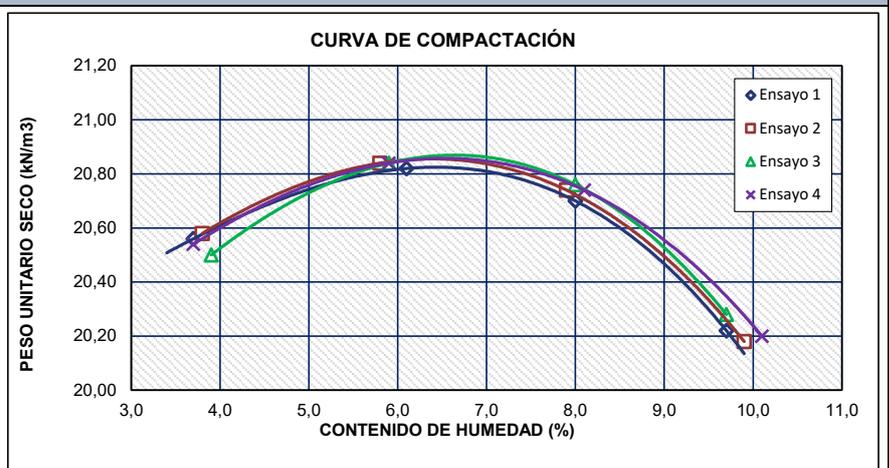
RESULTADOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
1	3,7	6,1	8,0	9,7	6,43	20,56	20,82	20,70	20,22	20,824
2	3,8	5,8	7,9	9,9	6,38	20,58	20,84	20,74	20,18	20,856
3	3,9	5,9	8,0	9,7	6,64	20,50	20,84	20,76	20,28	20,870
4	3,7	5,9	8,1	10,1	6,53	20,54	20,84	20,74	20,20	20,858
	Promedio				6,50	Promedio				20,852
	Desvespta				0,12	Desvespta				0,020
	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,38	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,065
	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,26	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,046
	Conformidad				Acepta	Conformidad				Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo	20,852 kN/m ³ 2,126 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	6,50 %



**PROCTOR MODIFICADO
(ASTM D1557 - 12(2021))**

Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³ (2 700 kN-m/m³))¹

DATOS GENERALES

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA ENSAYADA

Tesis :	Estimación de la incertidumbre de medida en métodos de prueba estándar de mecánica de suelos, para el aseguramiento de la calidad de los resultados en el laboratorio de la empresa Grupo Vicaf SAC de Cajamarca
Tesista :	Villy Beiner Núñez Mejía
Asesor :	Dr. Ing. Hermes Roberto Mosqueira Ramírez
Material :	Material para Relleno
Procedencia :	Acopio Lift 12 - La Quinua
Técnico :	Técnico 5

FECHAS

Muestreo (*)	Recepción	Inicio de Ensayo	Fin de Ensayo	Informe
2023-02-13	2023-02-13	2023-04-14	2023-04-15	2023-04-18

CONDICIONES AMBIENTALES	Inicial	Final
T°	15,93 °C	21,93 °C
HR	67,72 %	52,68 %

INFORMACION DE LA MUESTRA DE ENSAYO

INFORMACION DEL EQUIPO UTILIZADO

% Retenido Acumulado	Método de Ensayo :	A	Molde Utilizado No.	VCF-EQ-MP4in-002
3/4 in. -	Color de la Muestra :	Marron Claro	Masa (g)	4 054
3/8 in. -	Preparación de la Muestra:	Seco al aire.	Volumen del Molde	938,2 cm ³
No. 4 -	Martillo No. :	VCF-EQ-MPM-001	Tipo de Pisón	Manual

Calsificación SUCS (ASTM D2487)

SW-SM - Well-graded sand with silt and gravel

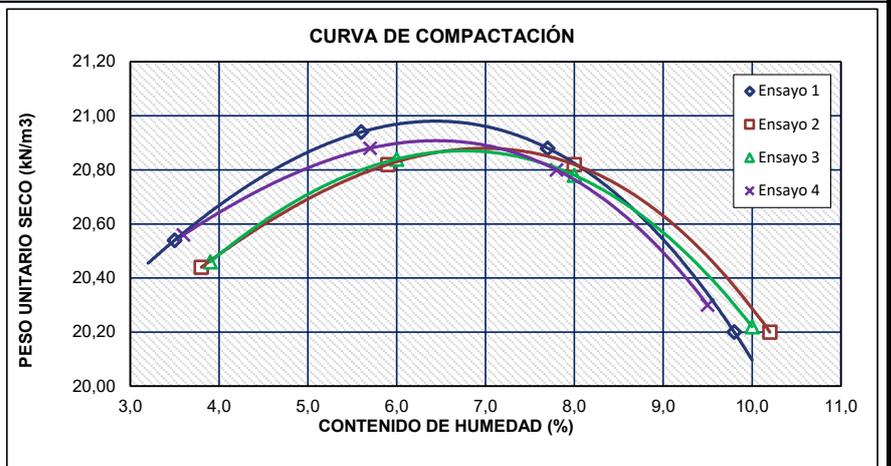
RESULTADOS DE COMPACTACIÓN

Ensayo No.	Contenido de Humedad (%)				Óptimo Contenido de Humedad	Peso Unitario Seco (kN/m ³)				Peso Unitario Seco Máximo
	3,5	5,6	7,7	9,8		20,54	20,94	20,88	20,20	
1	3,5	5,6	7,7	9,8	6,44	20,54	20,94	20,88	20,20	20,980
2	3,8	5,9	8,0	10,2	6,99	20,44	20,82	20,82	20,20	20,880
3	3,9	6,0	8,0	10,0	6,75	20,46	20,84	20,78	20,22	20,870
4	3,6	5,7	7,8	9,5	6,44	20,56	20,88	20,80	20,30	20,908
	Promedio				6,66	Promedio				20,910
	Desvespta				0,27	Desvespta				0,050
	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,88	Rango aceptable Máximo de resultados (ASTM C670)				0,164
	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,55	Rango de resultados (Máximo - Mínimo)				0,110
	Conformidad				Acepta	Conformidad				Acepta

RESULTADOS

GRÁFICA

Peso Unitario Seco Máximo	20,910 kN/m ³ 2,132 g/cm ³
Óptimo Contenido de Humedad	6,66 %



ANEXO 3. CALCULOS DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

ANEXO 3.A. Estimación de la incertidumbre de medida del Análisis granulométrico por tamizado

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
ASTM D6913/D6913M - 17: Análisis granulométrico por tamizado

1. DATOS DEL ENSAYO

Masa Seca Inicial		26 136 g			
Masa Seca Reducida		1 306,65 g			
Tamices ASTM	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada	% Rtdo acumulado	% que pasa
3 in.	75,00	0	0	0,0	100,0
2 in.	50,00	0	0	0,0	100,0
1 1/2 in.	37,50	444	444	1,7	98,3
1 in.	25,00	3 398	3 842	14,7	85,3
3/4 in.	19,00	2 666	6 508	24,9	75,1
1/2 in.	12,50	3 398	9 906	37,9	62,1
3/8 in.	9,50	1 333	11 239	43,0	57,0
1/4 in.	6,30	2 823	14 062	53,8	46,2
No. 4	4,75	1 594	15 656	59,9	40,1
No. 10	2,000	423,98	423,98	72,9	27,1
No. 20	0,850	279,52	703,50	81,5	18,5
No. 40	0,425	152,35	855,85	86,2	13,8
No. 60	0,250	75,02	930,87	88,5	11,5
No. 100	0,150	133,10	1063,97	92,6	7,4
No. 200	0,075	88,06	1152,03	95,3	4,7
Cazoleta	-	2,18			
Balanza utilizada		Tamaño mayor a No.4 Tamaño menor a No. 4		VCF-BAL-001 VCF-BAL-003	

1. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR DE LA MASA SECA INICIAL

Valores de incertidumbre para la medición de la masa seca inicial - Msi						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Masa seca inicial	26136	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	3,114469	1,55723437	Normal	100	1	1,55723437
Resolución (Rb)	1,0	0,28867513	Rectangular	∞	1	0,28867513
Corrección (Cb)	0,6534	0,37724067	Rectangular	∞	1	0,37724067
Linealidad (Lb)	0,3	0,17320508	Rectangular	∞	1	0,17320508
Excentricidad (Ex _b)	0,2	0,11547005	Rectangular	∞	1	0,11547005
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						1,64132754
Grados de libertad efectivo vef						123,41

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR DE LA MASA RETENIDA

Valores de incertidumbre para la medición de la masa retenida							
Magnitud, Xi		Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
1 1/2 in.	Calibración (Cb)	0,0532	0,0266	Normal	100	1	0,02660
1 in.		0,4050	0,2025		100	1	0,20250
3/4 in.		0,3177	0,1589		100	1	0,15885
1/2 in.		0,4050	0,2025		100	1	0,20250
3/8 in.		0,1589	0,0795		100	1	0,07945
1/4 in.		0,3364	0,1682		100	1	0,16820
No. 4		0,1900	0,0950		100	1	0,09500
No. 10		0,0154	0,0077		100	1	0,00770
No. 20		0,0139	0,0070		100	1	0,00695
No. 40		0,0130	0,0065		100	1	0,00650
No. 60		0,0127	0,0064		100	1	0,00635
No. 100		0,0130	0,0065		100	1	0,00650
No. 200		0,0128	0,0064		100	1	0,00640
1 1/2 in.	Corrección (Cb)	0,0111	0,006409	Rectangular	∞	1	0,00640859
1 in.		0,0850	0,049075		∞	1	0,04907477
3/4 in.		0,0667	0,038509		∞	1	0,03850926
1/2 in.		0,0850	0,049075		∞	1	0,04907477
3/8 in.		0,0333	0,019226		∞	1	0,01922576
1/4 in.		0,0706	0,040761		∞	1	0,04076093
No. 4		0,0399	0,023036		∞	1	0,02303628
No. 10		0,0010	0,000577		∞	1	0,00057735
No. 20		0,0007	0,000404		∞	1	0,00040415
No. 40		0,0004	0,000231		∞	1	0,00023094
No. 60		0,0002	0,000115		∞	1	0,00011547
No. 100		0,0003	0,000173		∞	1	0,00017321
No. 200		0,0002	0,000115		∞	1	0,00011547
> No. 4 < No. 4	Resolución (Rb)	1,0 0,01	0,288675 0,002887	Rectangular	∞	1 1	0,28867513 0,00288675
> No. 4 < No. 4	Linealidad (Lb)	0,3 0,115	0,173205 0,066395	Rectangular	∞	1 1	0,17320508 0,06639528
> No. 4 < No. 4	Excentricidad (Ex _b)	0,2 0,02	0,115470 0,011547	Rectangular	∞	1 1	0,11547005 0,01154701
1 1/2 in.	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g		0,35695279	Grados de libertad efectivo vef			190483,57
1 in.			0,41240908				1712,16
3/4 in.			0,39164136				3648,94
1/2 in.			0,41240908				1712,16
3/8 in.			0,36516927				37148,04
1/4 in.			0,39575164				3034,27
No. 4			0,36908310				20739,77
No. 10			0,06789421				92519,89
No. 20			0,06781199				97069,04
No. 40			0,06776654				99307,52
No. 60		0,06775202			99971,69		

No. 100		0,06776636		99306,47
No. 200		0,06775672		99754,19

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR COMBINADA u_c DEL PORCENTAJE QUE PASA

Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 1 1/2 in.						
Mtotal	26 136	1,6413	0,000065	123,4	0,000107	0,0
MR	444	0,3570	-0,003826	190483,6	0,001366	0,3
Tamiz	0,02100	0,0105	1	100,0	0,010500	2,5
θrep	1,30	0,4111	1	49,0	0,411096	97,2
Incertidumbre combinada			u_c		0,4	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		43,9	
Factor de cobertura			k		2,06	
Incertidumbre expandida			U		0,8	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 1 in.						
Mtotal	26136	1,641328	0,0005624	123,4	0,000923	0,2
MR	3842	0,412409	-0,0038261	1712,2	0,001578	0,3
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	1,8
θrep	1,80	0,569210	1	49,0	0,569210	97,8
Incertidumbre combinada			u_c		0,6	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		60,5	
Factor de cobertura			k		2,04	
Incertidumbre expandida			U		1,2	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 3/4 in.						
Mtotal	26 136,00	1,641328	0,0009527	123,4	0,001564	0,3
MR	6508,00	0,391641	-0,0038261	3648,9	0,001498	0,3
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	2,0
θrep	1,60	0,505964	1	49,0	0,505964	97,4
Incertidumbre combinada			u_c		0,5	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		46,7	
Factor de cobertura			k		2,06	
Incertidumbre expandida			U		1,0	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 1/2 in.						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0014502	123,4	0,002380	0,4
MR	9906	0,412409	-0,0038261	1712,2	0,001578	0,3
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	1,9
θrep	1,70	0,537587	1	49,0	0,537587	97,4

Incertidumbre combinada			u_c	0,5		
Grados de libertad efectivos			v_{ef}	36,7		
Factor de cobertura			k	2,07		
Incertidumbre expandida			U	1,0		
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 3/8 in.						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0016453	123,4	0,002701	0,6
MR	11239	0,365169	-0,0038261	37148,0	0,001397	0,3
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	2,1
θ_{rep}	1,50	0,474342	1	49,0	0,474342	97,0
Incertidumbre combinada			u_c	0,5		
Grados de libertad efectivos			v_{ef}	60,5		
Factor de cobertura			k	2,04		
Incertidumbre expandida			U	1,0		
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz de 1/4 in.						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0020586	123,4	0,003379	0,8
MR	14062	0,369083	-0,0038261	3034,3	0,001412	0,3
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	2,5
θ_{rep}	1,30	0,411096	1	49,0	0,411096	96,4
Incertidumbre combinada			u_c	0,4		
Grados de libertad efectivos			v_{ef}	43,9		
Factor de cobertura			k	2,06		
Incertidumbre expandida			U	0,8		
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 4						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0022919	123,4	0,003762	1,0
MR	15656	0,369083	-0,0038261	20739,8	0,001412	0,4
Tamiz	0,02100	0,010500	1	100,0	0,010500	2,7
θ_{rep}	1,20	0,379473	1	49,0	0,379473	96,0
Incertidumbre combinada			u_c	0,4		
Grados de libertad efectivos			v_{ef}	60,5		
Factor de cobertura			k	2,04		
Incertidumbre expandida			U	0,8		
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 10						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0024889	123,4	0,004085	1,6
MR	423,98	0,067894	-0,0038261	20739,8	0,000260	0,1
Tamiz	0,00710	0,003550	1	100,0	0,003550	1,4
θ_{rep}	0,80	0,252982	1	49,0	0,252982	97,0
Incertidumbre combinada			u_c	0,3		
Grados de libertad efectivos			v_{ef}	96,9		
Factor de cobertura			k	2,03		
Incertidumbre expandida			U	0,6		

Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 20						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0041298	123,4	0,006778	3,4
MR	703,50	0,067812	-0,0038261	97069,0	0,000259	0,1
Tamiz	0,00590	0,002950	1	100,0	0,002950	1,5
θrep	0,60	0,189737	1	49,0	0,189737	95,0
Incertidumbre combinada			u_c		0,2	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		60,5	
Factor de cobertura			k		2,04	
Incertidumbre expandida			U		0,4	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 40						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0050242	123,4	0,008246	4,9
MR	855,85	0,067767	-0,0038261	99307,5	0,000259	0,2
Tamiz	0,00290	0,001450	1	100,0	0,001450	0,9
θrep	0,50	0,158114	1	49,0	0,158114	94,1
Incertidumbre combinada			u_c		0,2	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		125,4	
Factor de cobertura			k		2,02	
Incertidumbre expandida			U		0,4	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 60						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0054646	123,4	0,008969	6,6
MR	930,87	0,067752	-0,0038261	99971,7	0,000259	0,2
Tamiz	0,00210	0,001050	1	100,0	0,001050	0,8
θrep	0,40	0,126491	1	49,0	0,126491	92,5
Incertidumbre combinada			u_c		0,1	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		19,1	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,2	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 100						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0062459	123,4	0,010252	7,5
MR	1063,97	0,067766	-0,0038261	99306,5	0,000259	0,2
Tamiz	0,00098	0,000490	1	100,0	0,000490	0,4
θrep	0,40	0,126491	1	49,0	0,126491	92,0
Incertidumbre combinada			u_c		0,1	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		19,1	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,2	
Presupuesto de Incertidumbre para el % que pasa en el tamiz No. 200						
Mtotal	26 136	1,641328	0,0067629	123,4	0,011100	10,4
MR	1152,03	0,067757	-0,0038261	99754,2	0,000259	0,2
Tamiz	0,00073	0,000365	1	100,0	0,000365	0,3
θrep	0,30	0,094868	1	49,0	0,094868	89,0
Incertidumbre combinada			u_c		0,1	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		60,5	
Factor de cobertura			k		2,04	
Incertidumbre expandida			U		0,2	

ANEXO 3.B. Estimación de la incertidumbre de medida del contenido de humedad de suelos

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
ASTM D 2216 - 19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass¹

1. Datos del ensayo

Contenido de Humedad				
No. De recipiente	--	T-1	T-2	T-3
Masa del recipiente	g	84,10	85,55	84,96
Masa del recipiente y Muestra Húmeda	g	706,80	706,77	703,10
Masa del recipiente y Muestra Seca	g	663,99	663,64	659,67
Masa del agua	g	42,81	43,13	43,43
Masa de la Muestra Seca	g	579,89	578,09	574,71
Contenido de Humedad	%	7,4	7,5	7,6
Contenido de Humedad Promedio (%)	7,5			
Balanza utilizado	VCF-EQ-BAL-003			

2. Datos de la Balanza utilizada

Código Interno	VCF-EQ-BAL-003	VCF-EQ-BAL-001
Descripción	Balanza Digital	Balanza Digital
Marca	OHAUS	OHAUS
Modelo	PR4202/E	R21PE30ZH
Serie No.	C209624207	8356390711
Carga Máxima	4200 g	30 000 g
Resolución	0,01 g	1 g
Tipo	Electrónico	Electrónico
Corrección	R - 2,46E-06*R	R + 2,50E-05*R
Incertidumbre expandida (U)	2*Raiz(4,00E-05 + 1,09E-10*R ²)	2*Raiz(7,63E-6 + 3,55E-9*R ²)

2. Estimación de la incertidumbre estándar de masa

Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Valores de incertidumbre para la medición de la masa del recipiente - Mc						
Masa Mc	84,10	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01277	0,0064	Normal	100	1	0,006385
Resolución (Rb)	0,01	0,0029	Rectangular	∞	1	0,002887
Corrección (Cb)	0,00210	0,0012	Rectangular	∞	1	0,001214
Linealidad (Lb)	0,0115	0,0066	Rectangular	∞	1	0,006640
Excentricidad (Exb)	0,02	0,0115	Rectangular	∞	1	0,011547
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,015099
Grados de libertad efectivo vef						3089,94

Valores de incertidumbre para la medición de la masa del recipiente y la muestra húmeda - Mcms						
Masa Mcms	706,80	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01944	0,009719	Normal	100	1	0,009719
Resolución (Rb)	0,01	0,002887	Rectangular	∞	1	0,002887
Corrección (Cb)	0,01767	0,010202	Rectangular	∞	1	0,010202
Linealidad (Lb)	0,0115	0,006640	Rectangular	∞	1	0,006640
Excentricidad (Exb)	0,02	0,011547	Rectangular	∞	1	0,011547
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,019603
Grados de libertad efectivo vef						1649,58
Valores de incertidumbre para la medición de la masa del recipiente y la muestra seca al horno - Mcds						
Masa Mcds	663,99	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01877	0,009384	Normal	100	1	0,009384
Resolución (Rb)	0,01	0,002887	Rectangular	∞	1	0,002887
Corrección (Cb)	0,01660	0,009584	Rectangular	∞	1	0,009584
Linealidad (Lb)	0,0115	0,006640	Rectangular	∞	1	0,006640
Excentricidad (Exb)	0,02	0,011547	Rectangular	∞	1	0,011547
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,019122
Grados de libertad efectivo vef						1718,05

3. Reporte de resultados

Presupuesto de Incertidumbre estándar combinada para el contenido de humedad						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
Mc	84,10	0,015099	0,012731	3089,94	0,000192	0,4
Mcms	706,80	0,019603	0,172446	1649,58	0,003380	6,3
Mcds	663,99	0,019122	-0,185177	1718,05	0,003541	6,6
θ_{rep}	0,1464	0,046296	1	49,00	0,046296	86,7
Incertidumbre estándar combinada			u_c		0,05	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		66,67	
Factor de cobertura			k		2,04	
Incertidumbre expandida			U		0,10	

ANEXO 3.C. Estimación de la incertidumbre de medida de la gravedad específica de sólidos

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

ASTM D 854 - 14: Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer¹

1. DATOS DEL ENSAYO

Gravedad específica de sólidos		
Especimen de ensayo No.	Und.	E - 1
Matraz No.	-	1
Masa de muestra seca en horno	g	107,78
Masa del matraz, agua y muestra seca - M _{pws,t}	g	770,08
Temperatura	°C	18,0
Masa media calibrada del matraz	g	203,95
Volumen promedio calibrado del matraz	g	499,79
Masa del matraz y agua a temperatura de ensayo - M _{pw,t}	g	703,04
Densidad del agua a temperatura de ensayo ρ _{w,t}	g/ml	0,998597
Factor "K"	-	1,000391
Gravedad Específica (Gs)	g/cm ³	2,647
Gravedad Específica Promedio (G_{20°C})	g/cm³	2,65
Balanza Utilizada en el Ensayo	-	LH-EQ-BAL-003

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR DE MASA DE FIOLA CALIBRADA A TEMPERATURA DE ENSAYO u(M_{pw,t})

Incertidumbre estandar de la Masa media del matraz u_(M_p)

Valores de incertidumbre para la medición de la masa promedio del matraz - M _{p,m}						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coeficientes de Sencibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Masa M _{p,m}	203,95	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01335	0,00667337	Normal	100	1	0,00667337
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,00050	0,00028967	Rectangular	∞	1	0,00028967
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01517787
Grados de libertad efectivo vef						2649,41
Valores de incertidumbre para la medición de Masa promedio del matraz y agua - M _{pw,c}						
Masa M _{pw,c}	703,04	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01938	0,00968890	Normal	100	1	0,00968890
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,00173	0,00099851	Rectangular	∞	1	0,00099851
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01675177
Grados de libertad efectivo vef						891,60

Valores de incertidumbre para la medición de la Masa de la muestra seca - Ms						
Masa Ms	107,78	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01285	0,00642388	Normal	100	1	0,00642388
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,00027	0,00015308	Rectangular	∞	1	0,00015308
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01506783
Grados de libertad efectivo vef						2992,24
Valores de incertidumbre para la medición de la Masa del matraz, agua y muestra seca - Mpws,t						
Masa Mpws,t	770,08	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,02046	0,01022935	Normal	100	1	0,01022935
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,00189	0,00109373	Rectangular	∞	1	0,00109373
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01707588
Grados de libertad efectivo vef						775,10
Valores de incertidumbre para la medición del Volumen promedio de calibración - Vc						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Mp,m	203,95	0,01517787	Normal	4	-1,00140525	-0,01519920
Mpw,c	703,04	0,01675177	Normal	4	1,00140525	0,01677531
pw,c	0,998597	0,00004000	Normal	4	-500,49232988	-0,02001969
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,03021944
Grados de libertad efectivo vef						11,38
Valores de incertidumbre para la medición de la Masa de Fiola Calibrada a Temperatura de Ensayo - Mpw						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Mp,m	203,95	0,01517787	Normal	4	1	0,01517787
Vp,m	499,79	0,03021944	Normal	11,38	0,99859672	0,03017703
pw,c	0,998597	0,00006800	Normal	4	703,0386557	0,04780663
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,05853627
Grados de libertad efectivo vef						8,43

3. REPORTE DE RESULTADOS

Presupuesto de Incertidumbre para la Gravedad Específica - Gs						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
Ms	107,78	0,01506783	-0,04039516	2992,24	0,00060867	8,6
Mpws,t	770,08	0,01707588	0,06494187	775,10	0,00110894	15,7
Mpw,t	703,04	0,05853627	-0,06494187	8,43	0,00380145	53,8
θrep	0,0038	0,001551	1	29,00	0,00155134	21,9
Incertidumbre combinada			u_c			0,004
Grados de libertad efectivos			v_{ef}			10,25
Factor de cobertura			k			2,28
Incertidumbre expandida			U			0,01

ANEXO 3.D. Estimación de la incertidumbre de medida del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
ASTM D4318 - 17 : Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils¹

1. DATOS DEL ENSAYO

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO			LÍMITE PLÁSTICO	
	1	2	3	4	5
TARA No.	1	2	3	4	5
Masa de Tara (g)	37,17	37,20	37,21	37,22	37,18
Masa de Tara + Muestra Húmeda (g)	58,69	57,94	60,40	46,36	48,25
Masa de Tara + Muestra Seca (g)	54,38	53,69	55,52	45,09	46,72
% Humedad	25,04	25,77	26,65	16,14	16,04
N° Golpes	34	25	17	16,1	
Límite Líquido (LL%)	25,8				
Equipo utilizado	LH-EQ-BA-003			LH-EQ-BAL-003	

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL LÍMITE LÍQUIDO (LL)

1. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MASA

Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara - Mc						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Masa Mc	37,17	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,012673	0,00633645	Normal	100	1	0,00633645
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000091	0,00005279	Rectangular	∞	1	0,00005279
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503008
Grados de libertad efectivo vef						3127,25
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra húmeda - Mcms						
Masa Mcms	58,69	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01271	0,00635417	Normal	100	1	0,00635417
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000144	0,00008336	Rectangular	∞	1	0,00008336
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503770
Grados de libertad efectivo vef						3099,20

Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra seca - Mcds						
Masa Mcds	54,38	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01270	0,00634999	Normal	100	1	0,00634999
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000134	0,00007723	Rectangular	∞	1	0,00007723
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503590
Grados de libertad efectivo vef						3105,79
Valores de incertidumbre para la medición del contenido de humedad - w						
Mc	37,17	0,01503008	Normal	3127,3	-1,45517602	0,021871412
Mcms	58,69	0,01503770	Normal	3099,2	5,81057525	0,087377687
Mcds	54,38	0,01503590	Normal	3105,8	7,26575127	0,109247109
Incertidumbre combinada de Humedad						0,141591489
Grados de libertad efectivo vef						6207,85

3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR POR FUNCION DE REGRECIÓN

Valores de incertidumbre para la función de regresión					
Nº Golpes (Xi)	% Humedad (Yi)	Ln(Xi) = X'	\hat{y} = Humedad Ajustado	(Y-y) ²	Xi ²
34	25,04	3,53	25,05	0,00004	1156,0
25	25,77	3,22	25,76	0,00017	625,0
17	26,65	2,83	26,66	0,00006	289,0
Intercepto				b	33,23
Pendiente				m	-2,32
Total de mediciones				N	3
Desviación Estándar Residual				Sy	0,0167
Incertidumbre en la pendiente				Sm	0,0014
Incertidumbre en la ordenada al origen				Sb	0,0608
Incertidumbre Estándar para 25 Golpes				u(Xo)	0,061

4. REPORTE DE RESULTADOS

Presupuesto de Incertidumbre de Límite Líquido - LL						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
w	25,8	0,14159149	1	6207,85	0,14159149	60,4
FR	-	0,06081185	1	2	0,06081185	25,9
θ_{rep}	0,1018	0,03219199	1	49	0,03219199	13,7
Incertidumbre combinada			u_c		0,2	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		88,7	
Factor de cobertura			k		2,03	
Incertidumbre expandida			U		0,3	

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL LÍMITE PLÁSTICO (LP)

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR PARA LAS MASAS

Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara - Mc						
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Masa Mc	37,22	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01267	0,00633648	Normal	100	1	0,00633648
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000092	0,00005286	Rectangular	∞	1	0,00005286
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503010
Grados de libertad efectivo vef						3127,20
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara más muestra húmeda - Mcms						
Masa Mcms	46,36	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01269	0,00634305	Normal	100	1	0,00634305
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000114	0,00006584	Rectangular	∞	1	0,00006584
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503292
Grados de libertad efectivo vef						3116,76
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara más muestra seca - Mcds						
Masa Mcds	45,09	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,01268	0,00634205	Normal	100	1	0,00634205
Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
Corrección (Cb)	0,000111	0,00006404	Rectangular	∞	1	0,00006404
Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
Excentricidad (Exb)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01503249
Grados de libertad efectivo vef						3118,35

4. REPORTE DE RESULTADOS

Presupuesto de Incertidumbre para el Límite Plástico - LP						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
Mc	37,22	0,01503010	-2,05047395	3127,20	0,03081883	6,5
Mcms	46,36	0,01503292	12,70648030	3116,76	0,19101550	40,2
Mcds	45,09	0,01503249	14,75695426	3118,35	0,22183377	46,7
θrep	0,0983	0,03108519	1	49,0	0,03108519	6,5

Incertidumbre combinada	u_c	0,3
Grados de libertad efectivos	v_{ef}	6276,1
Factor de cobertura	k	2,00
Incertidumbre expandida	U	0,6

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)

4. REPORTE DE RESULTADOS

Presupuesto de Incertidumbre para el Índice de plasticidad - IP						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar $u(xi)$	Coefficientes de	Grados de libertad	$Ci \cdot u(xi)$	Contribución Relativa (%)
LL	25,8	0,15742476	1	88,70	0,15742476	33,2
LP	16,1	0,29599532	1	6276,11	0,29599532	62,3
θ_{rep}	0,1211	0,03829518	1	49,0	0,03829518	8,1
Incertidumbre combinada			u_c			0,3
Grados de libertad efectivos			v_{ef}			988,8
Factor de cobertura			k			2,00
Incertidumbre expandida			U			0,6

ANEXO 3.E. Estimación de la incertidumbre de medida del método de compactación con esfuerzo estándar

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
ASTM D698 - 12 (2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))

1. DATOS DEL ENSAYO

Compactación					
Molde utilizado	Und.	VCF-EQ-MP-002			
Molde No.	-	1	2	3	4
Masa del molde	g	4 054	4 054	4 054	4 054
Volumen del molde	cm ³	938,2	938,2	938,2	938,2
Masa del molde + Muestra húmeda	g	6 035	6 117	6 151	6 150
Masa de muestra húmeda	g	1 981	2 063	2 097	2 096
Densidad húmeda	g/cm ³	2,111	2,199	2,235	2,234
Contenido de humedad					
Tara No.	-	C-18	C-19	C-20	C-21
Masa de tara (g)	g	91,21	93,43	89,61	81,16
Masa de tara + Muestra húmeda (g)	g	1087,04	1040,20	1081,60	1056,66
Masa de tara + Muestra seca (g)	g	1043,50	981,07	1002,13	961,77
Masa del agua (g)	g	43,54	59,13	79,47	94,89
Masa del suelo seco (g)	g	952,29	887,64	912,52	880,61
Humedad (%)	%	4,6	6,7	8,7	10,8
Densidad seca (g/cm ³)	g/cm ³	2,019	2,061	2,056	2,016
Peso unitario seco	kN/m ³	19,80	20,22	20,16	19,78
Peso unitario seco	kN/m³	20,240			
Óptimo contenido de humedad	%	7,40			

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DE LA DENSIDAD HUMEDA (Dh)

2.1. Estimación de la Incertidumbre Estándar de la Masa

Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coeficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Valores de incertidumbre para la medición de la masa del molde - Mmd						
Masa Mmd	4054,00	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,48312	0,24156072	Normal	100	1	0,24156072
Resolución (Rb)	1	0,28867513	Rectangular	∞	1	0,28867513
Corrección (Cb)	0,10135	0,05851445	Rectangular	∞	1	0,05851445
Linealidad (Lb)	0,3	0,17320508	Rectangular	∞	1	0,17320508
Excentricidad (Ex _b)	0,2	0,11547005	Rectangular	∞	1	0,11547005
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,43409929
Grados de libertad efectivo vef						1040,47

Valores de incertidumbre para la medición de la masa del molde y muestra húmeda - Mt							
1	Masa Mt	6035,00	-	-	-	-	-
2		6117,00	-	-	-	-	-
3		6151,00	-	-	-	-	-
4		6150,00	-	-	-	-	-
1	Calibración (ICb)	0,71917447	0,3596	Normal	100	1	0,35958723
2		0,72894561	0,3645		100	1	0,36447281
3		0,73299706	0,3665		100	1	0,36649853
4		0,73287790	0,3664		100	1	0,36643895
1	Corrección (Cb)	0,150875	0,0871	Rectangular	∞	1	0,08710772
2		0,152925	0,0883		∞	1	0,08829129
3		0,153775	0,0888		∞	1	0,08878204
4		0,153750	0,0888		∞	1	0,08876760
-	Resolución (Rb)	1	0,2887	Rectangular	∞	1	0,28867513
-	Linealidad (Lb)	0,3	0,1732	Rectangular	∞	1	0,17320508
-	Exentricidad (Ex _b)	0,2	0,1155	Rectangular	∞	1	0,11547005
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,51337842
2							0,51701300
3							0,51852685
4							0,51848227
1	Grados de libertad efectivo vef						415,26
2							404,71
3							400,50
4							400,62

2.2. Estimación de la Incertidumbre Estandar del Volumen del Molde

Descripción	Mediciones				
	1	2	3	4	5
Masa del molde vacío (g)	4054	4054	4054	4054	4054
Masa de la Placa de Vidrio (g)	4239	4239	4239	4239	4239
Masa molde + agua + placa de vidrio (g)	5176	5176	5176	5176	5176
Masa del agua (g)	937	937	937	937	937
Temperatura del agua (°C)	17,0	17,0	17,1	17,1	17,2
Densidad del agua (g/cm ³)	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987
Volumen del agua (cm ³)	938,1	938,1	938,2	938,2	938,2
Promedio	938,2				
DS	0,0548				
Incertidumbre u(v)	0,0245				

2.3. Estimación de la Incertidumbre Estándar de la Densidad Humeda (g/cm³)

Magnitud, Xi		Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
-	Mmd	4054	0,43409929	Normal	1040,47	0,01045257	0,004537453
-	V	938,2	0,02449490	Normal	4	-0,00225058	5,51276E-05
1	Mt	6035	0,51337842	Normal	415,26	0,01045257	0,005366123
2		6117	0,51701300		404,71	0,01045257	0,005404114
3		6151	0,51852685		400,50	0,01045257	0,005419938
4		6150	0,51848227		400,62	0,01045257	0,005419472
1	Incertidumbre combinada de densidad húmeda 1						0,00702757
2							0,00705663
3							0,00706875
4							0,00706839
1	Grados de libertad efectivo vef						1014,52
2							986,00
3							974,51
4							974,84

4. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DEL PESO UNITARIO SECO (PUS)

Valores de incertidumbre para la medición del peso unitario seco para cada molde							
Magnitud, Xi		Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
1	Densidad húmeda - ρ_m	2,111	0,00702757	Normal	1014,52	9,3753346	0,06588586
2		2,199	0,00705663		986,00	9,1908154	0,06485614
3		2,235	0,00706875		974,51	9,0217111	0,06377223
4		2,234	0,00706839		974,84	8,8507220	0,06256039
1	Contenido de humedad - w	4,6	0,00284975	Normal	925,4	0,0192986	0,00005500
2		6,7	0,00303398		1009,2	0,0193141	0,00005860
3		8,7	0,00301290		964,2	0,0189166	0,00005699
4		10,8	0,00312102		1018,7	0,0181977	0,00005680
1	Incertidumbre combinada u(c) del Peso unitario seco, en kN/m ³						0,06588588
2							0,06485617
3							0,06377225
4							0,06256041
1	Grados de libertad efectivo vef						1014,5
2							986,0
3							974,5
4							974,8

5. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COBINADA DEL PESO UNITARIO SECO MÁXIMO (PUSM)

Presupuesto de Incertidumbre estándar combinada para el Peso unitario unitario seco máximo - PUSM						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
γ_1	19,800	0,06588588	1014,5	1	0,06588588	23,9
γ_2	20,220	0,06485617	986,0	1	0,06485617	23,6
γ_3	20,160	0,06377225	974,5	1	0,06377225	23,2
γ_4	19,780	0,06256041	974,8	1	0,06256041	22,7
θ_{rep}	0,0361	0,018	19	1	0,018	6,6
Incertidumbre combinada			u_c		0,13	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		3797,9	
Factor de cobertura			k		2,00	
Incertidumbre expandida			U		0,26	

3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DEL CONTENIDO DE HUMEDAD (w)

3.1. Estimación de la Incertidumbre Estandar de la Masa

Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)	
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara - Mc							
1		91,21					
2	Masa de Tara - Mc	93,43	-	-	-	-	
3		89,61					
4		81,16					
1		0,01279168	Normal	100	1	0,00639584	
2	Calibración (ICb)	0,01279867		100	1	0,00639933	
3		0,01278675		100	1	0,00639338	
4		0,01276213		100	1	0,00638106	
1		0,00022438	Rectangular	∞	1	0,00012954	
2	Corrección (Cb)	0,00022984		∞	1	0,00013270	
3		0,00022044		∞	1	0,00012727	
4		0,00019965		∞	1	0,00011527	
-	Resolución (Rb)	0,01	Rectangular	∞	1	0,00288675	
-	Linealidad (Lb)	0,0115	Rectangular	∞	1	0,00663953	
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	Rectangular	∞	1	0,01154701	
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01505568
2							0,01505719
3							0,01505462
4							0,01504929
1	Grados de libertad efectivo vef						3070,5
2							3065,0
3							3074,4
4							3093,8

Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra húmeda - Mcms							
1		1087,04					
2	Masa de la tara y muestra húmeda - Mcms	1040,20	-	-	-	-	-
3		1081,60					
4		1056,66					
1		0,02598465	0,01299232		100	1	0,01299232
2	Calibración (ICb)	0,02513482	0,01256741	Normal	100	1	0,01256741
3		0,02588548	0,01294274		100	1	0,01294274
4		0,02543241	0,01271620		100	1	0,01271620
1		0,00267412	0,00154390		∞	1	0,00154390
2	Corrección (Cb)	0,00255889	0,00147738	Rectangular	∞	1	0,00147738
3		0,00266074	0,00153618		∞	1	0,00153618
4		0,00259938	0,00150075		∞	1	0,00150075
-	Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
-	Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01889270
2							0,01859764
3							0,01885801
4							0,01870038
1	Grados de libertad efectivo vef						447,1
2							479,6
3							450,7
4							467,7
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra seca - Mcds							
1		1043,50					
2	Masa de la tara y muestra seca - Mcds	981,07	-	-	-	-	-
3		1002,13					
4		961,77					
1		0,02519438	0,01259719		100	1	0,01259719
2	Calibración (ICb)	0,02407591	0,01203795	Normal	100	1	0,01203795
3		0,02445116	0,01222558		100	1	0,01222558
4		0,02373396	0,01186698		100	1	0,01186698
1		0,00256701	0,00148206		∞	1	0,00148206
2	Corrección (Cb)	0,00241343	0,00139340	Rectangular	∞	1	0,00139340
3		0,00246524	0,00142331		∞	1	0,00142331
4		0,00236595	0,00136598		∞	1	0,00136598
-	Resolución (Rb)	0,01	0,00288675	Rectangular	∞	1	0,00288675
-	Linealidad (Lb)	0,0115	0,00663953	Rectangular	∞	1	0,00663953
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	0,01154701	Rectangular	∞	1	0,01154701
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,01861816
2							0,01823743
3							0,01836411
4							0,01812294

1		477,1
2		526,8
3	Grados de libertad efectivo v_{ef}	509,1
4		543,9

3.2. Estimación de la Incertidumbre Estándar del Contenido de Humedad (w)

Valores de incertidumbre para la medición del contenido de humedad para cada molde							
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)	
1		91,21		3070,5	-0,0048	7,22854E-05	
2	Masa de la tara - Mc	93,43	Normal	3065,0	-0,0075	0,000113	
3		89,61		3074,4	-0,0095	0,000143677	
4		81,16		3093,8	-0,0122	0,000184149	
1				1087,04		447,1	0,1050
2	Mas de la tara y muestra húmeda - Mcms	1040,20	Normal	479,6	0,1127	0,002095179	
3		1081,60		450,7	0,1096	0,002066586	
4		1056,66		467,7	0,1136	0,002123571	
1				1043,50		477,1	0,1098
2	Masa de tara y muestra seca - Mcds	981,07	Normal	526,8	0,1202	0,002191464	
3		1002,13		509,1	0,1191	0,002187724	
4		961,77		543,9	0,1258	0,002279758	
1				Incertidumbre combinada u(c) de Humedad			
2						0,00303398	
3						0,00301290	
4						0,00312102	
1		Grados de libertad efectivo v_{ef}				925,4	
2						1009,2	
3						964,2	
4						1018,7	

3.3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COBINADA DEL ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (OCH)

Presupuesto de incertidumbre para la medición del Óptimo contenido de humedad (OCH)						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Grados de libertad efectivos	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
w1	4,6	0,00284975	925,4	1	0,002849752	4,2
w2	6,7	0,00303398	1009,2	1	0,003033984	4,4
w3	8,7	0,00301290	964,2	1	0,003012898	4,4
w4	10,8	0,00312102	1018,7	1	0,003121019	4,6
θ_{rep}	0,1129	0,0565	19	1	0,05645	82,4
Incertidumbre combinada			u_c		0,06	
Grados de libertad efectivos			v_{ef}		19,4	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,1	

ANEXO 3.E. Estimación de la incertidumbre de medida del método de compactación con esfuerzo modificado

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
ASTM D1557 - 12 (2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))

1. DATOS DEL ENSAYO

Compactación					
Molde	Und.	VCF-EQ-MP-002			
Molde No.	-	1	2	3	4
Masa del molde	g	4 054	4 054	4 054	4 054
Volumen del molde	cm ³	938,2	938,2	938,2	938,2
Masa del molde y muestra húmeda	g	6 095	6 167	6 198	6 190
Masa de muestra húmeda	g	2 041	2 113	2 144	2 136
Densidad húmeda	g/cm ³	2,175	2,252	2,285	2,277
Contenido de humedad					
Tara No.	-	A-01	A-02	A-03	A-04
Masa de tara	g	89,61	81,16	83,98	93,22
Masa de tara y muestra húmeda	g	880,72	898,95	842,74	894,18
Masa de tara y muestra seca	g	853,01	854,67	790,15	823,83
Masa del agua	g	27,71	44,28	52,59	70,35
Masa del suelo seco	g	763,40	773,51	706,17	730,61
Humedad	%	3,6	5,7	7,4	9,6
Densidad seca	g/cm ³	2,100	2,131	2,128	2,077
Peso unitario seco	kN/m ³	20,60	20,90	20,86	20,36
Peso unitario seco	kN/m³	20,92			
Óptimo contenido de humedad	%	6,3			

2. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DE LA DENSIDAD HUMEDA (Dh)

2.1. Estimación de la Incertidumbre Estandar de la Masa

Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coeficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
Valores de incertidumbre para la medición de la masa del molde - Mmd						
Masa Mmd	4054,00	-	-	-	-	-
Calibración (ICb)	0,48312	0,241561	Normal	100	1	0,24156072
Resolución (Rb)	1	0,288675	Rectangular	∞	1	0,28867513
Corrección (Cb)	0,10135	0,058514	Rectangular	∞	1	0,05851445
Linealidad (Lb)	0,3	0,173205	Rectangular	∞	1	0,17320508
Exentricidad (Ex _b)	0,2	0,115470	Rectangular	∞	1	0,11547005
Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,43409929
Grados de libertad efectivo vef						1040,47

Valores de incertidumbre para la medición de la masa del molde y muestra húmeda - Mt							
1	Masa Mt	6095,00	-	-	-	-	-
2		6167,00	-	-	-	-	-
3		6198,00	-	-	-	-	-
4		6190,00	-	-	-	-	-
1	Calibración (ICb)	0,726324	0,363162	Normal	100	1	0,363162
2		0,734904	0,367452		100	1	0,367452
3		0,738598	0,369299		100	1	0,369299
4		0,737644	0,368822		100	1	0,368822
1	Corrección (Cb)	0,152375	0,087974	Rectangular	∞	1	0,087974
2		0,154175	0,089013		∞	1	0,089013
3		0,154950	0,089460		∞	1	0,089460
4		0,154750	0,089345		∞	1	0,089345
-	Resolución (Rb)	1	0,288675	Rectangular	∞	1	0,288675
-	Linealidad (Lb)	0,3	0,173205	Rectangular	∞	1	0,173205
-	Exentricidad (Ex _b)	0,2	0,115470	Rectangular	∞	1	0,115470
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,516036
2							0,519241
3							0,520626
4							0,520268
1	Grados de libertad efectivo vef						407,49
2							398,55
3							394,82
4							395,78

2.2. Estimación de la Incertidumbre Estandar del Volumen del Molde

Descripción	Mediciones				
	1	2	3	4	5
Masa del molde vacío (g)	4054	4054	4054	4054	4054
Masa de la Placa de Vidrio (g)	4239	4239	4239	4239	4239
Masa molde + agua + placa de vidrio (g)	5176	5176	5176	5176	5176
Masa del agua (g)	937	937	937	937	937
Temperatura del agua (°C)	17,0	17,0	17,1	17,1	17,2
Densidad del agua (g/cm³)	0,9988	0,9988	0,9988	0,9988	0,9987
Volumen del agua (cm³)	938,1	938,1	938,2	938,2	938,2
Promedio	938,2				
DS	0,0548				
Incertidumbre u(v)	0,0245				

2.3. Estimación de la Incertidumbre Estándar de la Densidad Humeda (g/cm³)

Magnitud, Xi		Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
-	Masa molde - Mmd	4054	0,434099	Normal	1040,47	0,010453	0,004537
-	Volumen molde - V	938,2	0,024495	Normal	4	-0,002319	0,000057
1	Masa del molde y muestra húmeda - Mt	6095	0,516036	Normal	407,49	0,010453	0,005394
2		6167	0,519241		398,55	0,010453	0,005427
3		6198	0,520626		394,82	0,010453	0,005442
4		6190	0,520268		395,78	0,010453	0,005438
1	Incertidumbre combinada u(c) de densidad húmeda, en g/cm ³						0,007049
2							0,007074
3							0,007086
4							0,007083
1	Grados de libertad efectivo vef						993,56
2							969,17
3							958,90
4							961,55

4. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DEL PESO UNITARIO SECO (PUS)

Valores de incertidumbre para la medición del peso unitario seco para cada molde							
Magnitud, Xi		Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)
1	Densidad húmeda - ρm	2,175	0,007049	Normal	993,56	9,465830	0,066723
2		2,252	0,007074		969,17	9,277767	0,065635
3		2,285	0,007086		958,90	9,130912	0,064698
4		2,277	0,007083		961,55	8,947628	0,063374
1	Contenido de humedad - w	3,6	0,003317	Normal	1288,3	0,020269	0,000067
2		5,7	0,003319		1267,5	0,020158	0,000067
3		7,4	0,003601		1424,2	0,019812	0,000071
4		9,6	0,003565		1317,8	0,018953	0,000068
1	Incertidumbre combinada u(c) del Peso unitario seco, en kN/m ³						0,066723
2							0,065635
3							0,064698
4							0,063374
1	Grados de libertad efectivo vef						993,6
2							969,2
3							958,9
4							961,5

5. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COBINADA DEL PESO UNITARIO SECO MÁXIMO

Presupuesto de incertidumbre para la medición del peso unitario seco máximo (PUSM)						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
γ_1	20,600	0,066723	993,6	1	0,066723	23,5
γ_2	20,900	0,065635	969,2	1	0,065635	23,2
γ_3	20,860	0,064698	958,9	1	0,064698	22,8
γ_4	20,360	0,063374	961,5	1	0,063374	22,4
θ_{rep}	0,046	0,023	19	1	0,023	8,1
Incertidumbre combinada			u_c		0,13	
Grados de libertad efectivos			ν_{ef}		3442,4	
Factor de cobertura			k		2,00	
Incertidumbre expandida			U		0,26	

3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR DEL CONTENIDO DE HUMEDAD (%w)

3.1. Estimación de la Incertidumbre Estandar de la Masa

Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)	
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara - Mc							
1	89,61						
2	81,16	-	-	-	-	-	
3	83,98						
4	93,22						
1	0,012787	0,006393	Normal	100	1	0,006393	
2	0,012762	0,006381		100	1	0,006381	
3	0,012770	0,006385		100	1	0,006385	
4	0,012798	0,006399		100	1	0,006399	
1	0,000220	0,000127	Rectangular	∞	1	0,000127	
2	0,000200	0,000115		∞	1	0,000115	
3	0,000207	0,000119		∞	1	0,000119	
4	0,000229	0,000132		∞	1	0,000132	
-	Resolución (Rb)	0,01	Rectangular	∞	1	0,002887	
-	Linealidad (Lb)	0,0115	Rectangular	∞	1	0,006640	
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	Rectangular	∞	1	0,011547	
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,015055
2							0,015049
3							0,015051
4							0,015057
1	Grados de libertad efectivo ν_{ef}						3074,4
2							3093,8
3							3087,5
4							3065,6

Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra húmeda - Mcms							
1		880,72					
2	Masa de la tara y muestra húmeda - Mcms	898,95	-	-	-	-	-
3		842,74					
4		894,18					
1	Calibración (ICb)	0,022320	0,011160	Normal	100	1	0,011160
2		0,022635	0,011317		100	1	0,011317
3		0,021671	0,010836		100	1	0,010836
4		0,022552	0,011276		100	1	0,011276
1	Corrección (Cb)	0,002167	0,001251	Rectangular	∞	1	0,001251
2		0,002211	0,001277		∞	1	0,001277
3		0,002073	0,001197		∞	1	0,001197
4		0,002200	0,001270		∞	1	0,001270
-	Resolución (Rb)	0,01	0,002887	Rectangular	∞	1	0,002887
-	Linealidad (Lb)	0,0115	0,006640	Rectangular	∞	1	0,006640
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	0,011547	Rectangular	∞	1	0,011547
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,017660
2							0,017761
3							0,017453
4							0,017735
1	Grados de libertad efectivo vef						627,0
2							606,6
3							673,0
4							611,8
Valores de incertidumbre para la medición de la masa de la tara y muestra seca - Mcds							
1		853,01					
2	Masa de la tara y muestra seca - Mcds	854,67	-	-	-	-	-
3		790,15					
4		823,83					
1	Calibración (ICb)	0,021846	0,010923	Normal	100	1	0,010923
2		0,021874	0,010937		100	1	0,010937
3		0,020790	0,010395		100	1	0,010395
4		0,021352	0,010676		100	1	0,010676
1	Corrección (Cb)	0,002098	0,001212	Rectangular	∞	1	0,001212
2		0,002102	0,001214		∞	1	0,001214
3		0,001944	0,001122		∞	1	0,001122
4		0,002027	0,001170		∞	1	0,001170
-	Resolución (Rb)	0,01	0,002887	Rectangular	∞	1	0,002887
-	Linealidad (Lb)	0,0115	0,006640	Rectangular	∞	1	0,006640
-	Exentricidad (Ex _b)	0,02	0,011547	Rectangular	∞	1	0,011547
1	Incertidumbre estándar combinada (uc) en g						0,017508
2							0,017517
3							0,017177
4							0,017352

1		660,1
2		658,0
3	Grados de libertad efectivo ν_{ef}	745,7
4		697,9

3.2. Estimación de la Incertidumbre Estándar del Contenido de Humedad (w)

Valores de incertidumbre para la medición del contenido de humedad para cada molde							
Magnitud, Xi	Valor Estimado, xi	Incertidumbre estándar, u(xi)	Distribución de Probabilidad	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sensibilidad, Ci	Contribución a la Incertidumbre, Ci*u(xi)	
1		89,61		3074,4	-0,004755	7,158E-05	
2	Masa de la tara - Mc	81,16	Normal	3093,8	-0,007401	1,114E-04	
3		83,98		3087,5	-0,010546	1,587E-04	
4		93,22		3065,6	-0,013179	1,984E-04	
1				880,72		627,0	0,130993
2	Mas de la tara y muestra húmeda - Mcms	898,95	Normal	606,6	0,129281	2,296E-03	
3		842,74		673,0	0,141609	2,471E-03	
4		894,18		611,8	0,136872	2,427E-03	
1				853,01		660,1	0,135748
2	Masa de tara y muestra seca - Mcds	854,67	Normal	658,0	0,136682	2,394E-03	
3		790,15		745,7	0,152155	2,614E-03	
4		823,83		697,9	0,150051	2,604E-03	
1		Incertidumbre combinada u(c) de Humedad					
2	3,319E-03						
3	3,601E-03						
4	3,565E-03						
1	Grados de libertad efectivo ν_{ef}						1288,3
2							1267,5
3							1424,2
4							1317,8

3.3. ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COBINADA DEL ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD (OCH)

Presupuesto de incertidumbre para la medición del Óptimo contenido de humedad (OCH)						
Magnitud, Xi	Estimación, xi	Incertidumbre estándar u(xi)	Grados de libertad efectivos	Coefficientes de Sencibilidad, Ci	Ci*u(xi)	Contribución Relativa (%)
w1	3,6	0,003317	1288,3	1	0,003317	3,0
w2	5,7	0,003319	1267,5	1	0,003319	3,0
w3	7,4	0,003601	1424,2	1	0,003601	3,2
w4	9,6	0,003565	1317,8	1	0,003565	3,2
θ_{rep}	0,1942	0,0971	19	1	0,0971	87,6
Incertidumbre combinada			u_c		0,1	
Grados de libertad efectivos			ν_{ef}		19,2	
Factor de cobertura			k		2,14	
Incertidumbre expandida			U		0,2	

ANEXO.4. CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN DE EQUIPOS