

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**“ANÁLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE LÍMITE LÍQUIDO Y
LÍMITE PLÁSTICO SEGÚN LA NORMA ASTM D4318 EN
COMPARACIÓN CON LA NORMA BS 1377:1990 EN SUELOS DE
DIFERENTE PLASTICIDAD”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PAOLA MARITSA LLERENA BONILLA

paola.llerena@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA, MBA.

german.luna@epn.edu.ec

**CODIRECTOR: ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS
TRONCOSO, MSc.**

mercedes.villacis@epn.edu.ec

Quito, junio 2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, **Llerena Bonilla Paola Maritsa**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional, y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Paola Maritsa Llerena Bonilla

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Paola Maritsa Llerena Bonilla, bajo nuestra supervisión.

Ing. Germán Vinicio Luna Hermosa, MBA.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Eugenia de las Mercedes Villacis Troncoso, MSc.
CODIRECTORA DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme alcanzar la meta de graduarme de la Escuela Politécnica Nacional, a mis padres por su apoyo incondicional, por ser mi fortaleza y motivación, a mi hermano por ayudarme en todo lo que he necesitado, a mis abuelitos Luis, Teresa, Blanca y Amable, quienes siempre han seguido cada paso de mi vida con mucho cariño, a mi tía Margarita por su cariño, comprensión y apoyo, a mi tío Álvaro por su cariño, consejos e impresiones, a mi flaca quien siempre será un ejemplo y una guía en mi vida, a Mathías y Mayte por ser luz y alegría cada día.

Agradezco a mis amigas Sofy y Eve, por enseñarme el valor de una amistad que trasciende de distancia y tiempo, a mis amigos Francisco, Sebas, Alex, Skarlet y Migue con quienes compartí mil cosas, buenas y malas, la u no hubiese sido lo mismo sin ustedes.

Agradezco a mi director de proyecto Ing. Germán Luna y codirectora Ing. Mercedes Villacis por el apoyo y tiempo brindado para la ejecución de este trabajo, a cada una de las personas que forman parte del LEMSUR por toda la ayuda brindada.

DEDICATORIA

A mis padres Maritsa y Marcelo, son mi mayor inspiración y apoyo, me siento profundamente agradecida por todo lo que me han dado y porque siempre han creído en mí, este sueño hecho realidad es gracias a su esfuerzo y amor.

A mi hermano Diego, hemos compartido todo en esta vida, los hilos de nuestra existencia siempre estarán entrelazados, nunca podré sentirme completamente sola sabiendo que existes tú.

A Papá Lu, seguiré cumpliendo sueños y tú estarás en algún lugar sonriendo, te llevo siempre en mi corazón.

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADACEMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
LISTA DE CONTENIDO.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE TABLAS.....	XV
RESUMEN.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
PRESENTACIÓN.....	XX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.1.1 HIPÓTESIS	2
1.2 OBJETIVOS	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	4
CAPÍTULO 2	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO	6
2.2 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA	7
2.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CON MALLAS	7

2.3	CONSISTENCIA DEL SUELO.....	10
2.4	LÍMITES DE ATTERBERG.....	11
2.4.1	LÍMITE LÍQUIDO (LL).....	11
2.4.1.1	Ensayos para determinar el límite líquido.....	11
2.4.1.1.1	Ensayo de Copa de Casagrande.....	11
2.4.1.1.2	Ensayo de Penetrómetro Cónico.....	15
2.4.2	LÍMITE PLÁSTICO (LP).....	20
2.4.3	ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP).....	21
2.4.3.1	Carta de plasticidad.....	21
2.4.4	LIMITACIONES DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG.....	23
2.5	CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	23
2.5.1	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	23
2.6	IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN ANALÍTICA.....	27
2.7	PRINCIPIOS DE UN ENSAYO DE LABORATORIO.....	27
2.8	VALIDACIÓN DE UN MÉTODO.....	28
2.8.1	CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO ANALIZADAS PARA LA VALIDACIÓN DE UN MÉTODO.....	29
2.8.2	PLAN E INFORME DE VALIDACIÓN.....	33
2.8.3	PASOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN.....	33
2.9	INCERTIDUMBRE.....	34
2.9.1	ERROR E INCERTIDUMBRE.....	34
2.9.2	APLICACIONES DE LA INCERTIDUMBRE.....	35
2.9.3	INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR.....	35
2.9.3.1	Incertidumbre tipo A.....	35
2.9.3.2	Incertidumbre tipo B.....	36
2.9.4	INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA.....	37
2.9.5	INCERTIDUMBRE EXPANDIDA.....	38

2.9.6	EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE	38
2.10	ESTADÍSTICA BÁSICA.....	39
2.10.1	CONCEPTOS BÁSICOS.....	39
2.10.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE POSICIÓN.....	40
2.10.2.1	Media (\bar{x}).....	40
2.10.3	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE DISPERSIÓN O VARIABILIDAD	41
2.10.3.1	Rango.....	41
2.10.3.2	Varianza muestral (s^2).....	41
2.10.3.3	Desviación estándar (σ, s)	42
2.10.3.4	Coeficiente de Variación (r).....	43
2.10.4	NIVEL DE CONFIANZA	43
2.10.5	INTERVALO DE CONFIANZA.....	44
2.10.6	PRUEBA T DE STUDENT.....	44
2.10.7	PRUEBA F DE FISHER.....	46
2.10.8	ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA	46
	CAPÍTULO 3	50
	METODOLOGÍA DE ENSAYOS	50
3.1	MUESTRAS A ENSAYAR	50
3.2	ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL.....	51
3.2.1	EQUIPO.....	51
3.2.2	PROCEDIMIENTO	52
3.2.3	TRATAMIENTO DE RESULTADOS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD	52
3.2.4	RESULTADOS OBTENIDOS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL.....	53
3.3	Ensayos para límite líquido.....	54
3.3.1	ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE COPA DE CASAGRANDE	54

3.3.1.1	Equipo	54
3.3.1.2	Preparación de la muestra.....	55
3.3.1.3	Procedimiento.....	56
3.3.1.4	Tratamiento de resultados	58
3.3.1.5	Resultados obtenidos para límite líquido mediante Copa de Casagrande.....	60
3.3.2	ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE PENETRÓMETRO CÓNICO	61
3.3.2.1	Equipo y materiales	61
3.3.2.2	Preparación de la muestra.....	63
3.3.2.3	Procedimiento.....	63
3.3.2.4	Tratamiento de resultados	64
3.3.2.5	Resultados obtenidos para límite líquido mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico.....	66
3.4	ENSAYOS PARA LÍMITE PLÁSTICO	67
3.4.1	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE MÉTODO DE ROLLOS.....	67
3.4.1.1	Equipo	67
3.4.1.2	Preparación de la muestra.....	67
3.4.1.3	Procedimiento.....	68
3.4.1.4	Tratamiento de datos.....	69
3.4.1.5	Resultados obtenidos para límite plástico mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm.....	71
3.4.2	DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE PENETRÓMETRO CÓNICO	72
3.4.2.1	Equipo	72
3.4.2.2	Procedimiento.....	73
3.4.2.3	Tratamiento de resultados	75

3.4.2.4	Resultados obtenidos para límite plástico mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico.....	77
3.5	ÍNDICE DE PLASTICIDAD	78
3.5.1	RESULTADOS OBTENIDOS PARA ÍNDICE DE PLASTICIDAD	79
3.6	ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO	81
3.6.1	EQUIPO.....	81
3.6.2	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	82
3.6.3	PROCEDIMIENTO	82
3.6.4	TRATAMIENTO DE RESULTADOS.....	84
3.6.5	RESULTADOS OBTENIDOS PARA GRANULOMETRÍA	86
3.7	ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS SISTEMA SUCS	92
3.7.1	DATOS NECESARIOS.....	92
3.7.2	PROCEDIMIENTO	93
3.7.3	RESULTADOS OBTENIDOS PARA CLASIFICACIÓN DE SUELOS	97
CAPÍTULO 4		98
ANÁLISIS DE RESULTADOS		98
4.1	COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS ESTUDIADOS	98
4.2	ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE	103
4.2.1	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE ENSAYO DE COPA DE CASAGRANDE	103
4.2.2	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE ENSAYO DE ROLLOS DE 3.2 mm.....	105
4.2.3	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE ENSAYO DE PENETRÓMETRO CÓNICO.....	108
4.2.4	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE ENSAYO DE PENETRÓMETRO CÓNICO.....	110
4.3	DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN PARA LOS MÉTODOS TRADICIONALES	112

4.3.1	ESTABLECER LA NECESIDAD ANALÍTICA	113
4.3.2	MÉTODO.....	113
4.3.3	BORRADOR DEL PROCEDIMIENTO.....	113
4.3.3.1	Objeto	113
4.3.3.2	Alcance.....	114
4.3.3.3	Referencias	114
4.3.3.4	Descripción.....	114
4.3.4	ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN	116
4.3.5	OBJETIVOS PARA LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN.....	116
4.3.6	DISEÑO EXPERIMENTAL Y ESTADÍSTICO	117
4.3.7	COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS PARA LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN.....	123
4.3.8	DISEÑO FINAL PARA EL PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN.....	124
	CAPÍTULO 5	125
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	125
5.1	CONCLUSIONES.....	125
5.2	RECOMENDACIONES	127
	BIBLIOGRAFÍA	129
	ANEXOS	132

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Tamaños de partículas de suelo	6
<i>Figura 2.</i> Tamaños estándar de tamices para suelos finos	7
<i>Figura 3.</i> Conjunto de tamices para una prueba de laboratorio.....	8
<i>Figura 4.</i> Curva de distribución granulométrica	8
<i>Figura 5.</i> Definición D10, D30, D60	10
<i>Figura 6.</i> Límites de consistencia del suelo.....	10
<i>Figura 7.</i> Dimensiones estándar de equipo	12
<i>Figura 8.</i> Copa de Casagrande Laboratorio LEMSUR	12
<i>Figura 9.</i> Determinación del límite líquido del suelo	13
<i>Figura 10.</i> Cono ruso.....	15
<i>Figura 11.</i> Cono de Georgia.....	16
<i>Figura 12.</i> Cono Hindú	16
<i>Figura 13.</i> Penetrómetro Cónico Laboratorio LEMSUR	17
<i>Figura 14.</i> Dimensiones estándar del Penetrómetro Cónico	17
<i>Figura 15.</i> Límite plástico	20
<i>Figura 16.</i> Carta de plasticidad.....	22
<i>Figura 17.</i> Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (Basado en el material pasante del tamiz N°75)	24
<i>Figura 18.</i> Diagrama de flujo para gravas y arenas.....	26
<i>Figura 19.</i> Diagrama de flujo para limos inorgánicos y suelos arcillosos	25
<i>Figura 20.</i> Diagrama de flujo para suelo limoso orgánico y suelos arcillosos	26
<i>Figura 21.</i> Exactitud, precisión y veracidad Fuente: (SAE, 2016)	30
<i>Figura 22.</i> Representación gráfica de repetibilidad	31
<i>Figura 23.</i> Representación gráfica del concepto de reproducibilidad.....	32
<i>Figura 24.</i> Incertidumbre tipo B para una balanza.....	36
<i>Figura 25.</i> Error aleatorio y error sistemático	37
<i>Figura 26.</i> Toma de muestras	50
<i>Figura 27.</i> Equipo utilizado en el ensayo de Copa de Casagrande.....	55
<i>Figura 28.</i> Preparación de la mezcla para ensayo de Copa de Casagrande	55
<i>Figura 29.</i> Colocación de la muestra en la Copa de Casagrande	56

<i>Figura 30.</i> Realización del surco	56
<i>Figura 31.</i> Ejecución del ensayo de Copa de Casagrande	57
<i>Figura 32.</i> Muestras tomadas.....	57
<i>Figura 33.</i> Cono de acero inoxidable del laboratorio LEMSUR	61
<i>Figura 34.</i> Especificaciones de penetrómetro cónico	61
<i>Figura 35.</i> Recipiente metálico estándar para ensayo	62
<i>Figura 36.</i> Cronómetro digital.....	62
<i>Figura 37.</i> Colocación de la muestra en recipiente metálico	63
<i>Figura 38.</i> Ajuste del cono con la superficie de la muestra	63
<i>Figura 39.</i> Muestras a ensayar.....	64
<i>Figura 40.</i> Preparación de la muestra para ensayo de límite plástico.....	67
<i>Figura 41.</i> Formación de las esferas	68
<i>Figura 42.</i> Esferas de un centímetro cúbico.....	68
<i>Figura 43.</i> Rollos de un diámetro aproximado de 3.2 mm.....	68
<i>Figura 44.</i> Muestras ensayadas	69
<i>Figura 45.</i> Peso añadido al cono del penetrómetro cónico	72
<i>Figura 46.</i> Superficie enrasada para ensayo de límite plástico.....	73
<i>Figura 47.</i> Ajuste de la superficie de la muestra con el cono	74
<i>Figura 48.</i> Muestras a ensayar.....	74
<i>Figura 49.</i> Gráfica para obtención de límite plástico	76
<i>Figura 50.</i> Tamices utilizados en el laboratorio “LEMSUR”	81
<i>Figura 51.</i> Lavado del material a tamizar	82
<i>Figura 52.</i> Material a ser tamizado.....	82
<i>Figura 53.</i> Proceso de tamizado manualmente	83
<i>Figura 54.</i> Material retenido en cada tamiz	83
<i>Figura 55.</i> Curva Granulométrica San Isidro	86
<i>Figura 56.</i> Curva Granulométrica de Miraflores.....	87
<i>Figura 57.</i> Curva Granulométrica de Guanguiltagua	88
<i>Figura 58.</i> Curva Granulométrica de la muestra del Carmen Bajo.....	90
<i>Figura 59.</i> Curva granulométrica de la muestra del Comité del Pueblo	91
<i>Figura 60.</i> Clasificación SUCS de la muestra de San Isidro I	93
<i>Figura 61.</i> Carta de plasticidad para la muestra de San Isidro.....	93
<i>Figura 62.</i> Clasificación SUCS de la muestra de San Isidro II	93

<i>Figura 63.</i> Clasificación SUCS de la muestra de Miraflores I.....	93
<i>Figura 64.</i> Carta de Plasticidad de la muestra de Miraflores.....	94
<i>Figura 65.</i> Clasificación SUCS de la muestra de Miraflores II.....	94
<i>Figura 66.</i> Clasificación SUCS de la muestra de Guanguiltagua I.....	94
<i>Figura 67.</i> Carta de plasticidad de la muestra de Guanguiltagua.....	94
<i>Figura 68.</i> Clasificación SUCS de la muestra de Guanguiltagua II.....	95
<i>Figura 69.</i> Clasificación SUCS de la muestra del Carmen Bajo I.....	95
<i>Figura 70.</i> Carta de plasticidad de la muestra del Carmen Bajo.....	95
<i>Figura 71.</i> Clasificación SUCS de la muestra del Carmen Bajo II.....	95
<i>Figura 72.</i> Clasificación SUCS de la muestra del Comité del Pueblo I.....	96
<i>Figura 73.</i> Carta de plasticidad de la muestra del Comité del Pueblo.....	96
<i>Figura 74.</i> Clasificación SUCS de la muestra del Comité del Pueblo II.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Factor k para el cálculo de límite líquido</i>	14
Tabla 2. <i>Factor k de acuerdo al contenido de humedad de la muestra</i>	19
Tabla 3. <i>Datos principales para prueba T de Student</i>	45
Tabla 4. <i>Datos necesarios para un análisis de varianza ANOVA</i>	47
Tabla 5. <i>Sitios escogidos para extracción de muestras</i>	51
Tabla 6. <i>Datos iniciales para el primer ensayo</i>	53
Tabla 7. <i>Datos iniciales para el segundo ensayo</i>	53
Tabla 8. <i>Resultados de contenido de humedad para cada muestra</i>	54
Tabla 9. <i>Datos iniciales para el primer ensayo de Copa de Casagrande</i>	59
Tabla 10. <i>Datos iniciales para el segundo ensayo de Copa de Casagrande</i>	59
Tabla 11. <i>Límite líquido obtenido mediante ensayo de Copa de Casagrande</i>	60
Tabla 12. <i>Datos iniciales para el primer ensayo</i>	65
Tabla 13. <i>Datos iniciales para el segundo ensayo</i>	65
Tabla 14. <i>Límite líquido obtenido mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico</i> ..	66
Tabla 15. <i>Datos iniciales para el primer ensayo</i>	70
Tabla 16. <i>Datos iniciales para el segundo ensayo</i>	70
Tabla 17. <i>Límite plástico obtenido mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm</i>	71
Tabla 18. <i>Datos para el primer ensayo</i>	75
Tabla 19. <i>Datos para el segundo ensayo</i>	75
Tabla 20. <i>Datos para el tercer ensayo</i>	76
Tabla 21. <i>Límite plástico obtenido mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico</i> .	77
Tabla 22. <i>Índice de plasticidad mediante métodos tradicionales</i>	79
Tabla 23. <i>Índice de plasticidad mediante ensayo de Penetrómetro Cónico</i>	80
Tabla 24. <i>Granulometría muestra de San Isidro</i>	84
Tabla 25. <i>Resultados granulométricos de San Isidro</i>	86
Tabla 26. <i>Granulometría de la muestra de Miraflores</i>	87
Tabla 27. <i>Resultados granulométricos de la muestra de Miraflores</i>	87
Tabla 28. <i>Granulometría de la muestra de Guangüiltagua</i>	88
Tbla 29. <i>Resultados granulométricos de la muestra de Guangüiltagua</i>	89
Tabla 30. <i>Granulometría de la muestra del Carmen Bajo</i>	89
Tabla 31. <i>Resultados granulométricos de la muestra del Carmen Bajo</i>	90

Tabla 32. <i>Granulometría de la muestra del Comité del Pueblo</i>	91
Tabla 33. <i>Resultados granulométricos de la muestra del Comité del Pueblo</i>	91
Tabla 34. <i>Datos para la clasificación de suelos sistema SUCS</i>	92
Tabla 35. <i>Resultados de la clasificación SUCS para cada muestra</i>	97
Tabla 36. <i>Parámetros estadísticos de posición y dispersión para ensayo de Límite Líquido</i>	98
Tabla 37. <i>Parámetros estadísticos de posición y dispersión para ensayo de límite plástico</i>	99
Tabla 38. <i>F calculado para cada conjunto de datos</i>	100
Tabla 39. <i>Valor T calculado y desviación estándar para límite líquido</i>	100
Tabla 40. <i>Valor T calculado y desviación estándar para límite plástico</i>	101
Tabla 41. <i>Intervalo de confianza para obtención de límite líquido</i>	101
Tabla 42. <i>Intervalo de confianza para obtención de límite plástico</i>	102
Tabla 43. <i>Evaluación de la incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande</i>	105
Tabla 44. <i>Expresión de incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande</i>	105
Tabla 45. <i>Evaluación de la incertidumbre para límite plástico mediante método de rollos de 3.2 mm</i>	107
Tabla 46. <i>Expresión de incertidumbre para límite plástico mediante rollos de 3.2 mm</i>	108
Tabla 47. <i>Evaluación de la incertidumbre para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico</i>	110
Tabla 48. <i>Expresión de incertidumbre para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico</i>	110
Tabla 49. <i>Evaluación de la incertidumbre para límite plástico mediante Penetrómetro Cónico</i>	112
Tabla 50. <i>Expresión de incertidumbre para límite plástico mediante penetrómetro cónico</i>	112
Tabla 51. <i>Rangos para límite líquido y límite plástico</i>	114
Tabla 52. <i>Datos registrados y parámetros calculados</i>	116
Tabla 53. <i>Datos para el análisis ANOVA de Miraflores</i>	118
Tabla 54. <i>Análisis de varianzas entre grupos DCMB de Miraflores</i>	119

Tabla 55. <i>Análisis de varianza dentro de cada grupo DCMW de Miraflores</i>	119
Tabla 56. <i>Repetibilidad y reproducibilidad para la muestra de Miraflores</i>	120
Tabla 57. <i>Repetibilidad y reproducibilidad para límite líquido mediante Copa de Casagrande</i>	120
Tabla 58. <i>Repetibilidad y reproducibilidad para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico</i>	121
Tabla 59. <i>Repetibilidad y reproducibilidad para límite plástico mediante ensayo de rollos de 3.2mm</i>	121
Tabla 60. <i>Repetibilidad y reproducibilidad para límite plástico mediante ensayo de Penetrómetro Cónico</i>	122

RESUMEN

El trabajo técnico experimental presentado a continuación, tiene como objeto realizar una correlación entre los métodos empleados para la determinación de Límites de Atterberg, haciendo contraste entre los métodos tradicionales basados en la Norma ASTM D4318 “Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico, e Índice de Plasticidad de Suelos” y los métodos usados con Penetrómetro Cónico basados en la Norma BS 1377:1990 “Métodos de Ensayo para Suelos con fines de Ingeniería Civil” y el libro de Braja Das “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, cuarta edición.

Además, se realizó un proceso de cálculo de incertidumbre para cada metodología desarrollada, para obtener este propósito se realizaron una serie de ensayos experimentales en diferentes muestras, las cuales fueron tratadas estadísticamente, permitiendo así el análisis de diferentes parámetros estadísticos y parámetros de validación.

Como resultado de este trabajo, se pudo conocer las diferentes alternativas y equipos que son utilizados actualmente para la determinación de límite líquido y límite plástico, evidenciando que el uso del Penetrómetro Cónico para el cálculo de límite líquido resulta ser factible mediante este método. Por otra parte, se pudo conocer que, para la determinación de límite plástico, el método tradicional sigue siendo el más apropiado.

Palabras clave: Correlación, límites, validación, incertidumbre.

ABSTRACT

The experimental technical work presented below aims to perform a correlation between the methods used to obtain Atterberg Limits, contrasting between the traditional methods based on the ASTM D4318 Standard "Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Soil Plasticity Index" and the methods used with a Cone Penetrometer based on the BS 1377:1990 Standard "Test Methods for Soils for Civil Engineering Purposes" and the book by Braja Das "Fundamentals of Geotechnical Engineering", fourth edition.

In addition, an uncertainty calculation process was carried out for each developed methodology, to obtain this purpose, a series of experimental tests were carried out on different samples, which were treated statistically, thus allowing the analysis of different statistical parameters and validation parameters.

As a result of this work, it was possible to know the different alternatives and equipment that are currently used for the determination of the liquid limit and plastic limit, showing that the use of the Cone Penetrometer for the calculation of the liquid limit turns out to be feasible by means of this method. On the other hand, it was found that, for the calculation of the plastic limit, the traditional method is still the most appropriate.

Keywords: Correlation, limits, validation, uncertainty.

PRESENTACIÓN

El presente trabajo consta de cinco capítulos como se indica a continuación:

CAPÍTULO I: Se exponen generalidades del tema que se va a desarrollar: introducción, antecedentes, hipótesis, objetivos, alcance y justificación.

CAPÍTULO II: Se presentan nociones esenciales respecto al tamaño de partículas del suelo, consistencia del suelo, límites de Atterberg y clasificación de suelos. Además, se presentan aspectos fundamentales respecto a la estadística básica, validación de métodos e incertidumbre.

CAPITULO III: Se muestran los lugares escogidos para la extracción de muestras a ensayar, también se describen los ensayos realizados para la determinación de humedad natural, límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y clasificación de suelos, cada ensayo con sus respectivos resultados.

CAPITULO IV: Se describe el tratamiento estadístico de los resultados alcanzados y se realiza un diseño de procedimiento de validación para los métodos tradicionales.

CAPITULO V: Se presentan las conclusiones y recomendaciones del trabajo desarrollado.

Finalmente, se añaden las referencias bibliográficas y anexos que sustentan el desarrollo de este trabajo.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Los suelos plásticos modifican su consistencia y comportamiento mecánico en función de su naturaleza y contenido de agua, de acuerdo con este último parámetro, los suelos plásticos tienen cuatro estados: líquido, plástico, semisólido y sólido, de tal forma que un suelo plástico al estar seco está en estado sólido y conforme va aumentando el contenido de agua, cambia su consistencia alcanzando el estado líquido. Estos rangos de humedad que dividen a cada estado son denominados límites de Atterberg (Franch, 2013).

En 1911, Albert Mauritz Atterberg, planteó los métodos para determinar límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, posterior a esto, Arthur Casagrande elaboró un dispositivo mecánico, el cual permitiría reducir los errores del operador, de tal forma Arthur Casagrande creó un aparato normalizado conocido hasta el día de hoy como Copa de Casagrande (Duarte & Rojas, 2017).

Las normas de todo el mundo acogieron al ensayo de Copa de Casagrande y al método de los rollos de 3mm, como métodos estandarizados para determinar el límite líquido y el límite plástico respectivamente. Los dos procedimientos no han sufrido grandes variaciones, sin embargo, al ser métodos antiguos existen diversos factores que influyen en los resultados al momento de su ejecución (Duarte & Rojas, 2017).

Desde años atrás se han venido realizando métodos alternativos para esta determinación, el Instituto Tecnológico de Georgia propuso en 1951 al instrumento conocido como Cono de Georgia, posteriormente el Indian Central Road Research Institute implementó el Cono Hindú (Rabat, 2016). Actualmente en diversos lugares del mundo como China, India, Brasil, Francia y los Estados Unidos, se utiliza como alternativa para la obtención de límite líquido el penetrómetro cónico, ya que su uso

simplifica complicaciones presentes en los métodos tradicionales (Duarte & Rojas, 2017).

El presente trabajo tiene como propósito obtener límite líquido y límite plástico, a través del ensayo de copa de Casagrande y método de rollos de 3.2 mm respectivamente, siguiendo los lineamientos de la metodología tradicional establecida en la Norma ASTM D4318. A su vez, se plantea determinar el límite líquido a través del Penetrómetro Cónico, con la metodología establecida en la Norma Británica BS 1377:1990. Además, se plantea obtener límite plástico siguiendo lo establecido por Braja Das (Das, 2013) en el libro “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica” cuarta edición. Cabe mencionar que el uso de Penetrómetro Cónico para determinar límite líquido ha sido adoptado en varios países en los últimos años; sin embargo, el planteamiento de obtener límite plástico con el mismo instrumento es una propuesta reciente. Finalmente, se procederá a realizar un análisis comparativo y crítico entre las dos metodologías.

1.1.1 HIPÓTESIS

Los resultados obtenidos para determinar el límite líquido y el límite plástico haciendo uso del Penetrómetro Cónico, pueden minimizar los errores e incertidumbre presentes en la metodología tradicional, además de proporcionar una mayor eficiencia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar una comparación de metodologías para la obtención de límite líquido y límite plástico entre la metodología tradicional y el uso del Penetrómetro Cónico, en suelos de diferente plasticidad, poniendo mayor énfasis en la segunda metodología para comprobar la confiabilidad de este.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer las diferentes alternativas y equipos utilizados actualmente para la determinación de límite líquido y límite plástico de suelos.
- Identificar cinco suelos de la ciudad de Quito, en los cuales se realizará el estudio.
- Determinar límite líquido y límite plástico a través del ensayo de Copa de Casagrande y el ensayo de rollos de 3.2 mm respectivamente.
- Determinar límite líquido y límite plástico a través del uso del Penetrómetro Cónico.
- Realizar la clasificación de suelos de acuerdo con el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS.
- Realizar un análisis de la incertidumbre presente en cada método y analizar los diferentes factores que tienen influencia en los dos métodos, mediante una revisión bibliográfica.
- Establecer la factibilidad de la obtención de límite líquido y límite plástico a través del Penetrómetro Cónico, en base a los resultados obtenidos en los ensayos y el procesamiento estadístico de los datos, como una alternativa a la obtención de límite líquido y límite plástico a través del ensayo de Copa de Casagrande y el ensayo de rollos de 3.2 mm respectivamente.
- Desarrollar una propuesta de procedimiento de validación para el ensayo de Copa de Casagrande y el ensayo de rollos de 3.2 mm.

1.3 ALCANCE

El presente trabajo técnico-experimental comprende la obtención de límite líquido y límite plástico, para lo cual se realizarán los ensayos haciendo referencia a la Norma ASTM D 4318, en cinco muestras de suelos de la ciudad de Quito, ejecutando 30 repeticiones de cada ensayo con cada muestra y se correlacionará con el mismo número de ensayos mediante la metodología establecida en la Norma Británica BS 1377:1990 para uso del penetrómetro cónico. El análisis comparativo entre las dos metodologías se realizará con el fin de establecer la incertidumbre presente en los ensayos. Además, se planteará una propuesta de validación para

los ensayos ejecutados bajo la norma tradicional: ensayo de Copa de Casagrande y ensayo de rollos de 3.2 mm

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en los laboratorios de suelos, los ensayos que se practican frecuentemente son los referentes a límites de Atterberg, ya que, con tan solo conocer estos parámetros, se puede tener un conocimiento claro del tipo de suelo y de sus principales características, además de que su determinación es sencilla y económica (Blázquez, 2016). Asimismo, marcan fronteras para clasificar suelos cohesivos, permitiendo prever la capacidad portante ante cargas, características de compactación, de consolidación y posibles asentamientos y expansiones (Díaz, 2017)

Albert Atterberg propuso los ensayos de límites de Atterberg, posteriormente fue introducida a la mecánica de suelos por Terzaghi y finalmente fue Arthur Casagrande quien redefinió estos ensayos para ser utilizados con propósitos ingenieriles, sin embargo, es evidente que la información referente a límites de Atterberg aún tiene un amplio campo de estudio. Por tal motivo, es necesario realizar investigaciones que permitan incorporar procedimientos más precisos o a su vez realizar la validación de los métodos ya existentes (Díaz, 2017).

La determinación de límite líquido a través del ensayo de Copa de Casagrande puede generar variabilidad e incertidumbre en los resultados arrojados, por lo cual en los últimos años se ha implementado el uso del Penetrómetro Cónico, con cual además de poder determinar el límite líquido también permite determinar el límite plástico (Díaz, 2017).

Adicionalmente, la verificación de la confiabilidad de un método es de gran utilidad para poder asegurar que los resultados obtenidos son adecuados; si un cliente encarga el desarrollo de un ensayo, está claro que espera del laboratorio la experiencia que él no tiene, por ende, el laboratorio debe responder a la

responsabilidad establecida por el cliente, entregando resultados que sean apropiados para su propósito (SAE, 2016).

La calidad de los servicios proporcionados por los laboratorios de ensayo y calibración deben ser controlados para minimizar y en lo posible eliminar errores. La Norma ISO/IEC 17025, es la referente a “Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración”, tiene las especificaciones que los laboratorios deben alcanzar, para poder avalar que trabajan cumpliendo un sistema de calidad y que son idóneos para obtener resultados válidos y reproducibles. La Norma ISO/IEC 17025 es un complemento para la Norma ISO 9001, ya que contiene especificaciones que no están cubiertas en la misma, tales como: determinación de la incertidumbre asociada a los resultados, comparaciones interlaboratorios, validación de métodos analíticos, etc (SAE, 2017).

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE SUELO

Las partículas de suelo, en función de su tamaño se pueden clasificar en: grava, arena, limo o arcilla (Das, 2013).

Las gravas están comprendidas por fragmentos de roca formadas por partículas de cuarzo, feldespato y otros minerales. Por otra parte, las arenas tienen fragmentos de cuarzo y feldespato, sin embargo, pueden presentarse partículas de otros minerales. Finalmente, la mayoría de las arcillas están formadas por minerales de arcillas, láminas microscópicas y sub microscópicas de mica y otros minerales (Das, 2013).

A continuación, se muestran los tamaños de partículas de referencia sugeridos por los sistemas de clasificación AASHTO y SUCS.

Sistema de clasificación	Tamaño del grano (mm)
Unificado	Grava: 75 mm a 4.75 mm Arena: 4.75 mm a 0.075 mm Limo y arcilla (finos): < 0.075 mm
AASHTO	Grava: 75 mm a 2 mm Arena: 2 mm a 0.05 mm Limo: 0.05 mm a 0.002 mm Arcilla: < 0.002 mm

Figura 1. Tamaños de partículas de suelo
Fuente: (Das, 2013)

2.2 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Un análisis mecánico permite conocer los diferentes tamaños de partículas presentes en los suelos. Usualmente, se emplean dos formas para conocer el tamaño de partículas de suelo, el análisis granulométrico mediante mallas se emplea para partículas gruesas (tamaños superiores a 0.075 mm de diámetro) y el análisis de hidrómetro se emplea para partículas finas (tamaños menores a 0.075 mm de diámetro) (Das, 2013).

2.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO CON MALLAS

El análisis granulométrico mediante mallas se lleva a cabo con una cantidad determinada de suelo seco, la cual debe pasar por mallas con diferentes aberturas. Se debe pesar la cantidad de suelo retenida en cada malla y determinar el porcentaje de suelo que atraviesa cada una. La Figura 2 contiene los números de mallas utilizados para el análisis de arenas y suelos finos que comprenden a este estudio (Das, 2013):

Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)
3/8"	9,500
No. 4	4,750
No. 10	2,000
No. 20	0,850
No. 40	0,425
No. 60	0,250
No. 100	0,150
No. 140	0,106
No. 200	0,075

Figura 2. Tamaños estándar de tamices para suelos finos

Fuente: (Das, 2013)



Figura 3. Conjunto de tamices para una prueba de laboratorio
Fuente: (Llerena)

Una vez que ha sido realizada la granulometría, se debe realizar una gráfica en papel semilogarítmico, tal como lo muestra la Figura 4, el diámetro de las partículas se grafica en escala logarítmica y el porcentaje de suelos finos que pasa dicho tamiz en escala aritmética. A partir de esta gráfica se obtienen el tamaño efectivo (D_{10}), el coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de graduación o curvatura (C_c) (Das, 2013).

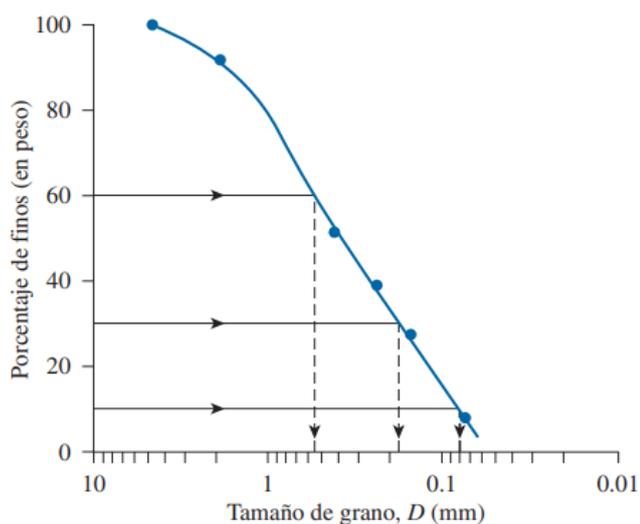


Figura 4. Curva de distribución granulométrica
Fuente: (Llerena)

-Coeficiente de uniformidad, C_u , representa la gama de tamaños de partículas existente y sirve para analizar la uniformidad del tamaño de partículas de un suelo, mientras menor sea su valor, más uniforme será el suelo, se expresa con la siguiente ecuación (Das, 2013):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

Donde:

- C_u : coeficiente de uniformidad.
- D_{60} : diámetro que corresponde al 60% más fino en la curva de distribución granulométrica
- D_{10} : Tamaño efectivo D_{10} , diámetro que corresponde al 10% más fino en la curva de distribución granulométrica.

-Coeficiente de graduación, C_c , es también conocido como un factor de forma y permite diferenciar entre suelos bien graduados y mal graduados, se expresa con la siguiente ecuación (Das, 2013):

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (2)$$

Donde:

- C_c : coeficiente de gradación.
- D_{30} : diámetro que corresponde al 30% más fino.
- D_{60} : diámetro que corresponde al 60% más fino en la curva de distribución granulométrica
- D_{10} : Tamaño efectivo D_{10} , diámetro que corresponde al 10% más fino en la curva de distribución granulométrica.

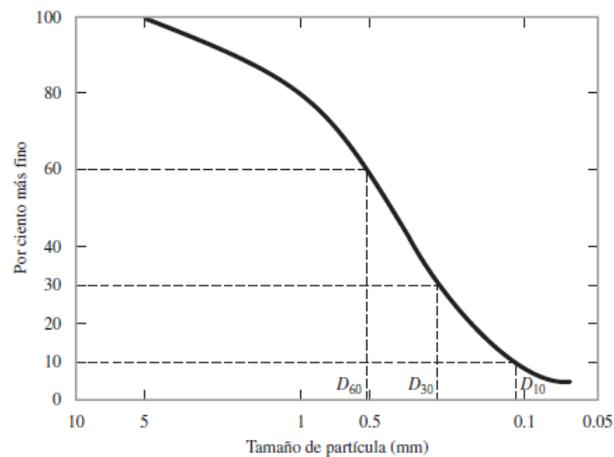


Figura 5. Definición D_{10} , D_{30} , D_{60}
Fuente: (Das, 2013)

2.3 CONSISTENCIA DEL SUELO

Según Das (2013), la facilidad con la que el suelo puede ser deformado se define como consistencia del suelo. En 1900, Albert Atterberg, diseñó un sistema para caracterizar la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. El suelo exhibe características de un sólido quebradizo cuando el contenido de humedad es bajo, caso contrario, el suelo con el agua puede fluir como un líquido cuando el contenido de humedad es alto. Por lo tanto, se definen cuatro estados básicos del suelo: sólido, semisólido, plástico y líquido.

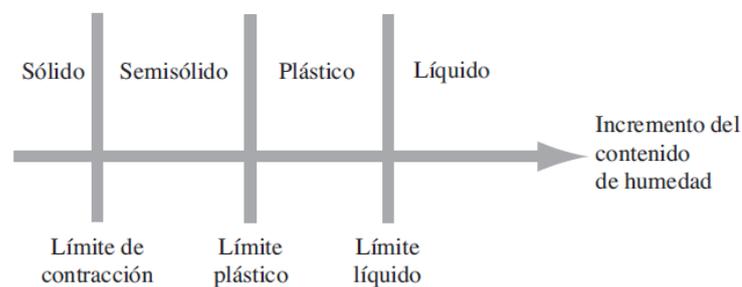


Figura 6. Límites de consistencia del suelo
Fuente: (Das, 2013)

2.4 LÍMITES DE ATTERBERG

Según la Designación D4318-17 (2017), los seis límites de consistencia para suelos cohesivos son: límite superior de flujo viscoso, límite líquido, límite viscoso, límite de cohesión, límite plástico y límite de contracción. Ingenierilmente, los límites de consistencia más utilizados son tres: límite líquido y límite plástico, y en algunas ocasiones también límite de contracción.

2.4.1 LÍMITE LÍQUIDO (LL)

EL contenido de agua de un suelo expresado en porcentaje, en el cual el suelo se encuentre entre estado semi-líquido y estado plástico, se conoce como límite líquido en suelos cohesivos (Das, 2013). De acuerdo con la Designación D4318-17 (2017) “el límite líquido es el contenido de humedad en el que se cierra un surco de 12.7 mm con 25 golpes o caídas a partir de una altura de 10mm” y se obtiene mediante el equipo de Copa de Casagrande.

2.4.1.1 Ensayos para determinar el límite líquido

2.4.1.1.1 Ensayo de Copa de Casagrande

Arthur Casagrande elaboró un dispositivo mecánico conocido como Copa de Casagrande. Según Das (2013), el mecanismo consta de una copa de latón que se deja caer sobre una base de goma dura por una leva de 10mm operada por una manivela. Para realizar la prueba se debe colocar una pasta de suelo dentro de la copa, posterior a esto se debe realizar un surco en el centro de la pasta de suelo, mediante la utilización de un ranurador estándar.

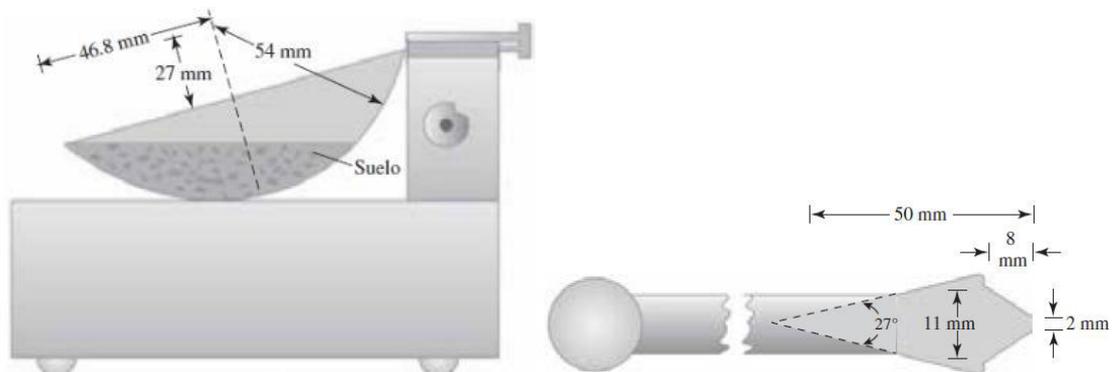


Figura 7. Dimensiones estándar de equipo
Fuente: (Das, 2013)



Figura 8. Copa de Casagrande Laboratorio LEMSUR
Fuente: (Llerena)

El cierre del surco debe ser de 12.7 mm en la pasta de suelo con 25 golpes. Ya que el resultado es difícil de conseguir en un solo intento, se realiza al menos 3 o 4 ensayos en el mismo tipo de suelo, con un número de golpes N , comprendido entre 15 y 35 y un contenido de humedad variable (Das, 2013). Los resultados obtenidos se presentan en una gráfica semi-logarítmica, siendo el eje de la humedad aritmético y el eje de número de golpes logarítmico, este gráfico es conocido como curva de flujo (Blázquez, 2016).

Existen dos métodos para obtener el valor de límite líquido a través el equipo de Copa de Casagrande y se presentan a continuación:

-Método A: Multipunto

1. Graficar en papel semilogarítmico, el contenido de humedad en las ordenadas con eje aritmético y el número de golpes en las abscisas con eje logarítmico.
2. Se realiza un ajuste a una recta a través de mínimos cuadrados.
3. El valor de límite líquido corresponde a la interpolación de la ordenada w para la abscisa $N=25$ golpes.

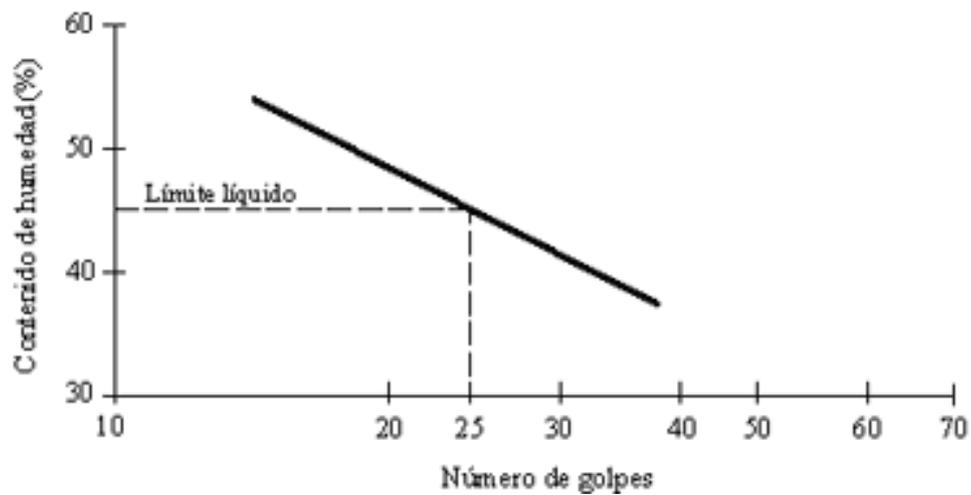


Figura 9. Determinación del límite líquido del suelo

Fuente: (Blázquez, 2016)

-Método B: Un solo punto

La ecuación utilizada para el cálculo de límite líquido mediante este método es la siguiente (Das, 2013):

$$LL_n = w_n \cdot \left(\frac{N_n}{25}\right)^{0.121} \quad (3)$$

o

$$LL_n = k \cdot w_n \quad (4)$$

Donde:

- LL_n : Límite líquido.
- N_n : Número de golpes que provocan el cierre del surco.
- w_n : Contenido de humedad para un ensayo dado expresado en porcentaje.
- k : Factor para el cálculo de límite líquido.

Tabla 1.

Factor k para el cálculo de límite líquido

Número de Golpes	K
20	0,973
21	0,979
22	0,985
23	0,99
24	0,995
25	1
26	1,005
27	1,009
28	1,014
29	1,018
30	1,022

Fuente: (ASTM Designation: D4318-17, 2017)

-Ventajas

- El método multipunto se puede adaptar a diferentes tipos de suelos, además, si se obtienen puntos superiores a 25 golpes se puede identificar un suelo “no plástico”.
- Mediante el método de un solo punto se obtienen resultados similares al método multipunto, además la variabilidad se reduce si se realizan dos mediciones. También, con un estudio previo del sitio a analizar el método multipunto puede ser más económico (Blázquez, 2016).

-Desventajas

- El método depende del operador, con lo cual se pueden presentar variaciones por el ritmo de golpeteo, por la forma en que se realiza la ranura o la apreciación que se tenga en el momento que se cierra el surco.
- Generalmente, los suelos requieren de 25 golpes para alcanzar el límite líquido, sin embargo, en ocasiones este valor puede encontrarse dentro de un rango de 11 a 39, motivo por el cual no se puede aplicar en suelos no estándar como los volcánicos.
- Al interpolar con el método multipunto, la gráfica puede llegar a ser muy variable inclusive en suelos estándar (Blázquez, 2016).

El ensayo para la obtención de límite líquido a través del uso del equipo de Copa de Casagrande es un ensayo de corte dinámico, el cual presenta diferentes inconvenientes que pueden interferir en los resultados, por tal motivo, Casagrande propuso sustituir este método, por uno de índole estático (Blázquez, 2016).

2.4.1.1.2 Ensayo de Penetrómetro Cónico

El método alternativo más estudiado a lo largo del tiempo es el ensayo con penetrómetro cónico. En un principio se utilizaba la aguja de Vicat y conos estrechos, a través de los cuales no se alcanzaban resultados apropiados. El “cono ruso” fue propuesto en 1949 por Vasilev”, en el cual el valor de límite líquido es aquel en el que la humedad corresponde a una penetración de 10 mm (Blázquez, 2016).

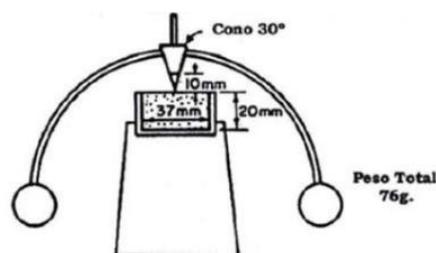


Figura 10. Cono ruso

Fuente: (Osorio, 2010)

El Instituto Tecnológico de Georgia, creó en el año de 1951, un dispositivo conocido como “cono de Georgia”. En este aparato, un peso de 75 gr empuja al cono para que penetre en el suelo. La caída es medida 10 segundos después de haber iniciado el ensayo y cuando la penetración de la punta del cono corresponde a 10 mm, el suelo alcanza el límite líquido. Se debe obtener penetraciones variando la humedad y finalmente se interpola para un valor de 10 mm (Osorio, 2010).

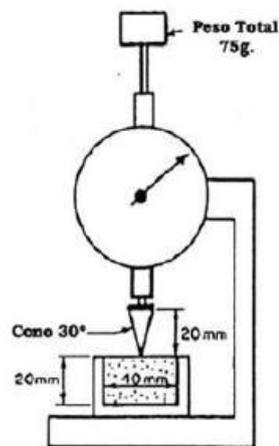


Figura 11. Cono de Georgia
Fuente: (Osorio, 2010)

En 1953, el Indian Central Road Research Institute, planteó un nuevo ensayo con el “cono hindú”, la penetración de una pulgada corresponde al límite líquido del ensayo (Blázquez, 2016).

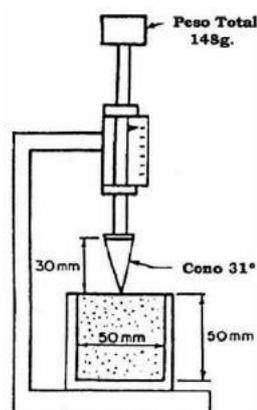


Figura 12. Cono Hindú
Fuente: (Osorio, 2010)

En la actualidad el penetrómetro cónico es el equipo más usado en continentes como Europa y Asia, el mismo está construido de acuerdo con la norma British Standard-BS 1377:1990 y comprende un sistema digital con una precisión de 0.01 mm, el cual permite medir la penetración, una base formada de hierro fundido con patas niveladoras, puesta a cero automática y dispositivo de ajuste vertical micrométrico (Blázquez, 2016).



Figura 13. Penetrómetro Cónico Laboratorio LEMSUR
Fuente: (Llerena)

De acuerdo con esta norma, el límite líquido corresponde al contenido de humedad en el cual el cono estandarizado con un ángulo con vértice de 30° y peso de 0,78 N (80gf) penetra 20 mm la muestra de suelo en un tiempo de cinco segundos, cuando el cono es soltado desde una posición conocida. Se deben realizar tres o cuatro pruebas variando el contenido de humedad (Das, 2013).

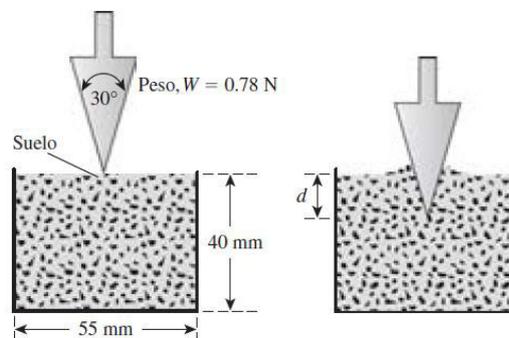


Figura 14. Dimensiones estándar del Penetrómetro Cónico
Fuente: (Das, 2013)

Existen dos métodos para la obtención de límite líquido a través del penetrómetro cónico y se presentan a continuación:

-Método A: Multipunto

Se realiza una gráfica en papel semilogarítmico, en la cual la lectura de penetraciones se representa en las abscisas con eje logarítmico y el contenido de humedad en las ordenadas con eje aritmético. Se dibuja una línea que se aproxime a los puntos dibujados, en la cual el límite líquido corresponde a una lectura de penetración de 20mm (Das, 2013).

-Método B: Un solo punto

La Norma BS 1377:1990, establece que cuando la precisión requerida no es elevada, el cálculo de límite líquido se puede realizar con un solo punto. Se obtiene mediante la multiplicación del contenido de humedad por el factor “k” correspondiente a la lectura de penetración realizada.

La ecuación que se aplica es la siguiente:

$$LL = k * w \quad (5)$$

Donde:

- w = Contenido de humedad (%).
- k = Factor correspondiente al contenido de humedad.

Tabla 2.*Factor k correspondiente al contenido de humedad*

Penetración del cono (mm)	Factor dependiente contenido de humedad		
	Menor 35%	35% a 50%	Mayor 50%
15	1,057	1,094	1,098
16	1,052	1,076	1,075
17	1,042	1,058	1,055
18	1,03	1,039	1,036
19	1,015	1,02	1,018
20	1	1	1
21	0,984	0,984	0,984
22	0,971	0,968	0,967
23	0,961	0,954	0,949
24	0,955	0,943	0,929
25	0,954	0,934	0,909
Plasticidad	Baja	Intermedia	Alta

(Blázquez, 2016)

-Ventajas

- La variación de los resultados obtenidos por laboratoristas diferentes es menor que la presente en el ensayo de Copa de Casagrande.
- En su ejecución no influyen factores dinámicos como en el caso del ensayo de Copa de Casagrande.
- Las pruebas interlaboratorio comparativas pueden ser más eficientes, porque el operador no tiene gran influencia sobre el ensayo.
- El ensayo puede ser realizado en cualquier tipo de suelo.
- Este método de ensayo no permite tener penetraciones inferiores a las establecidas, por lo que en caso de existir alguna se puede detectar a un suelo “no plástico” (Blázquez, 2016).

Desventaja de su utilización

- El método requiere de un equipo más costoso en comparación al costo del equipo de Copa de Casagrande (Blázquez, 2016).

2.4.2 LÍMITE PLÁSTICO (LP)

El contenido de humedad expresado en porcentaje, en el cual el suelo cambia su consistencia plástica a la semisólida al disminuir su contenido de agua, o, cambia su consistencia semisólida a plástica al aumentar su contenido de agua, se conoce como límite plástico, el mismo define el límite inferior del estado plástico (Das, 2013). La norma ASTM D-4318, establece que el contenido de humedad cuando al formar rollos de 3.2 mm de diámetro el suelo presenta grietas corresponde al límite plástico.

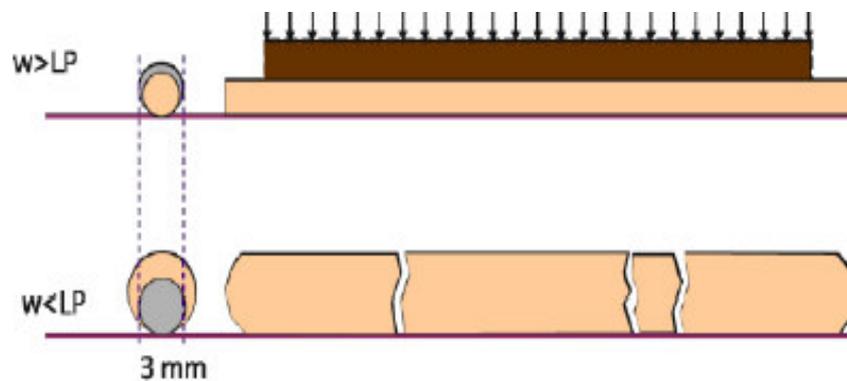


Figura 15. Límite plástico

Fuente: (Blázquez, 2016)

El límite plástico se determina a través de la siguiente fórmula (Das, 2013):

$$LP = \frac{w_H - w_s}{w_s} * 100 = \frac{w_w}{w_s} * 100 \quad (6)$$

Donde:

- w_H : peso de los rollos húmedos en gramos.
- w_s : peso de los rollos secos en gramos.
- w_w : contenido de humedad de los rollos en gramos.

En contraste, el equipo de Penetrómetro Cónico es una alternativa para determinar el límite plástico. Se ejecuta con el mismo cono usado para determinar límite líquido, con la diferencia de que su masa debe ser de 2.35 N (240 gf). Se debe ejecutar tres o cuatro ensayos variando el contenido de humedad del suelo y

determinando sus respectivas penetraciones. La penetración de $d = 20mm$ es la que corresponde a el límite plástico (Das, 2013).

2.4.3 ÍNDICE DE PLASTICIDAD (IP)

En suelos cohesivos, el rango de contenido de humedad en el cual el suelo se comporta de forma plástica se conoce como índice de plasticidad y se obtiene a través de la siguiente ecuación (ASTM Designation: D4318-17, 2017):

$$IP = LL - LP \quad (7)$$

Donde:

- IP : Índice de plasticidad
- LL : Límite líquido
- LP : Límite plástico

De acuerdo con Blázquez (2016) el índice de plasticidad define los siguientes suelos: “suelos desmenuzables ($IP < 1$), suelos débilmente plásticos ($1 < IP < 7$), suelos medianamente plásticos ($7 < IP < 15$), suelos altamente plásticos ($IP > 15$)”.

2.4.3.1 Carta de plasticidad

En este gráfico se ubican valores correspondientes a límite líquido y a índice de plasticidad, para separar limos y arcillas. Su utilidad radica en que de acuerdo a la relación que hay entre estos valores, se clasifica los diferentes tipos de suelos de acuerdo al sistema SUCS (Das, 2013).

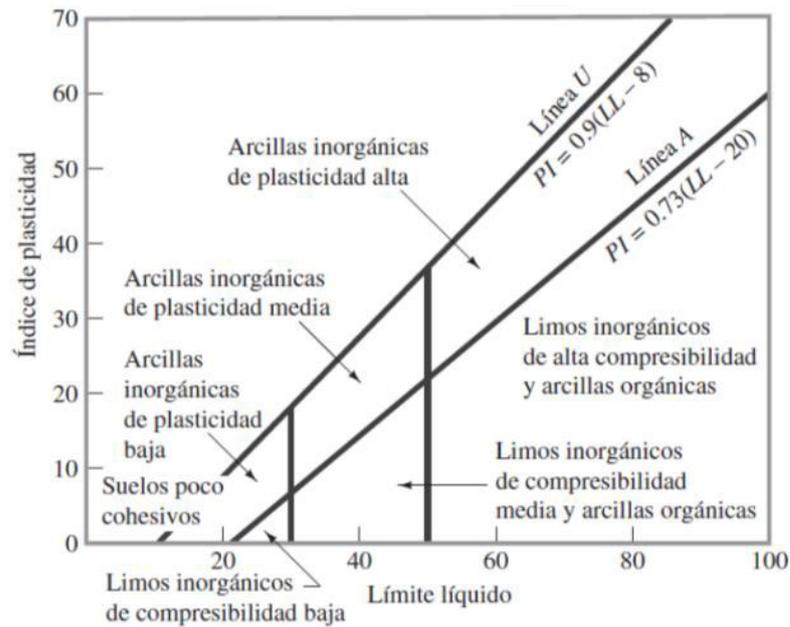


Figura 16. Carta de plasticidad

Fuente: (Das, 2013)

Una de las características más importantes de la carta de plasticidad es la recta A, a través de la cual las arcillas inorgánicas se dividen de los limos inorgánicos, y está expresada por la ecuación $IP = 0.73 * (LL - 20)$. Sobre la recta A se encuentran los índices de plasticidad y límites líquidos correspondientes a las arcillas inorgánicas y debajo se encuentran los limos inorgánicos. Los limos orgánicos y limos inorgánicos de compresibilidad media se encuentran debajo de la recta A con límites líquidos entre 30 y 50. Las arcillas orgánicas y limos inorgánicos de alta compresibilidad y con límites líquidos mayores a 50 se encuentran debajo de la recta A (Das, 2013).

La recta U, está expresada por la ecuación: $IP = 0.9 * (LL - 8)$ y se encuentra arriba de la recta A. Según Das (2013), “es de aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad al límite líquido para cualquier suelo encontrado hasta ahora”.

2.4.4 LIMITACIONES DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG

Los ensayos de límites de Atterberg se ejecutan con tamaños de suelo inferiores a 0,425mm (tamiz N°40), dejando de lado que las propiedades reflejadas dependerán también de la cantidad de material grueso presente en la muestra y de una granulometría correcta. Otro factor para tomar en cuenta es que para suelos inalterados las relaciones establecidas no serían válidas, ya que los ensayos se llevan a cabo con suelos remoldeados (Blázquez, 2016).

2.5 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

La clasificación de suelos consiste en separar suelos con características y comportamientos parecidos en grupos y subgrupos, tomando como base las propiedades mecánicas y el comportamiento ingenieril. Para realizar dicha clasificación, se utiliza como principales parámetros el índice de plasticidad, límite líquido, límite plástico y la curva de distribución granulométrica (Das, 2013).

Actualmente los sistemas utilizados son: American Association of State High Way and Transportation Officials (AASHTO), generalmente usado para clasificar las capas del pavimento de una carretera y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), utilizado para estudios geotécnicos (Das, 2013).

Dado que el estudio a realizarse es para obtener propiedades geotécnicas del suelo, se va a estudiar a fondo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

2.5.1 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En 1948 Arthur Casagrande propuso este sistema, después, en 1952 el sistema fue analizado y actualmente es utilizado en proyectos de ingeniería (Das, 2013).

De acuerdo con este sistema los suelos se dividen en dos categorías (Das, 2013):

- Grava y arena (grano grueso) en estado natural, con menos del 50% que pase por el tamiz N°200 (0.075 mm). Utilizan los prefijos G para gravas y S para arenas o suelo arenoso.
- Grano fino con 50% o más que pasa por el tamiz N°200 (0.075 mm). Usan los prefijos M para limo inorgánico, C para arcilla inorgánica y O para limos orgánicos y arcillas. El prefijo Pt se utiliza para turbas lodos y suelos altamente orgánicos.

También se emplean los símbolos: W bien clasificado, P mal clasificado, L baja plasticidad ($LL < 50$), H alta plasticidad ($LL > 50$) (Das, 2013).

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	
		Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM	
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW	
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP	
Arenas con finos		$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM		
Más de 12% finos ^{b,d}		$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC		
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL	
		Orgánico	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	ML	
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Límite líquido: secado	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL	OL
			Límite líquido: no secado	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	CH
		Orgánico	Límite líquido: secado	Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	MH
			Límite líquido: no secado	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH
Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt	

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$^c C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Figura 17. Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (Basado en el material pasante del tamiz N°75)

Fuente: (Das, 2013)

Los parámetros que se necesita conocer para esta clasificación se presentan a continuación (Das, 2013):

- Cantidad de grava que se retiene en el tamiz N°4 (4,75mm) y pasa el tamiz de 3 pulgadas.
- Cantidad de arena que es retenida en el tamiz N°200 (0,075mm) y pasa por el tamiz N°4 (4,75mm).
- Cantidad de limos y arcillas que pasan el tamiz N°200 (0,075mm).
- Coeficiente de uniformidad (C_u) y coeficiente de graduación (C_c).
- Límite líquido e índice de plasticidad del suelo que pasa el tamiz N°40 (0,425mm).

Los suelos grano grueso están representados por los símbolos: GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Los suelos de grano fino están representados por los símbolos: CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML y Pt (Das, 2013).

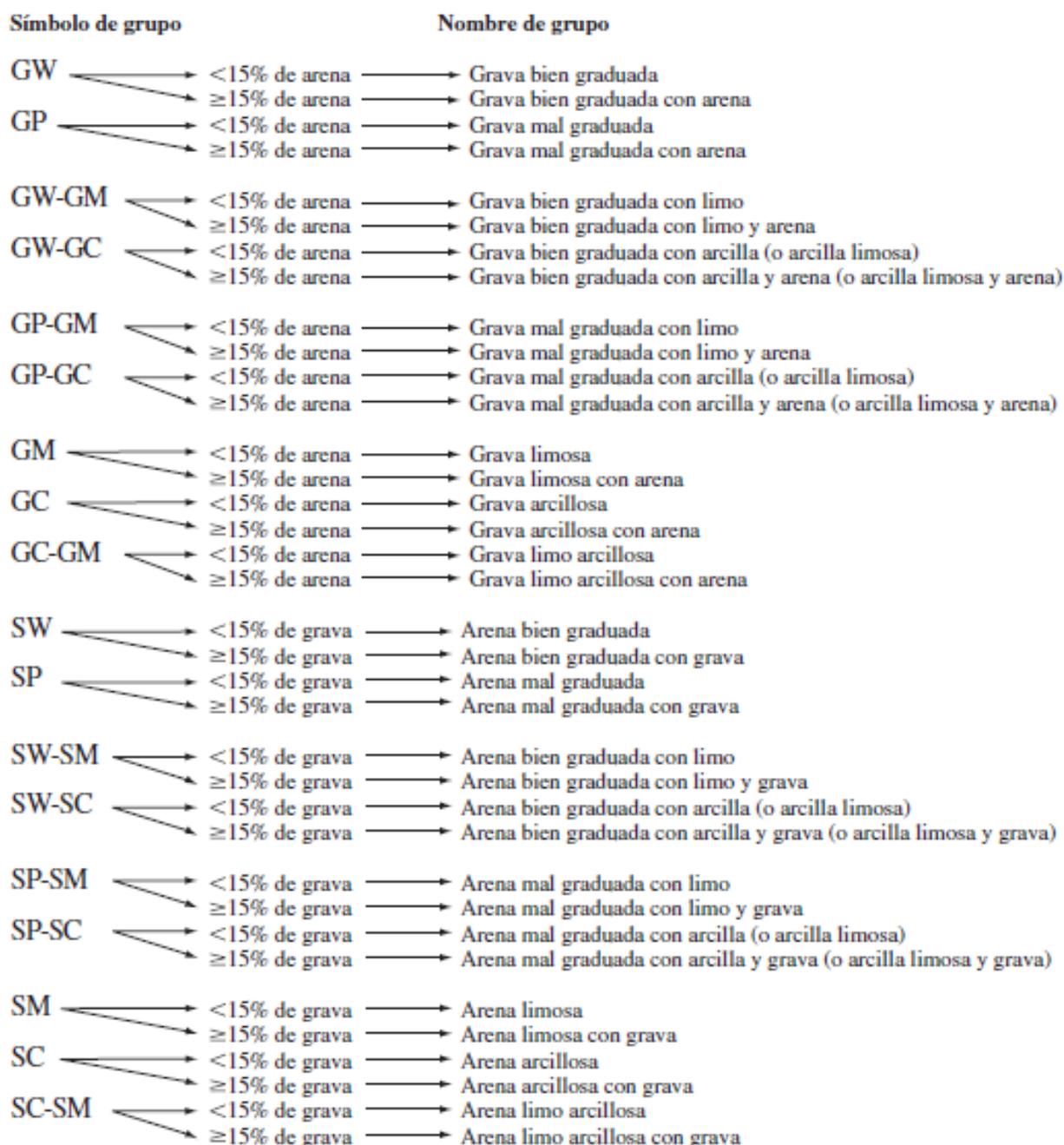


Figura 18. Diagrama de flujo para gravas y arenas
Fuente: (Das, 2013)

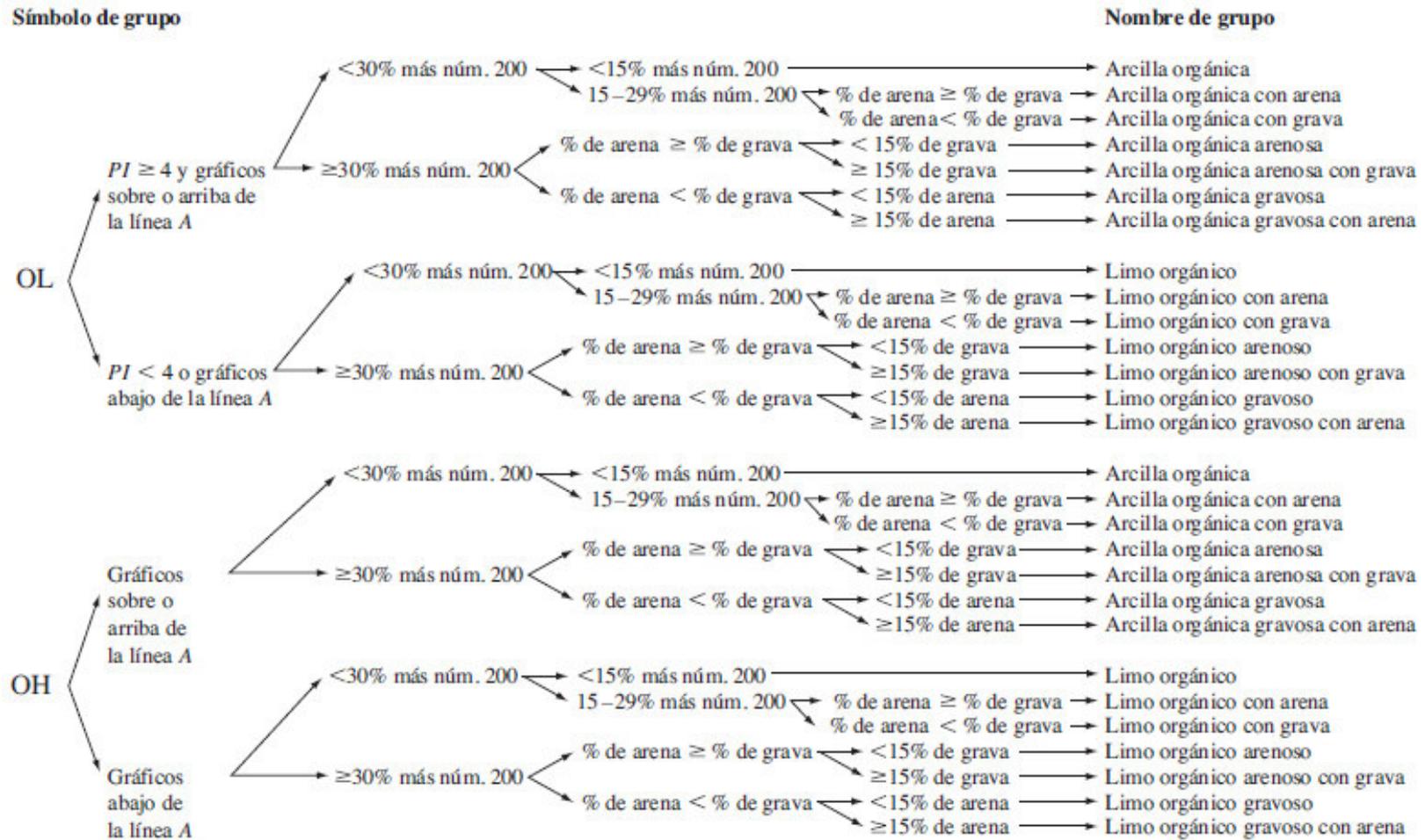


Figura 20. Diagrama de flujo para suelo limoso orgánico y suelos arcillosos
 Fuente: (Das, 2013)

2.6 IMPORTANCIA DE LA MEDICIÓN ANALÍTICA

El trabajo analítico es de gran importancia en cualquier campo de la ciencia, ya que a través de pruebas, mediciones y análisis de muestras se puede describir diversas situaciones de la vida cotidiana. En algunos casos la realización de estas mediciones puede llevar a costos muy altos o costos adicionales para su ejecución, por tal razón las mediciones deben ser representativas y a su vez aptas para demostrar que dicho resultado es aceptable (Guía Eurachem, 2016).

El resultado de un estudio analítico es apto para su uso, si es lo suficientemente confiable para permitir tomar decisiones basados en los mismos con toda confianza, por ende, el desempeño de un método debe ser validado y además se debe evaluar la incertidumbre de dichos resultados, con el fin de asegurar un determinado nivel de confianza (Guía Eurachem, 2016).

2.7 PRINCIPIOS DE UN ENSAYO DE LABORATORIO

De acuerdo con el Servicio de Acreditación Ecuatoriana, para poder aceptar, validar, considerar los resultados de un análisis en un laboratorio, se debe cumplir con los siguientes principios:

- Las calibraciones/ensayos se realizan para cumplir un objetivo determinado.
- Los métodos y equipos que se utilizan para ejecutar los ensayos deben haberse sometido a pruebas que aseguren que son adecuados para cumplir su objetivo.
- Los laboratoristas que ejecutan los ensayos deben estar calificados y ser competentes para desempeñar la tarea establecida.
- Se debe evaluar periódicamente el desempeño técnico de un laboratorio.
- Los resultados obtenidos entre un laboratorio y otro deben ser consistentes entre ellos.
- Los procedimientos que se siguen en el laboratorio deben garantizar calidad y control.

2.8 VALIDACIÓN DE UN MÉTODO

La validación es una ratificación a través de pruebas sustentadas con evidencia objetiva de que los laboratorios alcanzan los requisitos establecidos hacia un fin particular. La norma ISO/IEC 17025, define a la validación de un método como la confirmación, mediante pruebas y evidencias objetivas, de que se alcanzan los requerimientos establecidos para un fin específico previsto (Guía Eurachem, 2016).

La verificación es similar a la validación, la diferencia radica en que la verificación proporciona evidencia objetiva de que un método cumple con los requerimientos establecidos y la validación es una constatación de que los requerimientos establecidos son apropiados para un fin previsto (Guía Eurachem, 2016).

Los laboratorios pueden realizar sus mediciones mediante procedimientos validados, en los cuales el trabajo de validación ya ha sido previamente desarrollado. Sin embargo, el laboratorio debe confirmar su capacidad de replicar dicho método, a este procedimiento se le denomina verificación. La misma implica un trabajo experimental que garantice que el laboratorio ejecuta el método adecuadamente (Guía Eurachem, 2016).

La Norma ISO/IEC 17025, establece que los laboratorios deben validar: métodos no normalizados, métodos creados en el laboratorio, métodos normalizados que no son utilizados en su ámbito de aplicación y modificaciones de métodos normalizados. Además, un método también debe ser validado si se pretende evidenciar la congruencia entre resultados obtenidos mediante dos métodos, este puede ser el caso de un método que ha sido desarrollado recientemente versus un método existente normalizado (Guía Eurachem, 2016).

2.8.1 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO ANALIZADAS PARA LA VALIDACIÓN DE UN MÉTODO

A continuación, se presentan los parámetros de desempeño de mayor relevancia:

1) Selectividad

Es la capacidad de un método para obtener de forma específica y exacta el parámetro de interés, en presencia de otros componentes de un sistema, bajo condiciones específicas de prueba (SAE, 2016).

2) Intervalo de trabajo o rango

Intervalo en el cual el método de ensayo puede aplicarse y arroja resultados con un grado de precisión y veracidad aceptable. El intervalo de trabajo será obtenido a partir del intervalo de confianza, el cual se explica en la sección 2.10.5 del presente trabajo (SAE, 2017).

3) Exactitud

Define la cercanía entre el resultado de una medición y el valor de referencia establecido, está compuesta por los siguientes componentes: veracidad y precisión. (SAE, 2016).



Figura 21. Exactitud, precisión y veracidad
Fuente: (SAE, 2016)

Veracidad

Es la cercanía de la media al valor real y se expresa en forma de sesgo (SAE, 2016).

El sesgo se halla al comparar la media con un valor de referencia adecuado para un conjunto de resultados (Guía Eurachem, 2016). Se calcula con la siguiente ecuación:

$$s = \bar{x} - x_{ref} \quad (8)$$

Donde:

- s = Sesgo
- \bar{x} = Media de los resultados
- x_{ref} = Valor de referencia o valor esperado

Un valor de sesgo alto señala una diferencia considerable, por lo cual no es veraz, en contraste, un valor de sesgo pequeño indica que el método empleado es veraz (Guía Eurachem, 2016).

Precisión

Es la congruencia existente en los resultados arrojados, cuando se aplican varias veces el mismo método analítico en la misma muestra. Para obtener la precisión del método es necesario conocer la dispersión presente en los resultados, es decir los valores de coeficiente de variación, desviación estándar y varianza. Se puede considerar a un método preciso si el coeficiente de variación es menor al 5%. Además, a través de la varianza se pueden comparar dos metodologías diferentes, siendo el método más preciso el que presente una menor varianza (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010).

Repetibilidad

Es la cercanía de los resultados de mediciones continuas respecto a un mismo mesurando, ejecutado con condiciones de medición iguales (SAE, 2017). Como se aprecia en la Figura 22, la desviación estándar del método A es menor a la desviación estándar del método B, por lo cual se considera que el método A tiene mayor repetibilidad en las mediciones tomadas.

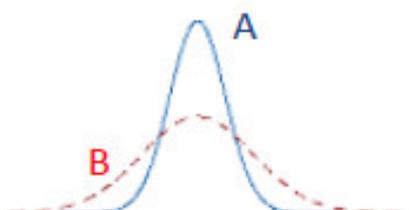


Figura 22. Representación gráfica de repetibilidad
Fuente: (SAE, 2017)

El análisis de la desviación estándar atribuido a la repetibilidad de los resultados se establece a mayor profundidad en el análisis de varianza ANOVA, en la sección 2.10.8. La desviación estándar de repetibilidad se expresa como:

$$S_r = \sqrt{DCM_w} \quad (9)$$

Donde:

- S_r = Desviación estándar de repetibilidad.
- DCM_w = Varianza dentro del grupo

Reproducibilidad

Es la cercanía entre resultados de mediciones continuas para el mismo mesurando, realizado con condiciones de medición diferentes (Guía Eurachem, 2016). Las condiciones que pueden variar son: método de medición, operador, instrumentos o equipos, patrones de referencia, condiciones ambientales, etc (SAE, 2017).

En la Figura 23, se considera la determinación de un mesurando, bajo tres condiciones de medición diferentes y la capacidad que tiene cada método de reproducir resultados similares.

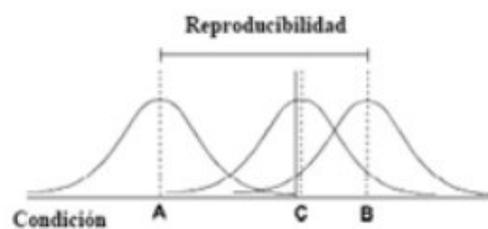


Figura 23. Representación gráfica del concepto de reproducibilidad

Fuente: (Portuondo & Portuondo , 2010)

La reproducibilidad se expresa como:

$$S_R = \sqrt{S_r^2 + S_L^2} \quad (10)$$

$$S_L^2 = \frac{DCM_B - DCM_w}{n} \quad (11)$$

Donde:

- S_R = Desviación estándar de reproducibilidad.
- S_r = Desviación estándar de repetibilidad.
- S_L = Contribución a la variación total del factor de agrupamiento.
- DCM_B = Varianza dentro del grupo.
- DCM_w = Varianza entre grupos.

4) Estabilidad

El parámetro de estabilidad describe las variaciones microbiológicas, químicas y físicas que se producen en una muestra, debido a los diferentes cambios ambientales (Guía Eurachem, 2016).

2.8.2 PLAN E INFORME DE VALIDACIÓN

De acuerdo con el Sistema de Acreditación Ecuatoriano, cuando se propone un plan para una propuesta de validación y la realización de su respectivo informe, se debe hacer referencia en los siguientes puntos:

- Objetivo y alcance del método
- Ítem a ensayar.
- Detalle de equipo.
- Parámetros de validación y sus respectivos resultados
- Incertidumbre de las mediciones realizadas.
- Registro de personas que ejecutan la validación del método.
- Lineamientos para aceptar o rechazar la validación del método.

2.8.3 PASOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN

Para el proceso de validación de un método, de acuerdo con el Servicio de Acreditación Ecuatoriana, se siguen los siguientes pasos (SAE, 2017):

- a. Se establece la necesidad analítica y los parámetros de desempeño que el método deberá considerar para sustentar su propósito, además se debe plantear el grado de detalle que tendrá el análisis.
- b. Se realiza una revisión de los métodos disponibles, a partir de los cuales se escogerá el método más adecuado para cumplir con la necesidad analítica.
- c. Con el método escogido se realiza un borrador del procedimiento.
- d. Teniendo como premisa la bibliografía existente, se establecen los objetivos que deben cumplir los parámetros de validación.
- e. Establecer un diseño experimental y estadístico para obtener los parámetros a evaluar en el método.
- f. Ejecutar el diseño experimental con el respectivo registro de los datos obtenidos.
- g. Con los resultados obtenidos, se procede a realizar el análisis estadístico, lo cual permitirá verificar si los resultados obtenidos cumplen con los parámetros establecidos, si no se cumplen se repite el proceso nuevamente.
- h. El proceso de validación finaliza cuando los resultados obtenidos cumplen con los objetivos fijados.

2.9 INCERTIDUMBRE

Se define a la incertidumbre como un parámetro asociado al resultado de cualquier medición, describe la dispersión de los valores que podrían ser adjudicados al mensurando (Guía CG 4 Eurachem , 2012).

Generalmente, todas las mediciones son afectadas por un margen de error, dicho error es señalado por la incertidumbre, por ende, es de gran importancia que la incertidumbre de medición también sea reportada en el resultado (SAE, 2016).

2.9.1 ERROR E INCERTIDUMBRE

El error señala la diferencia existente entre una medición y el valor de referencia del mesurando. En la práctica, el error establece la diferencia entre un valor experimental y un valor de referencia. Si se conoce el valor del error, el mismo se

puede aplicar para corregir el resultado. En contraste, la incertidumbre representa un rango de valores en torno al resultado de una medición, para una muestra y procedimiento definidos (Guía CG 4 Eurachem , 2012).

2.9.2 APLICACIONES DE LA INCERTIDUMBRE

- Los clientes la utilizan para una correcta toma de decisiones, además que le brinda confianza.
- En el laboratorio, su uso permite conocer el desempeño de un método y en caso de ser necesario permite mejorarlo.
- Permite a las autoridades reguladoras analizar si los resultados siguen los lineamientos permisibles.
- Permite a los organismos de acreditación verificar el acatamiento de requisitos normativos (SAE, 2016).
- Su cálculo permite saber si los resultados obtenidos son adecuados para su propósito.

2.9.3 INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR

La incertidumbre estándar de una medición se expresa como desviación estándar y comprende a la evaluación tipo A y tipo B (Cano & García, 2011).

2.9.3.1 Incertidumbre tipo A

Es el análisis de una incertidumbre estándar a través del tratamiento estadístico de una serie de datos y se obtiene con la siguiente ecuación (SAE, 2016):

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Donde:

- u_A = Incertidumbre tipo A
- s = Desviación estándar
- n = Número de observaciones realizadas

El número de observaciones debe ser mayor a 10, para que los resultados obtenidos sean confiables. Esta incertidumbre está asociada a errores aleatorios, los cuales surgen porque se trabaja solo con una muestra, no con toda la población (Cano & García, 2011).

2.9.3.2 Incertidumbre tipo B

La incertidumbre tipo B se obtiene a partir de métodos diferentes a los estadísticos, como los que se presentan a continuación (SAE, 2016):

- Equipos: especificaciones del fabricante, derivas, resolución, etc.
- Certificados de calibración.
- Método, tablas, etc.

Para el desarrollo de este trabajo la incertidumbre a analizar será la referente a la resolución de la balanza denominada también como precisión de lectura, se calcula con la siguiente expresión (SAE, 2016):

$$U_{RESOL} = \frac{RESOLUCIÓN}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

La apreciación de la balanza usada para el desarrollo de este trabajo es de 0.01gr.



Figura 24. Incertidumbre tipo B asociada a la resolución de una balanza
Fuente: (Llerena)

La incertidumbre tipo B está asociada a los errores sistemáticos, los cuales se pueden originar a partir de los equipos, apreciación de medidas, etc., además, se producen de la misma forma en todas las mediciones realizadas. La Figura 25 muestra como los errores aleatorios cambian en magnitud y dirección, por otra parte, los errores sistemáticos tienden a ser constantes (Cano & García, 2011).

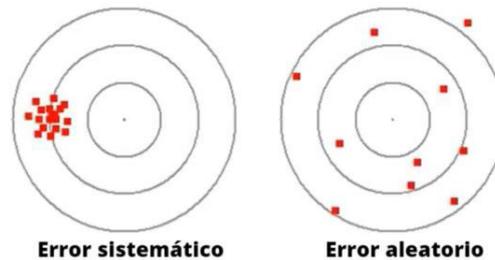


Figura 25. Error aleatorio y error sistemático
Fuente: (Llerena)

2.9.4 INCERTIDUMBRE ESTÁNDAR COMBINADA

Es el resultado de una medición, obtenido a partir de otras magnitudes de las cuales depende el mesurando. Se obtiene como la desviación estándar y covarianzas de esas magnitudes y combinando adecuadamente las incertidumbres estándar de las variables de las cuales depende el mesurando (Cano & García, 2011).

Se calcula con la siguiente expresión (SAE, 2016):

$$u_c^2 = (u^2(x) + \sum (\text{otras contribuciones}))^{1/2} \quad (14)$$

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (15)$$

Donde:

- u_c = Incertidumbre combinada
- u_A = Incertidumbre tipo A
- u_B = Incertidumbre tipo B

2.9.5 INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La incertidumbre expandida toma en cuenta los errores aleatorios y sistemáticos, se representa por U , es un parámetro que define un rango de dispersión alrededor del resultado de una medición y se expresa como (JCGM, 2008):

$$U = ku_c \quad (16)$$

Donde:

- u_c = incertidumbre típica combinada
- k = factor de cobertura

Es factible expresar el resultado de una medición como: $Y = y \pm U$, lo cual significa que la mejor medición del valor atribuible al mesurando Y es y , y que una parte considerable de la distribución de valores que podrían ser atribuidos a Y , pueden estar comprendidos en $y - U$ a $y + U$, lo cual puede definirse como: $(y - U \leq Y \leq y + U)$ (JCGM, 2008).

El factor de cobertura k usualmente tiene valores entre 2 y 3 para una distribución normal con un nivel de confianza de 95 a 99% respectivamente, salvo en ocasiones especiales en las que se podría tomar un valor fuera de dicho margen (JCGM, 2008).

2.9.6 EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

El resultado de una magnitud asociada a una medición (y), debe ser reportado junto al valor de incertidumbre expandida U , de la siguiente forma (Guía CG 4 Eurachem, 2012):

$$\text{Resultado} = y \pm U(\text{unidades}) \quad (17)$$

2.10 ESTADÍSTICA BÁSICA

La estadística permite interpretar, recopilar, organizar y estudiar datos, para apoyar una correcta toma de decisiones. En el área de ingeniería, la estadística es de gran importancia, a través de ella se puede solventar problemas de producción, destinar de forma más eficiente el uso de materiales y personal, además de permitir entender fenómenos que están sujetos a cambios (Mena, Escobar , Haro, Córdova, & Merino, 2016).

La estadística se divide en 2 ramas:

- **Descriptiva.** – reúne información y la organiza en tablas y gráficos, con las cuales se puede interpretar la información numérica, sin nada que vaya más allá de los datos.
- **Inferencial.** - El análisis va más allá de los datos e investiga y analiza a la población, usando información obtenida de muestras.

2.10.1 CONCEPTOS BÁSICOS

A continuación, se muestran algunos conceptos básicos establecidos por Luis Dikovskiy (2008), en su libro de estadística básica, los cuales serán utilizados en el desarrollo de este trabajo:

- **Población:** conjunto a ser estudiado.
- **Muestra:** subconjunto de la población a la cual se tendrá acceso y sobre la cual se realizarán mediciones.
- **Muestra aleatoria:** la muestra de la población debe ser escogida de forma aleatoria y todos los elementos que pertenecen a la población, tienen igual oportunidad de ser escogidos de la muestra.
- **Parámetro:** valor numérico calculado sobre una población.
- **Datos cualitativos:** son datos que señalan características que no se pueden medir, como: color, forma, etc.

- **Datos cuantitativos:** son datos que señalan características que se pueden medir, como: temperatura, peso, longitud.

2.10.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE POSICIÓN

Los parámetros estadísticos de posición indican alrededor de qué dato central se distribuye la mayor parte de datos y son: media, mediana y moda. Para esta investigación es de gran importancia el parámetro de la media (Dicovski, 2008).

2.10.2.1 Media (\bar{x})

Es una medida de tendencia central y se representa como \bar{x} para la media muestral. Se obtiene como la sumatoria de todas las mediciones de la muestra, dividido para el número de mediciones tomadas (Dicovski, 2008). Se calcula con la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (18)$$

Donde:

- $\sum_{i=1}^n x_i$: Suma de resultados
- n : Número de resultados

Características de la media muestral:

- Se puede obtener solamente con datos de valores cuantitativos.
- Se obtiene a partir de todas las mediciones.
- Si existen valores extremos, la media muestral puede ser afectada.
- Un conjunto de datos cuantitativos tiene una sola media.
- Es de gran utilidad para estudiar y comparar dos o más poblaciones o muestras (Mena, Escobar, Haro, Córdova, & Merino, 2016).

2.10.3 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE DISPERSIÓN O VARIABILIDAD

Los parámetros estadísticos de dispersión señalan la separación de las mediciones realizadas, con respecto a la media muestral (Dicovski, 2008).

2.10.3.1 Rango

Este parámetro establece la diferencia existente entre la medición de mayor valor y la medición de menor valor (Dicovski, 2008). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$Rango = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \quad (19)$$

Donde:

- $x_{m\acute{a}x}$ = Valor máximo
- $x_{m\acute{i}n}$ = Valor mínimo

Características del rango:

- Es el parámetro de dispersión más fácil de calcular.
- Como se basa en los datos de valores extremos puede arrojar resultados erráticos.

2.10.3.2 Varianza muestral (s^2)

Cuantifica la dispersión de los datos con relación a la media. Se obtiene como la sumatoria de las diferencias al cuadrado dividido para el número de datos de cada dato con respecto a la media muestral (Mena, Escobar, Haro, Córdova, & Merino, 2016). Se calcula de la siguiente forma:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (20)$$

Donde:

- x_i = Valor de una medición
- \bar{x} = Media aritmética
- n = número de mediciones

2.10.3.3 Desviación estándar (σ, s)

Es la medida de dispersión usada con mayor frecuencia, ya que es la más estable al depender de los valores de la distribución, representa la proximidad de los valores medidos con la media de la muestra y se calcula como la raíz cuadrada de la varianza (Mena, Escobar , Haro, Córdova, & Merino, 2016).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (21)$$

Donde:

- x_i = Valor de una medición.
- \bar{x} = Media aritmética
- n = Número de mediciones.
- s^2 = Varianza

Características de la desviación estándar:

- Indica la variabilidad promedio de una distribución en torno a la media muestral.
- Una desviación estándar grande indica una mayor dispersión, en contraste, una desviación estándar pequeña indica una menor dispersión.
- En el cálculo intervienen todos los datos de la distribución (Mena, Escobar , Haro, Córdova, & Merino, 2016).

2.10.3.4 Coeficiente de Variación (CV)

Esta medida de dispersión, permite comparar conjuntos de datos de diferentes poblaciones, además, indica la dispersión relativa existente para un conjunto de datos (Dicovski, 2008). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} * 100\% \quad (22)$$

Donde:

- s = Desviación estándar
- \bar{x} = Media aritmética

Características del coeficiente de variación

- Para facilitar su comprensión se expresa en porcentaje, pero también puede ser expresado con cifras que estén comprendidas entre 0 y 1, teniendo en cuenta que puede haber conjuntos de datos para los cuales el coeficiente de variación puede ser igual a 1, o mayor que 1.

2.10.4 NIVEL DE CONFIANZA

Define la posibilidad de que el parámetro de estudio se encuentre dentro de cierto intervalo de confianza, a la posibilidad de que esta afirmación sea falsa se la conoce como α (Dicovski, 2008). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$p\% = \text{Nivel de confianza} = 100\% \cdot (1 - \alpha) \quad (23)$$

Dónde:

- α = Margen de error

2.10.5 INTERVALO DE CONFIANZA

Es el intervalo en el cual, con una probabilidad determinada, se puede encontrar el valor del parámetro que se está buscando (Dicovski, 2008). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$IC = \bar{x} \pm \frac{t(v, \alpha) * s}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

Donde:

- \bar{x} = Media aritmética de la muestra
- $t(v, \alpha)$ = Valor de t de Student para v grados de libertad y un nivel de significación α
- s = Desviación estándar del intervalo de confianza
- n = Número de mediciones

Características:

- Existe simetría en el intervalo de confianza si el margen de error corresponde a la mitad del intervalo de confianza.
- El intervalo de confianza será mayor, mientras el margen de error sea más grande, con lo cual la estimación realizada es menos confiable.

Para el desarrollo de este trabajo, el intervalo de confianza será obtenido a partir del análisis de dos conjuntos de datos, haciendo uso de la Prueba T de Student.

2.10.6 PRUEBA T DE STUDENT

Esta prueba permite la comparación de la media, varianza y número de mediciones de dos conjuntos de datos, la Tabla 3 presenta los datos necesarios para la ejecución de la Prueba T de Student (SAE, 2016):

Tabla 3.
Datos principales para prueba T de Student

Conjunto	Media	Varianza	Número de datos
1	\bar{x}_1	s_1^2	n_1
2	\bar{x}_2	s_2^2	n_2

Fuente: (SAE, 2016)

1. Se toma la siguiente hipótesis: $H_0: x_1 = x_2$ y se comprueba si las medias muestrales de cada muestra varían en forma significativa.
2. Se comprueba que las varianzas de cada grupo son iguales ($s_1^2 = s_2^2$), a través de la prueba F de Fisher.
3. Si se comprueba que: $s_1^2 = s_2^2$, la desviación estándar del intervalo de confianza para dos conjuntos de datos se calcula como:

$$S = \sqrt{\frac{(n_2 - n_1) * s_1^2 + (n_2 - n_1) * s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (25)$$

Donde:

- n_2 = número de mediciones del primer conjunto de datos.
- n_1 = número de mediciones del segundo conjunto de datos.
- s_1^2 = varianza del primer conjunto de datos.
- s_2^2 = varianza del segundo conjunto de datos

4. El valor de t calculado se obtiene con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s * \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (26)$$

Dónde:

- \bar{x}_1 = Media muestral del primer conjunto de datos.
- \bar{x}_2 = Media muestral del segundo conjunto de datos.

- t ; tiene $(n_1 + n_2 - 2)$ grados de libertad
5. Finalmente, el valor de t calculado se compara con el valor de T de la tabla T de Student, si $t_{calculado} < T_{tabla}(0.05, (n_1 + n_2) - 2)$, la hipótesis propuesta en el paso número 1, se acepta como verdadera, caso contrario se considera que las medias muestrales de cada grupo varían significativamente.

2.10.7 PRUEBA F DE FISHER

La prueba F de Fisher permite realizar una comparación entre varianzas, partiendo de la hipótesis de que las varianzas de dos grupos no varían significativamente entre si ($s_1^2 = s_2^2$), de tal forma, el valor F se obtiene con la siguiente ecuación (SAE, 2016):

$$F_{calculado} = \frac{s_2^2}{s_1^2} \quad (27)$$

Donde:

- s_1^2 = varianza del primer conjunto de datos.
- s_2^2 = varianza del segundo conjunto de datos

Si $F_{calculado} < F_{tablas}$, la hipótesis se acepta como verdadera (SAE, 2016).

2.10.8 ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Mediante un análisis de varianza ANOVA, se puede analizar y comparar dos medias muestrales, a través de una comparación de varianzas. Además, la aplicación de este análisis permite profundizar más la utilización de las pruebas de significación (Instituto de Salud Pública de Chile, 2010).

Tabla 4.*Datos necesarios para un análisis de varianza ANOVA*

n° Observaciones	n°Grupos		
	Grupo 1	Grupo 2Grupo n
1	x_{11}	x_{21}	x_{n1}
2	x_{12}	x_{22}	x_{n2}
:	:	:	:
n	x_{1n}	x_{2n}	x_{nn}

Fuente: (Llerena)

1. Se calcula la media muestral para cada grupo de datos. Posterior a esto se procede a calcular la media muestral de todo el conjunto de datos, como se muestra a continuación:

$$\bar{x}_1 = \frac{\sum(x_{11} + x_{12} \dots + x_{1n})}{n_{observaciones}} \quad (27)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum(\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots \bar{x}_n)}{n_{grupos}} \quad (28)$$

Donde:

- \bar{x}_1 = Media muestral de las observaciones del grupo.
- $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ = Observaciones realizadas dentro de cada grupo.
- \bar{X} = Media muestral entre grupos.

2. Determinar la suma de los cuadrados entre grupos con la siguiente ecuación:

$$SDC_B = \sum p * ((\bar{X} - \bar{x}_1)^2 + (\bar{X} - \bar{x}_2)^2 \dots + (\bar{X} - \bar{x}_n)^2) \quad (29)$$

Donde:

- SDC_B = Suma de los cuadrados entre grupos
- p = Número de repeticiones dentro del mismo grupo.

3. Se calcula la varianza entre grupos, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$DCM_B = \frac{SDC_B}{glb} \quad (30)$$

Donde:

- DCM_B = Varianza entre grupos.
- SDC_B = Suma de los cuadrados entre grupos.
- glb = grados de libertad entre grupos

$$glb = n_{grupos} - 1 \quad (31)$$

4. Determinar la sumatoria total de los cuadrados, dentro de cada grupo, con la siguiente ecuación:

$$SDC_T = \sum ((x_{11} - \bar{x}_1) + (x_{12} - \bar{x}_1) \dots + (x_{1n} - \bar{x}_1)) \quad (32)$$

Donde:

- SDC_T = Suma total de los cuadrados dentro de cada grupo.
- $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ = Observaciones realizadas dentro de cada grupo.
- \bar{x}_1 = Media muestral de las observaciones realizadas dentro del grupo.

5. Se calcula la suma de las diferencias cuadráticas de cada grupo, a partir de la siguiente expresión:

$$SDC_w = \sum SDC_T \quad (33)$$

Donde:

- SDC_w = Suma total de cuadrados residuales de cada grupo.
- SDC_T = Suma total de los cuadrados dentro de cada grupo.

6. Se calcula la varianza dentro del grupo, como se indica a continuación:

$$DCM_w = \frac{SDC_w}{glw} \quad (34)$$

Donde:

- DCM_w = Varianza dentro del grupo
- SDC_w = Suma de cuadrados residuales de cada grupo
- glw = grados de libertad dentro del grupo

$$glw = n_{observaciones\ totales} - n_{grupos} \quad (35)$$

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE ENSAYOS

3.1 MUESTRAS A ENSAYAR

Para escoger los lugares de los que se extraerían las muestras de suelos a ensayar, fue necesario realizar una revisión del mapa geológico de Quito y de esta forma poder determinar los posibles lugares en donde se encuentren suelos caracterizados como plásticos.

Los sitios escogidos fueron: San Isidro del Inca, Miraflores, Guangüiltagua, El Carmen Bajo y El Comité del Pueblo, en la Figura 26, dichos sitios pertenecen a los puntos marcados en azul.

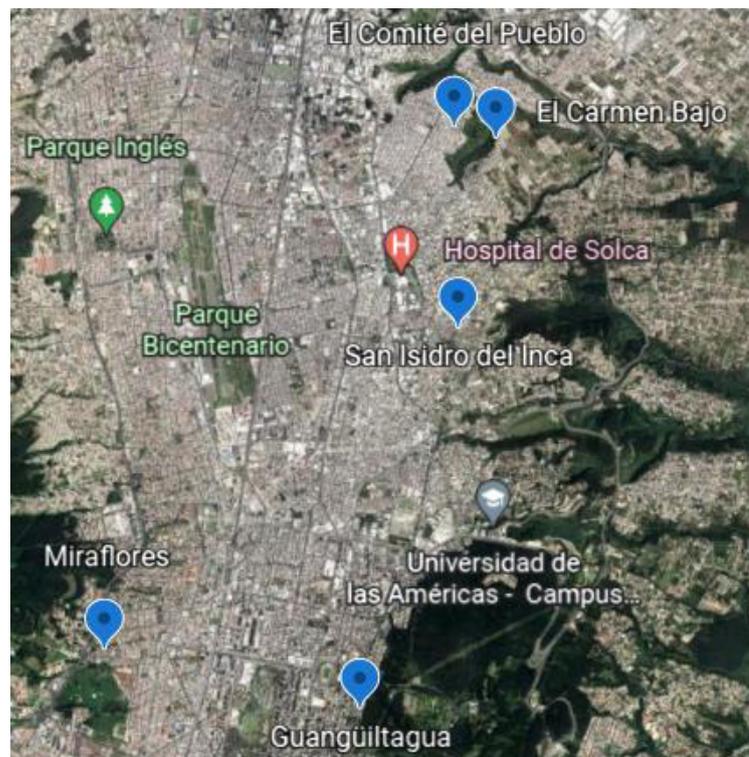


Figura 26. Toma de muestras
Fuente: (Llerena)

Tabla 5.
Sitios escogidos para extracción de muestras

N° Muestra	Ubicación
1	San Isidro
2	Miraflores
3	Guangüiltagua
4	Carmen Bajo
5	Comité del Pueblo

Fuente: (Llerena)

La Norma D420 referente a “Guía para la investigación y muestreo de suelos y rocas”, proporciona los lineamientos requeridos para realizar un muestreo eficiente a través de una correcta caracterización e identificación de suelos. Las muestras extraídas para la realización de contenido de humedad natural fueron conservadas en bolsas plásticas, para que no se vean alteradas por cambios ambientales. Por otra parte, las muestras para los ensayos de granulometría y plasticidad no necesitan trabajar con muestras inalteradas, por lo cual fueron conservadas en sacos (Blázquez, 2016).

3.2 ENSAYO DE HUMEDAD NATURAL

Para realizar los ensayos de humedad natural, se siguen los lineamientos establecidos en la norma: ASTM D2216-71, tal como se presenta a continuación.

3.2.1 EQUIPO

- Horno de secado.
- Recipientes de aluminio o porcelana.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Espátula, trapos para limpieza.

3.2.2 PROCEDIMIENTO

1. Escoger una cápsula previamente identificada y de peso conocido.
2. Depositar parte de la muestra tomada en condiciones naturales dentro de la cápsula. Se debe registrar primero el peso solamente de la cápsula y posterior a esto registrar el peso de la cápsula más la muestra húmeda.
3. Dentro del horno se coloca la cápsula con la muestra, con una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y se deja un tiempo aproximado de 10 horas, hasta que alcance una masa constante.
4. Cuando el material ya esté seco, se retira del horno y se registra el peso de la cápsula más el suelo seco.

3.2.3 TRATAMIENTO DE RESULTADOS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD

El cálculo de contenido de humedad se realiza con la siguiente ecuación (ASTM Designation: D4318-17, 2017)

$$W\% = \frac{w_H - w_s}{w_s} * 100 = \frac{w_w}{w_s} * 100 \quad (36)$$

Donde:

- $W\%$: contenido de humedad en estado natural.
- w_H : peso húmedo de la muestra en gramos.
- w_s : peso seco de la muestra en gramos.
- w_w : peso del agua contenida en el suelo en gramos.

Ejemplo de cálculo

El ejemplo de cálculo se realizará en la muestra de San Isidro. El ensayo se debe realizar al menos dos veces y posterior a esto determinar un promedio entre los resultados obtenidos.

Tabla 6.
Datos iniciales para el primer ensayo

Ensayo N°1	
ID Cápsula	S-032
Peso cápsula (g)	9,67
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	46,72
Peso cápsula + suelo seco (g)	44,51

Fuente: (Llerena)

Tabla 7.
Datos iniciales para el segundo ensayo

Ensayo N°2	
ID Cápsula	S-057
Peso cápsula (g)	9,99
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	45,48
Peso cápsula + suelo seco (g)	43,31

Fuente: (Llerena)

Los resultados calculados de humedad natural se presentan en números enteros a continuación:

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{46,72 - 44,51}{44,51 - 9,67} * 100 = 6\%$$

$$W2\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{45,48 - 43,31}{43,31 - 9,99} * 100 = 7\%$$

$$W\% = \frac{W1\% + W2\%}{2} = \frac{6 + 7}{2} = 7\%$$

3.2.4 RESULTADOS OBTENIDOS PARA CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

En la Tabla 8, se presentan los resultados obtenidos para cada muestra:

Tabla 8.*Resultados de contenido de humedad para cada muestra*

N° Muestra	Ubicación	Contenido de humedad (%)
1	San Isidro	7
2	Miraflores	30
3	Guanguiltagua	18
4	Carmén Bajo	20
5	Comité del Pueblo	17

Fuente: (Llerena)

3.3 Ensayos para límite líquido

3.3.1 ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE COPA DE CASAGRANDE

La determinación del límite líquido a través del equipo de Copa de Casagrande sigue los requisitos establecidos en la Norma: ASTM D4318 referente a “Métodos estándar de ensayo para Límite Líquido, Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos” (ASTM Designation: D4318-17, 2017).

3.3.1.1 Equipo

- Copa de Casagrande.
- Ranurador plástico o metálico.
- Balanza de sensibilidad 0.01g.
- Espátula de acero.
- Cápsulas metálicas.
- Horno regulable a 110°.
- Agua.



Figura 27. Equipo utilizado en el ensayo de Copa de Casagrande
Fuente: (Llerena)

3.3.1.2 Preparación de la muestra

La ejecución de este método requiere parte del suelo que pase el tamiz N°40. Después, se agrega agua hasta alcanzar una mezcla semi-líquida uniforme. La consistencia de la mezcla debe ajustarse hasta que la ranura se cierre con golpes dentro de un rango de 25 a 35.



Figura 28. Preparación de la mezcla para ensayo de Copa de Casagrande
Fuente: (Llerena)

3.3.1.3 Procedimiento

1. Antes de comenzar con el ensayo, se debe revisar que el equipo de Copa de Casagrande este limpio y seco.
2. Se coloca entre 50 y 70 g de la mezcla en la Copa de Casagrande, se alisa la superficie mediante el uso de una espátula y se verifica que no se hayan formado burbujas de aire en la masa de suelo.



Figura 29. Colocación de la muestra en la Copa de Casagrande

Fuente: (Llerena)

3. Con el ranurador se separa el suelo en 2 partes iguales, formando un surco de acuerdo con el eje de simetría del equipo.



Figura 30. Realización del surco

Fuente: (Llerena)

4. Se procede a girar la manivela del equipo con una velocidad de dos revoluciones por segundo y continuar hasta que el surco se cierre en media pulgada (aprox 13mm) de longitud, se debe anotar el número de golpes.



Figura 31. Ejecución del ensayo de Copa de Casagrande
Fuente: (Llerena)

5. Cuando el cierre es causado por burbujas de aire se debe remezclar. Si se ha realizado el ensayo varias veces con diferentes contenidos de humedad y el número de golpes es siempre menor a 25, se debe registrar que el límite líquido no pudo ser determinado y que el suelo es no plástico.
6. Se debe anotar los golpes que fueron necesarios para cerrar el surco.
7. Tomar una muestra de alrededor de 5g de la zona en que el surco se cerró, colocar en una cápsula previamente identificada y pesar para obtener su contenido de humedad.



Figura 32. Muestras tomadas
Fuente: (Llerena)

8. Poner a secar en el horno, posteriormente registrar el peso de la cápsula más la muestra de suelo seco y obtener el contenido de humedad.
9. Si el límite líquido se va a calcular por el método multipunto, se debe volver a mezclar la muestra de suelo, agregando un mayor contenido de agua, se realiza nuevamente los pasos anteriores para un mínimo de dos ensayos adicionales, en los cuales el cierre del surco se produzca con un menor número de golpes. El número de golpes debe estar dentro de un intervalo de 25-35, otro entre 20-30 y el último entre 15 a 25.

3.3.1.4 Tratamiento de resultados

Se cuenta con dos métodos disponibles para el tratamiento de resultados: método A-multipunto y método B-un solo punto. Para el desarrollo de este trabajo se emplea el método B de un solo punto, siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Proceder con los pasos 1-9 planteados en la sección 3.3.1.3, teniendo en consideración que el cierre del surco debe estar en un rango de 20-30 golpes.
2. Se debe repetir el ensayo si el número de golpes entre el primer y segundo ensayo es mayor que dos, si el número de golpes es igual o difiere solamente en 2 se da por terminado del ensayo.
3. Para el cálculo de límite líquido se usa la ecuación número 3, presentada en la sección 2.4.1.1.1:

$$LL_n = w_n \cdot \left(\frac{N_n}{25}\right)^{0.121}$$

Ejemplo de cálculo

Para realizar el ejemplo de cálculo se toma como referencia la muestra de San Isidro. El ensayo se realiza dos veces y posteriormente se determina el promedio entre los resultados obtenidos. El método por utilizar es el de un punto.

Tabla 9.*Datos iniciales para el primer ensayo de Copa de Casagrande*

Ensayo N°1	
Peso cápsula (g)	9,6
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	19,1
Peso cápsula + suelo seco (g)	16,63
Número de golpes	24

Fuente (Llerena)

Tabla 10.*Datos iniciales para el segundo ensayo de Copa de Casagrande*

Ensayo N°2	
Peso cápsula (g)	10,34
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	17,09
Peso cápsula + suelo seco (g)	15,95
Número de golpes	23

Fuente: (Llerena)

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{19,1 - 16,63}{16,63 - 9,60} * 100 = 35,14\%$$

$$LL_1 = W1\% * \left(\frac{N^\circ \text{Golpes}}{25}\right)^{0,121} = 35 * \left(\frac{24}{25}\right)^{0,121} = 34,8$$

$$W2\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{20,24 - 17,43}{17,43 - 9,42} * 100 = 35,08\%$$

$$LL_2 = W1\% * \left(\frac{N^\circ \text{Golpes}}{25}\right)^{0,121} = 35 * \left(\frac{23}{25}\right)^{0,121} = 34,6$$

$$LL_n = \frac{LL_1 + LL_2}{2} = \frac{34,8 + 34,6}{2} = 34,7 \approx 35$$

3.3.1.5 Resultados obtenidos para límite líquido mediante Copa de Casagrande

Tabla 11.

Límite líquido obtenido mediante ensayo de Copa de Casagrande

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	LLn	LLn	LLn	LLn	LLn
1	35	39	31	27	35
2	34	39	31	27	35
3	34	40	31	27	35
4	36	38	30	29	36
5	35	38	31	27	35
6	35	39	32	27	36
7	35	38	32	27	35
8	35	39	31	28	35
9	35	40	32	29	35
10	35	40	31	28	34
11	35	40	32	27	35
12	36	40	30	27	35
13	37	40	31	28	35
14	35	39	31	27	35
15	35	42	31	27	35
16	36	40	32	27	35
17	34	38	32	28	36
18	36	39	31	27	35
19	35	39	31	28	35
20	35	38	31	27	36
21	35	39	31	27	36
22	37	38	31	27	35
23	33	39	31	28	36
24	35	38	31	27	35
25	35	38	31	27	35
26	36	39	31	27	35
27	35	39	31	28	35
28	36	39	31	28	35
29	36	39	31	27	35
30	36	39	32	27	35

Fuente: (Llerena)

3.3.2 ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE PENETRÓMETRO CÓNICO

La determinación del límite líquido a través del equipo de Penetrómetro Cónico sigue los requisitos establecidos en la Norma Británica: BS 1377:1990 referente a “Métodos de Ensayo para Suelos con fines de Ingeniería Civil”.

3.3.2.1 Equipo y materiales

- Penetrómetro cónico.



Figura 33. Cono de acero inoxidable del laboratorio LEMSUR
Fuente: (Llerena)

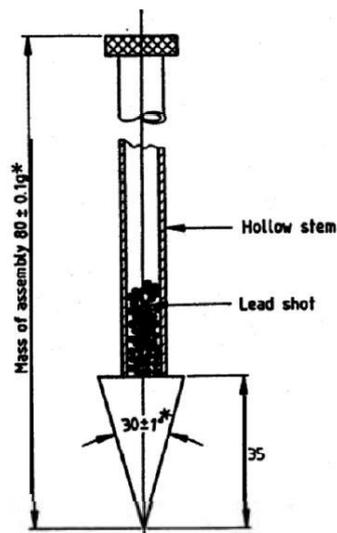


Figura 34. Especificaciones de penetrómetro cónico
Fuente: (Blázquez, 2016)

- Recipiente metálico estándar de 55 ± 2 mm de diámetro y 40 ± 2 mm de profundidad para la muestra.



Figura 35. Recipiente metálico estándar para ensayo
Fuente: (Llerena)

- Espátula.
- Balanza con apreciación de 0.01 gr.
- Tamiz N°40.
- Horno de secado.
- Agua.
- Cronómetro.



Figura 36. Cronómetro digital
Fuente: (Llerena)

3.3.2.2 Preparación de la muestra

Se utiliza suelo que pase por el tamiz N°40, la humedad del suelo debe ser homogenizada 24 horas antes del ensayo. La muestra debe mezclarse por al menos 10 minutos, en caso de tratarse de arcillas altamente plásticas el tiempo puede alcanzar los 40 minutos, con el fin de que la humedad sea la misma en toda la muestra.

3.3.2.3 Procedimiento

1. Tomar una cantidad de la muestra de suelo y colocarla en el recipiente metálico, cuidar que no exista aire atrapado en el recipiente.



Figura 37. Colocación de la muestra en recipiente metálico
Fuente: (Llerena)

2. Con el uso de una espátula se debe enrasar la muestra hasta alcanzar una superficie lisa.
3. Colocar la muestra debajo de la base del penetrómetro cónico y ajustar hasta que la punta del cono y la superficie de la muestra estén en contacto.



Figura 38. Ajuste del cono con la superficie de la muestra
Fuente: (Llerena)

4. El dispositivo de medida debe ser colocado en cero.
5. Se deja caer al cono por un tiempo de cinco segundos, posteriormente se anota la lectura de penetración.
6. Se procede a levantar el cono y realizar nuevamente el procedimiento con el fin de obtener una segunda lectura.
7. Si la diferencia entre la primera y segunda lectura es menor a 0.5 mm se saca el promedio. Si la diferencia entre lecturas es mayor a 0.5 mm pero menor a 1 mm, se debe realizar el ensayo por tercera vez. En caso de que la variación de las tres lecturas no sea mayor a 1 mm se hace un promedio de las tres lecturas. Si la variación de las tres lecturas es mayor a 1 mm se debe volver a realizar la mezcla y repetir el proceso descrito anteriormente.
8. Una vez que ha sido determinada la penetración del cono, se calcula el contenido de humedad, tomando aproximadamente 10 g de suelo del área que el cono penetró.



Figura 39. Muestras a ensayar
Fuente: (Llerena)

9. En caso de que se vaya a usar el método multipunto para el procesamiento de datos, se repite el ensayo un mínimo de tres veces variando la cantidad de agua.
10. Los valores de penetración recomendados están entre los 15 mm y 25 mm.

3.3.2.4 Tratamiento de resultados

Para la determinación de límite líquido mediante este método existen dos métodos, el método A: multipunto y el método B: un solo punto. Para el desarrollo

de este trabajo se escoge al método B de un solo punto y se utiliza la ecuación número 5 de la sección 2.4.1.1.2.

Ejemplo de cálculo

Para realizar el ejemplo de cálculo se toma como referencia la muestra de San Isidro. El ensayo se realiza dos veces y posteriormente se realiza el promedio entre los resultados obtenidos.

Tabla 12.
Datos iniciales para el primer ensayo

Ensayo N°1	
Peso cápsula (g)	10,75
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	22,12
Peso cápsula + suelo seco (g)	19,19
Lectura (mm)	20

Fuente: (Llerena)

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{22,12 - 19,19}{19,19 - 10,75} * 100 = 34,7\%$$

$$LL1 = k * w = 1 * 34,7 = 34,7$$

Tabla 13.
Datos iniciales para el segundo ensayo

Ensayo N°2	
Peso cápsula (g)	24,02
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	35,13
Peso cápsula + suelo seco (g)	32,25
Lectura (mm)	20

Fuente: (Llerena)

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{35,13 - 32,25}{32,25 - 24,02} * 100 = 35\%$$

$$LL1 = k * w = 1 * 35 = 35$$

$$LL = \frac{LL1 + LL2}{2} = \frac{34,7 + 35}{2} = 35$$

3.3.2.5 Resultados obtenidos para límite líquido mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico

Tabla 14.

Límite líquido obtenido a través del ensayo de Penetrómetro Cónico

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	LLn	LLn	LLn	LLn	LLn
1	35	40	31	28	37
2	34	40	31	29	38
3	35	40	31	29	38
4	35	40	31	29	39
5	34	39	31	29	38
6	34	40	31	28	38
7	34	39	31	29	38
8	35	39	31	29	38
9	34	39	31	28	38
10	34	39	31	29	39
11	35	39	31	29	39
12	35	39	32	29	38
13	34	39	31	28	38
14	34	39	31	28	38
15	34	40	31	29	38
16	34	40	31	28	37
17	35	38	31	28	37
18	34	39	31	28	37
19	35	39	31	29	38
20	34	39	31	29	38
21	35	39	31	28	39
22	34	40	31	28	37
23	34	39	31	29	37
24	34	40	31	29	38
25	34	40	31	28	38
26	34	39	31	28	39
27	34	40	31	29	38
28	34	40	31	29	38
29	34	39	31	29	38
30	34	40	31	29	39

Fuente: (Llerena)

3.4 ENSAYOS PARA LÍMITE PLÁSTICO

3.4.1 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE MÉTODO DE ROLLOS

El ensayo de límite plástico mediante el método de rollos de 3.2 mm, sigue los lineamientos establecidos en la Norma: ASTM D4318 referente a “Métodos estándar de ensayo para Límite Líquido, Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos”.

3.4.1.1 Equipo

- Placa de vidrio para formar los rollos de suelo.
- Espátula.
- Cápsula de aluminio o porcelana.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Horno.

3.4.1.2 Preparación de la muestra

Se puede utilizar la parte sobrante de suelo que fue utilizada para límite líquido. El suelo debe alcanzar un estado de humedad, en el cual se pueda formar rollos sin que el suelo se pegue a las manos.



Figura 40. Preparación de la muestra para ensayo de límite plástico
Fuente: (Llerena)

3.4.1.3 Procedimiento

1. Se trabaja con una parte de la muestra de aproximadamente 6 gr, la cual se hace rodar en las palmas de las manos, con presión constante.



Figura 41. Formación de las esferas
Fuente: (Llerena)

2. Se forman esferas de un centímetro cúbico.



Figura 42. Esferas de un centímetro cúbico
Fuente (Llerena)

3. Amasar las esferas hasta formar rollos de diámetro uniforme en toda su longitud, los cuales deben llegar a tener 3.2 mm de diámetro.



Figura 43. Rollos de un diámetro aproximado de 3.2 mm
Fuente: (Llerena)

4. Si cuando se alcanza el diámetro señalado el rollo no presenta segmentación de ± 1 cm o desmoronamiento, se deben repetir los pasos anteriores con la muestra de suelo un poco más seca.
5. Posteriormente se colocan los rollos en cápsulas de peso conocido y se registra el peso de la cápsula más la muestra, tomando en cuenta que se deben colocar al menos 6 gr de muestra.



Figura 44. Muestras ensayadas
Fuente: (Llerena)

6. Se colocan las cápsulas con sus respectivas muestras en el horno, por un tiempo aproximado de 24 horas, posterior a esto se toma el peso seco de los rollos más la cápsula y se procede a calcular el contenido de humedad, el cual indica el límite plástico del suelo.

3.4.1.4 Tratamiento de datos

Para la obtención de límite plástico es necesario realizar el promedio del contenido de humedad de al menos 2 muestras ensayadas y posteriormente realizar un promedio como se indica a continuación:

$$LP = \frac{w1 + w2}{n} \quad (37)$$

Donde:

- LP = Límite plástico.
- w_1 = Contenido de humedad correspondiente al ensayo número 1.
- w_2 = Contenido de humedad correspondiente al ensayo número 2.
- n = Número de puntos de humedad tomados.

Ejemplo de cálculo

Para realizar el ejemplo de cálculo se toma como referencia la muestra de San Isidro. El ensayo se realiza dos veces y posteriormente se realiza el promedio entre los resultados obtenidos.

Tabla 15.

Datos iniciales para el primer ensayo

Ensayo N°1	
Peso cápsula (g)	9,99
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	16,53
Peso cápsula + suelo seco (g)	15,43

Fuente: (Llerena)

Tabla 16.

Datos iniciales para el segundo ensayo

Ensayo N°2	
Peso cápsula (g)	10,34
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	17,09
Peso cápsula + suelo seco (g)	15,95

Fuente: (Llerena)

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{16,53 - 15,43}{15,43 - 9,99} * 100 = 20\%$$

$$W2\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{17,09 - 15,95}{15,95 - 10,34} * 100 = 20\%$$

$$LP = \frac{w_1 + w_2}{n} = \frac{20 + 20}{2} = 20$$

3.4.1.5 Resultados obtenidos para límite plástico mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm

Tabla 17.

Límite plástico obtenido mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	LP	LP	LP	LP	LP
1	20	24	21	19	25
2	23	24	21	18	25
3	23	24	21	18	25
4	23	21	20	18	25
5	23	24	22	19	25
6	24	24	20	18	28
7	20	23	20	18	25
8	20	23	19	18	26
9	22	25	20	19	25
10	23	22	21	18	26
11	21	24	22	18	26
12	24	22	20	18	25
13	24	24	21	18	26
14	20	24	22	18	26
15	20	23	20	18	26
16	22	23	21	18	27
17	23	25	21	19	26
18	22	23	22	19	26
19	21	23	20	18	25
20	21	23	21	19	25
21	20	23	21	19	25
22	24	24	21	19	26
23	22	25	21	18	25
24	20	24	20	18	26
25	23	24	21	19	25
26	20	24	21	19	25
27	20	23	20	20	26
28	24	23	20	18	26
29	20	23	21	18	26
30	20	23	21	19	26

Fuente: (Llerena)

3.4.2 DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE PENETRÓMETRO CÓNICO

Para la obtención de límite plástico mediante Penetrómetro Cónico, no existe una norma estandarizada, sin embargo, Braja Das en su libro “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, cuarta edición, expone que es posible la obtención de límite plástico a través de este equipo, siguiendo la misma metodología establecida en la Norma Británica BS 1377:1900 para la obtención de límite líquido con el Penetrómetro Cónico, con la única variante de que el peso del cono debe ser de 240gr.

3.4.2.1 Equipo

- Penetrómetro cónico.

Para poder cumplir con la especificación del ensayo, se realiza una adaptación del peso del cono, el cual tiene un peso de 80gr, razón por la cual es necesario acoplar una pieza de 160gr para lograr los 240gr mencionados por Braja Das.



Figura 45. Peso añadido al cono del penetrómetro cónico
Fuente: (Llerena)

- Recipiente metálico estándar de 55 ± 2 mm de diámetro y 40 ± 2 mm de profundidad para la muestra.
- Espátula.
- Balanza con apreciación de 0.01 gr.

- Tamiz N°40.
- Horno de secado.
- Agua.
- Cronómetro.

3.4.2.2 Procedimiento

1. Se mezcla una porción de suelo con un peso de aproximadamente 300 g en un tiempo de 10 minutos, con el uso de una espátula.
2. Tomar una cantidad de la muestra de suelo y colocarla en el recipiente metálico, cuidando que no exista aire atrapado en el recipiente.
3. Enrasar con una espátula para tener la superficie lisa.



Figura 46. Superficie enrasada para ensayo de límite plástico
Fuente: (Llerena)

4. Colocar la muestra debajo de la base del penetrómetro cónico, la punta se debe ajustar hasta que se encuentre en contacto con la superficie de la muestra.



Figura 47. Ajuste de la superficie de la muestra con el cono
Fuente: (Llerena)

5. Se deja caer al cono por un tiempo de 5 segundos, posteriormente se anota la lectura de penetración.
6. Una vez que ha sido determinada la penetración del cono, se calcula el contenido de humedad, tomando aproximadamente 10 g de suelo del área que el cono penetró.



Figura 48. Muestras a ensayar
Fuente: (Llerena)

7. Se debe realizar un mínimo de 3 pruebas, variando el contenido de humedad del suelo y determinando sus respectivas penetraciones.

3.4.2.3 Tratamiento de resultados

Se realiza una gráfica en papel semilogarítmico, en la cual la lectura de penetraciones se representa en las abscisas con eje logarítmico y el contenido de humedad en las ordenadas con eje aritmético. Se dibuja una línea que se aproxime a los puntos dibujados, en la cual el límite líquido corresponde a una lectura de penetración de 20mm (Das, 2013).

Ejemplo de cálculo

Para realizar el ejemplo de cálculo se toma como referencia la muestra de San Isidro.

Tabla 18.
Datos para el primer ensayo

Ensayo N° 1	
Peso cápsula (g)	9,62
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	21,56
Peso cápsula + suelo seco (g)	19,88
Lectura (mm)	17,7

Fuente: (Llerena)

$$W1\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{21,56 - 19,88}{19,88 - 9,62} * 100 = 16,4\%$$

Tabla 19.
Datos para el segundo ensayo

Ensayo N° 2	
Peso cápsula (g)	9,91
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	20,83
Peso cápsula + suelo seco (g)	18,13
Lectura (mm)	21,3

Fuente: (Llerena)

$$W2\% = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{20,83 - 18,13}{18,13 - 9,61} * 100 = 32,8\%$$

Tabla 20.
Datos para el tercer ensayo

Ensayo N° 3	
Peso cápsula (g)	9,41
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	19,46
Peso cápsula + suelo seco (g)	17,74
Lectura (mm)	18,8

Fuente: (Llerena)

$$W_{3\%} = \frac{W_w}{W_s} * 100 = \frac{19,46 - 17,74}{17,74 - 9,41} * 100 = 20,6\%$$

Una vez obtenidos los porcentajes de humedad en 3 puntos diferentes, se procede a realizar la gráfica en papel semi - logarítmico.

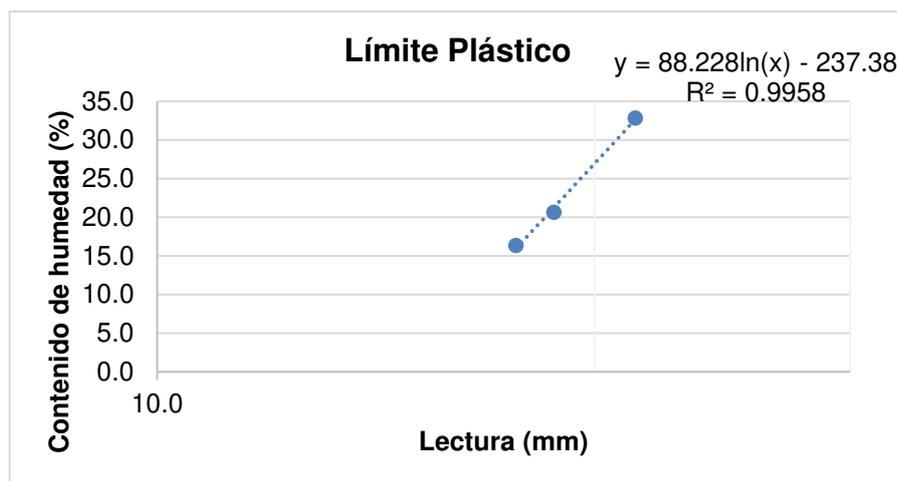


Figura 49. Gráfica para obtención de límite plástico
 Fuente: (Llerena)

Donde:

$$LP = 88,228 * \ln(x) - 237,38$$

$$LP = 88,228 * \ln(20) - 237,38$$

$$LP = 27$$

3.4.2.4 Resultados obtenidos para límite plástico mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico

Tabla 21.

Límite plástico obtenido mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	LP	LP	LP	LP	LP
1	27	24	22	19	26
2	28	23	22	20	28
3	27	23	21	19	28
4	27	23	22	19	27
5	27	23	21	18	27
6	26	23	21	19	27
7	27	24	22	19	27
8	27	22	22	19	27
9	27	23	21	20	27
10	27	22	21	19	26
11	27	23	21	19	27
12	27	24	21	19	27
13	27	22	21	19	27
14	27	23	22	19	26
15	27	23	22	18	26
16	27	23	22	20	27
17	27	23	22	19	27
18	27	23	22	20	27
19	27	23	21	20	27
20	27	23	22	19	28
21	27	23	21	20	27
22	27	23	22	20	26
23	27	23	21	18	26
24	27	23	22	19	26
25	27	23	22	20	27
26	27	23	22	20	27
27	27	23	22	20	26
28	27	23	22	20	27
29	27	23	21	20	27
30	27	23	20	19	27

Fuente: (Llerena)

3.5 ÍNDICE DE PLASTICIDAD

El índice de plasticidad se obtiene de la diferencia entre el límite líquido y límite plástico, se calcula a partir de la ecuación número 7 de la sección 2.4.3. Para el ejemplo de cálculo se toma como referencia el primer ensayo de la muestra de San Isidro.

- Mediante Ensayo Método de los 3 rollos:

$$IP = LL - LP = 35 - 20 = 15$$

- Mediante Ensayo de Penetrómetro Cónico:

$$IP = LL - LP = 35 - 27 = 8$$

3.5.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA ÍNDICE DE PLASTICIDAD

Tabla 22.

Índice de plasticidad mediante métodos tradicionales

N° Ensayo	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
	IP	IP	IP	IP	IP
1	15	15	10	8	10
2	11	15	10	9	10
3	11	16	10	9	10
4	13	17	10	11	11
5	12	14	9	8	10
6	11	15	12	9	8
7	15	15	12	10	10
8	15	16	12	10	9
9	13	15	12	10	10
10	12	18	10	10	8
11	14	16	10	9	9
12	12	17	10	10	10
13	13	16	10	10	9
14	15	16	9	9	9
15	15	19	11	10	9
16	14	17	11	10	8
17	11	13	11	9	10
18	14	16	9	8	9
19	14	16	11	10	10
20	14	15	10	8	11
21	15	15	10	8	11
22	13	14	10	8	9
23	11	14	10	10	11
24	15	14	11	9	9
25	12	14	10	8	10
26	16	15	10	9	10
27	15	16	11	8	9
28	12	16	11	10	9
29	16	16	10	9	9
30	16	16	11	9	9

Fuente: (Llerena)

Tabla 23.*Índice de plasticidad mediante ensayo de Penetrómetro Cónico*

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	IP	IP	IP	IP	IP
1	8	16	9	9	11
2	6	17	9	8	9
3	8	17	10	10	10
4	8	17	9	10	11
5	7	16	10	11	11
6	8	17	10	10	11
7	7	15	9	10	11
8	8	17	9	9	11
9	7	16	10	8	11
10	7	17	10	10	13
11	8	16	10	10	12
12	8	15	10	10	12
13	7	17	10	9	11
14	7	16	9	9	12
15	7	17	9	11	12
16	7	17	9	8	10
17	8	15	9	9	10
18	7	16	9	8	10
19	8	16	10	9	11
20	7	16	9	9	10
21	8	16	10	8	11
22	7	17	9	8	11
23	7	16	10	11	11
24	7	17	9	9	12
25	7	17	9	8	11
26	7	16	9	8	12
27	7	17	9	8	12
28	7	17	9	8	11
29	7	16	10	8	11
30	7	17	11	10	12

Fuente: (Llerena)

3.6 ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Para efectos de este análisis se va a seguir los requisitos expuestos en la Norma ASTM D422-63 y también con la guía establecida por Braja Das en su libro “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, cuarta edición.

3.6.1 EQUIPO

- Juego de tamices, siguiendo la referencia de la Figura 2, los mismos deben contar con bandeja de fondo y con una tapa superior, en lo posibles los tamices deben estar libres de golpes, con el fin de que el ajuste sea perfecto y no exista pérdida de material durante la ejecución del ensayo (Botía, 2015)



Figura 50. Tamices utilizados en el laboratorio “LEMSUR”
Fuente: (Llerena)

- Horno de secado.
- Recipientes de aluminio o porcelana.
- Balanza con precisión de 0.01 gr.
- Cepillo de alambre.

3.6.2 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

En muestras que pasan por el tamiz N°10 (2.00 mm), para suelos arenosos se recomienda aproximadamente 115 gr y para suelos limosos y arcillosos 65 gr. Para eliminar el suelo más fino se procede a lavar el material sobre el tamiz N°200 (0.075 mm), removiendo de un lado a otro con la mano. Se realiza el lavado hasta que el agua que sale por la parte inferior del tamiz N°200 (0.075mm) salga totalmente clara, es importante controlar el peso que pasa por dicho tamiz antes y después del lavado. Una vez que la muestra ha sido secada se procede a realizar el tamizado por la serie de tamices expuestos en la Figura 2.



Figura 51. Lavado del material a tamizar
Fuente: (Llerena)

3.6.3 PROCEDIMIENTO

1. En el primer tamiz se coloca el material que ha sido previamente preparado para el ensayo.



Figura 52. Material a ser tamizado
Fuente: (Llerena)

2. Se ejecuta el proceso de tamizado, ya sea de forma mecánica o manual, en este caso se realiza de forma manual, con movimientos que causen el desplazamiento necesario de las partículas.



Figura 53. Proceso de tamizado manualmente
Fuente: (Llerena)

3. Una vez realizado el proceso de tamizado, se debe pesar el material de suelo retenido en cada malla, haciendo uso de la balanza y de los recipientes previamente identificados.



Figura 54. Material retenido en cada tamiz
Fuente: (Llerena)

3.6.4 TRATAMIENTO DE RESULTADOS

Para el ejemplo se toma como referencia la muestra de San Isidro.

Tabla 24.
Granulometría muestra de San Isidro

Peso inicial húmedo (g)		120	Peso seco (g)		112,15
Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulado (%)	Porcentaje pasante (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,750	0,61	0,54	0,54	99,46
No. 10	2,000	0,81	0,72	1,27	98,73
No. 20	0,850	1,01	0,90	2,17	97,83
No. 40	0,425	3,36	3,00	5,16	94,84
No. 60	0,250	6,16	5,49	10,66	89,34
No. 100	0,150	9,64	8,60	19,25	80,75
No. 140	0,106	6,70	5,97	25,23	74,77
No. 200	0,075	4,28	3,82	29,04	70,96
Bandeja	-	79,58	70,96	100,00	0,00
Total		112,15			

Fuente: (Llerena)

Para el cálculo del peso de la bandeja se hace uso de la ecuación número 36 para cálculo de contenido de humedad, de la sección 3.2.3, como se indica a continuación:

$$w = \frac{w_h - w_s}{w_s} = 7\%$$

$$0,07 = \frac{120 - w_s}{w_s}$$

$$0,07w_s + w_s = 120$$

$$w_s = 112,15gr$$

$$P_{bandeja} = 112,15 - 0,61 - 0,81 - 1,01 - 3,36 - 6,16 - 9,64 - 6,70 - 4,28 = 79,58$$

Porcentaje retenido:

$$\% \text{Retenido} = \frac{M_r}{M_T} * 100 \quad (38)$$

Donde:

- M_r = Masa retenida en el tamiz
- M_T = Masa total

$$\% \text{Retenido por el tamiz } N^{\circ}4 = \frac{0,61}{112,15} * 100 = 0,54\%$$

Porcentaje retenido acumulado:

$$\% \text{ retenido acumulado} = \sum \% \text{ retenido en tamices mayores o iguales} \quad (39)$$

$$\% \text{ Porcentaje acumulado para el tamiz } N^{\circ}4 = 0,00 + 0,54 = 0,54\%$$

Porcentaje que pasa:

$$\% \text{ pasante} = 100 - \% \text{ retenido acumulado} \quad (40)$$

$$\% \text{ pasante para el tamiz } N^{\circ}4 = 100 - 0,54 = 99,46\%$$

3.6.5 RESULTADOS OBTENIDOS PARA GRANULOMETRÍA

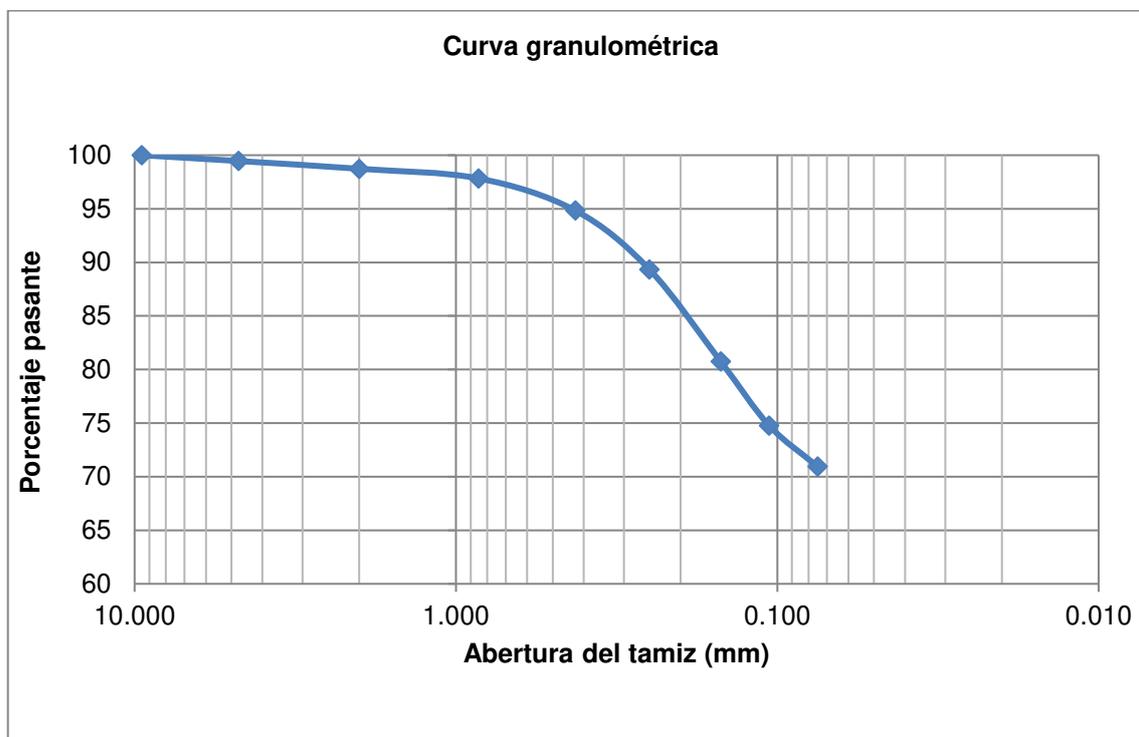


Figura 55. Curva Granulométrica San Isidro
Fuente: (Llerena)

Tabla 25.
Resultados granulométricos de San Isidro

Contenido de grava, (%)	1
Contenido de arena, (%)	28
Contenido de finos, (%)	71
Cu	**
Cc	**

Fuente: (Llerena)

Los coeficientes de uniformidad y curvatura no se pueden calcular, ya que el 70,96% pasa el tamiz N°200.

Tabla 26.
Granulometría de la muestra de Miraflores

Peso húmedo (g)		92,00	Peso seco (g)		70,77
Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulado (%)	Porcentaje pasante (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,750	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 10	2,000	0,70	0,99	0,99	99,01
No. 20	0,850	1,07	1,51	2,50	97,50
No. 40	0,425	3,15	4,45	6,95	93,05
No. 60	0,250	11,62	16,42	23,37	76,63
No. 100	0,150	11,53	16,29	39,66	60,34
No. 140	0,106	6,50	9,18	48,85	51,15
No. 200	0,075	4,86	6,87	55,72	44,28
Bandeja	-	31,34	44,28	100,00	0,00
Total		70,77			

Fuente: (Llerena)

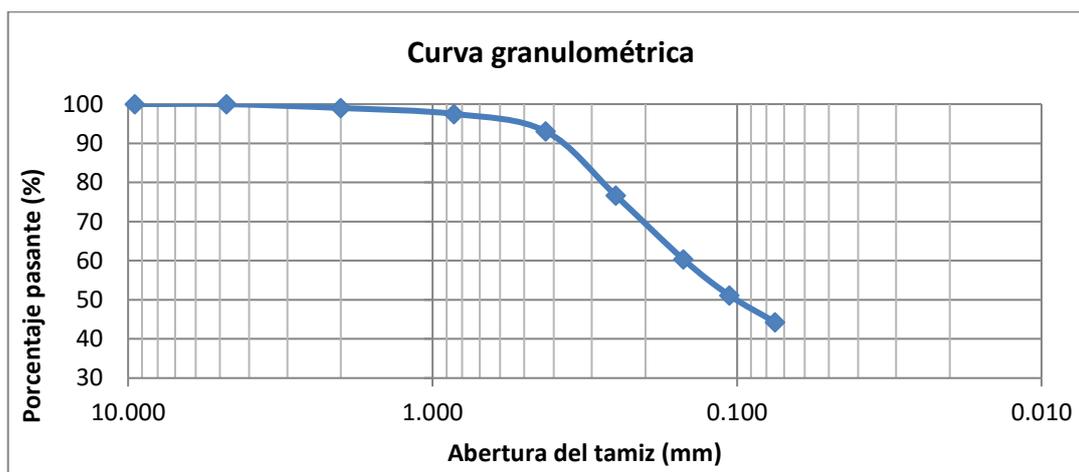


Figura 56. Curva Granulométrica de Miraflores
Fuente: (Llerena)

Tabla 27.
Resultados granulométricos de la muestra de Miraflores

Contenido de grava, (%)	0
Contenido de arena, (%)	56
Contenido de finos, (%)	44
Cu	**
Cc	**

Los coeficientes de uniformidad y curvatura no se pueden calcular, ya que el 44,28% pasa el tamiz N°200.

Tabla 28.
Granulometría de la muestra de Guangüiltagua

Peso húmedo (g)		102,00	Peso seco (g)		86,44
Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulado (%)	Porcentaje pasante (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,750	0,97	1,12	1,12	98,88
No. 10	2,000	0,42	0,49	1,61	98,39
No. 20	0,850	0,98	1,13	2,74	97,26
No. 40	0,425	2,74	3,17	5,91	94,09
No. 60	0,250	11,75	13,59	19,50	80,50
No. 100	0,150	11,32	13,10	32,60	67,40
No. 140	0,106	6,52	7,54	40,14	59,86
No. 200	0,075	5,67	6,56	46,70	53,30
Bandeja	-	46,07	53,30	100,00	0,00
Total		86,44			

Fuente: (Llerena)

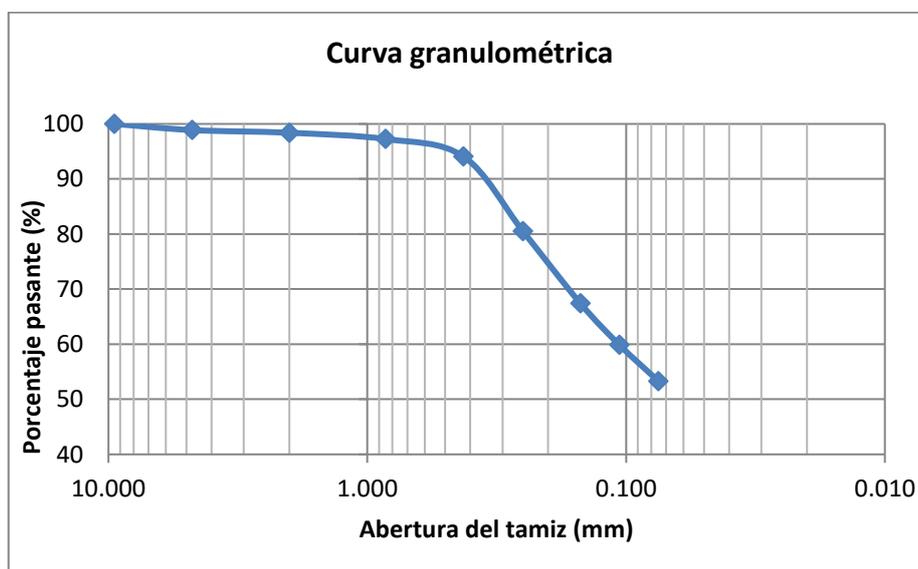


Figura 57. Curva Granulométrica de Guangüiltagua
Fuente: (Llerena)

Tabla 29.*Resultados granulométricos de la muestra de Guangüiltagua*

Contenido de grava, (%)	1
Contenido de arena, (%)	46
Contenido de finos, (%)	53
Cu	**
Cc	**

Fuente: (Llerena)

Los coeficientes de uniformidad y curvatura no se pueden calcular, ya que el 53,30% pasa el tamiz N°200.

Tabla 30.*Granulometría de la muestra del Carmen Bajo*

Peso húmedo (g)		114,80	Peso seco (g)		95,67
Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulado (%)	Porcentaje pasante (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,750	0,26	0,27	0,27	99,73
No. 10	2,000	0,65	0,68	0,95	99,05
No. 20	0,850	1,37	1,43	2,38	97,62
No. 40	0,425	5,28	5,52	7,90	92,10
No. 60	0,250	9,10	9,51	17,41	82,59
No. 100	0,150	9,11	9,52	26,94	73,06
No. 140	0,106	4,90	5,12	32,06	67,94
No. 200	0,075	4,37	4,57	36,63	63,37
Bandeja	-	60,63	63,37	100,00	0,00
Total		95,67			

Fuente: (Llerena)

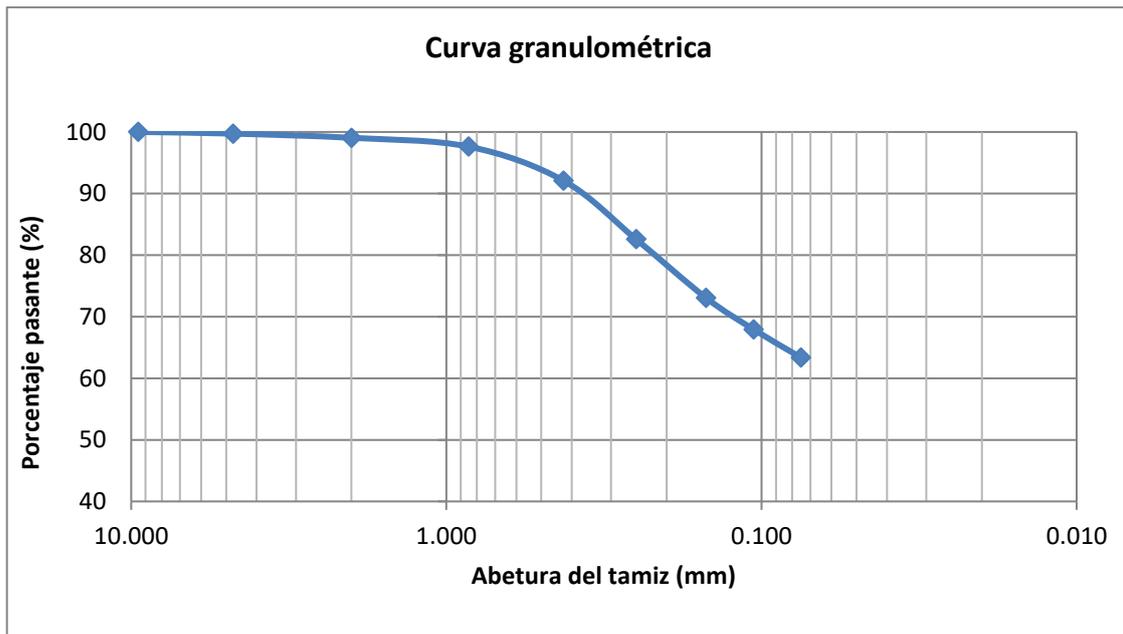


Figura 58. Curva Granulométrica de la muestra del Carmen Bajo
Fuente: (Llerena)

Tabla 31.

Resultados granulométricos de la muestra del Carmen Bajo

Contenido de grava, (%)	0
Contenido de arena, (%)	37
Contenido de finos, (%)	63
Cu	**
Cc	**

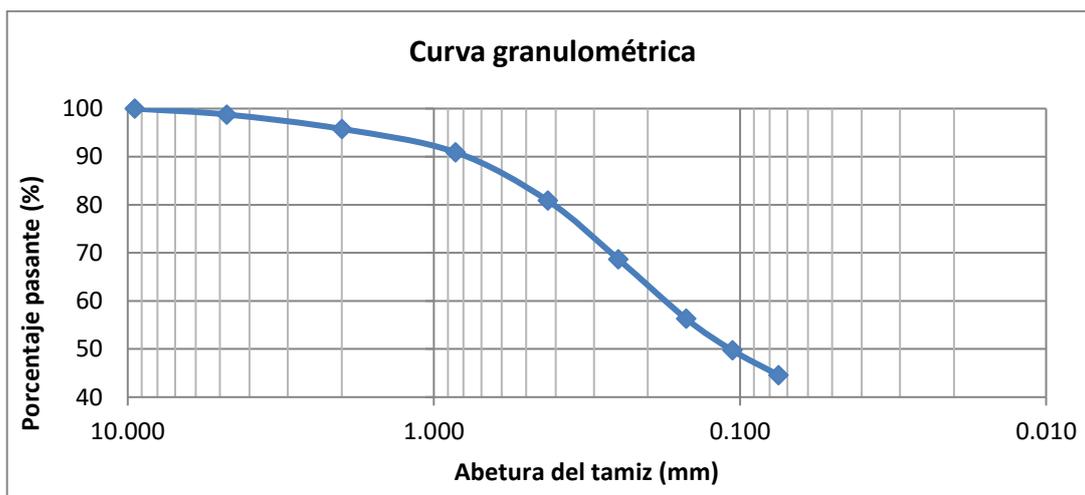
Fuente: (Llerena)

Los coeficientes de uniformidad y curvatura no se pueden calcular, ya que el 63,37% pasa el tamiz N°200.

Tabla 32.*Granulometría de la muestra del Comité del Pueblo*

Peso húmedo (g)		110,62	Peso seco (g)		94,55
Tamiz No.	Abertura tamiz (mm)	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje acumulado (%)	Porcentaje pasante (%)
3/8"	9,500	0,00	0,00	0,00	100,00
No. 4	4,750	1,17	1,24	1,24	98,76
No. 10	2,000	2,83	2,99	4,23	95,77
No. 20	0,850	4,59	4,85	9,09	90,91
No. 40	0,425	9,49	10,04	19,12	80,88
No. 60	0,250	11,51	12,17	31,30	68,70
No. 100	0,150	11,71	12,38	43,68	56,32
No. 140	0,106	6,22	6,58	50,26	49,74
No. 200	0,075	4,86	5,14	55,40	44,60
Bandeja	-	42,17	44,60	100,00	0,00
Total		94,55			

Fuente: (Llerena)

**Figura 59.** Curva granulométrica de la muestra del Comité del Pueblo

Fuente: (Llerena)

Tabla 33.*Resultados granulométricos de la muestra del Comité del Pueblo*

Contenido de grava, (%)	1
Contenido de arena, (%)	54
Contenido de finos, (%)	45
Cu	**
Cc	**

Fuente: (Llerena)

Los coeficientes de uniformidad y curvatura no se pueden calcular, ya que el 44,60% pasa el tamiz N°200.

3.7 ENSAYO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS SISTEMA SUCS

El desarrollo de este alcance sigue los lineamientos establecidos en el libro de Braja Das “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, en el cual se establecen los datos principales y los diagramas de flujo a seguir para una correcta clasificación.

3.7.1 DATOS NECESARIOS

- Cantidad de grava (porcentaje) que pasa el tamiz 3” y se retiene en el tamiz N°4.
- Cantidad de arena (porcentaje) que pasa el tamiz N°4 y se retiene en el tamiz N°200.
- Cantidad de limo y arcilla (porcentaje) que pasa el tamiz N°200.
- Límite líquido
- Coeficientes de uniformidad y curvatura.
- Índice de plasticidad.

Tabla 34.

Datos para la clasificación de suelos sistema SUCS

Muestras	LL	LP	IP	% Ret. tamiz N°4	% Pasa tamiz N°4	% Ret. tamiz N°200	% Pasa tamiz N°200	% Grava	% Arena	% Finos
San Isidro	35	22	13	0,54	99,46	29,04	70,96	1,00	28,00	71,00
Miraflores	39	23	16	0,00	100,00	55,72	44,28	0,00	56,00	44,00
Guanguiltagua	31	21	10	1,12	98,88	46,70	53,30	1,00	46,00	53,00
Carmen Bajo	27	18	9	0,27	99,73	36,63	63,37	0,00	37,00	63,00
Comité del Pueblo	35	26	9	1,24	98,76	55,40	44,60	1,00	54,00	45,00

Fuente: (Llerena)

3.7.2 PROCEDIMIENTO



Figura 60. Clasificación SUCS de la muestra de San Isidro I
Fuente: (Llerena)

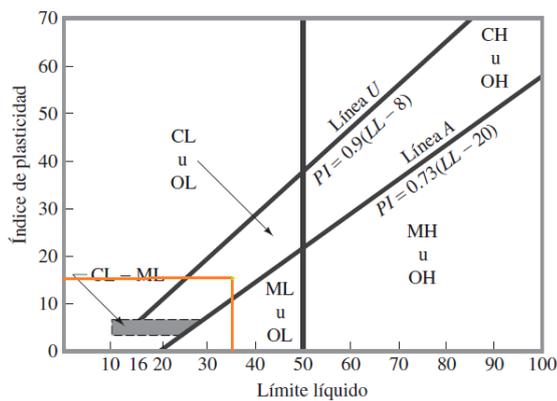


Figura 61. Carta de plasticidad para la muestra de San Isidro
Fuente: (Llerena)



Figura 62. Clasificación SUCS de la muestra de San Isidro II
Fuente: (Llerena)

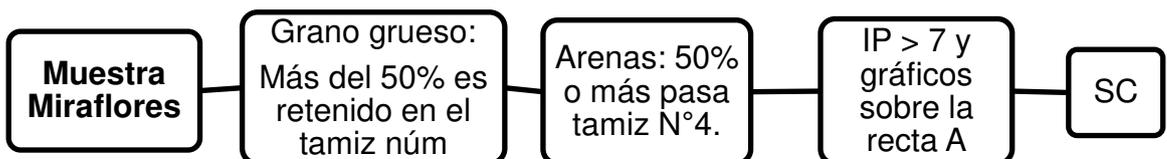


Figura 63. Clasificación SUCS de la muestra de Miraflores I
Fuente: (Llerena)

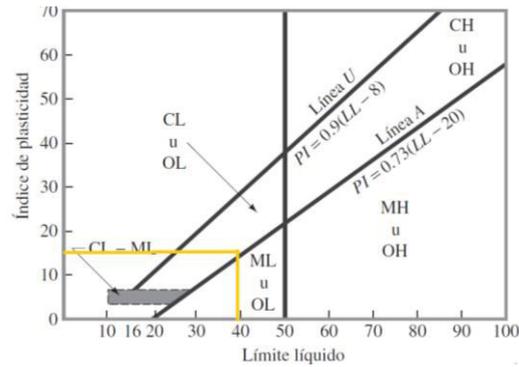


Figura 64. Carta de Plasticidad de la muestra de Miraflores
Fuente: (Llerena)



Figura 65. Clasificación SUCS de la muestra de Miraflores II
Fuente: (Llerena)

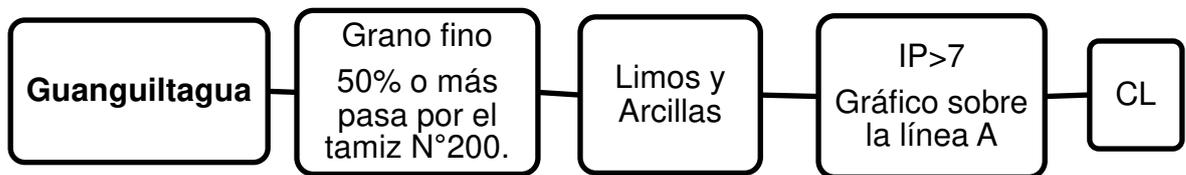


Figura 66. Clasificación SUCS de la muestra de Guanguiltagua I
Fuente: (Llerena)

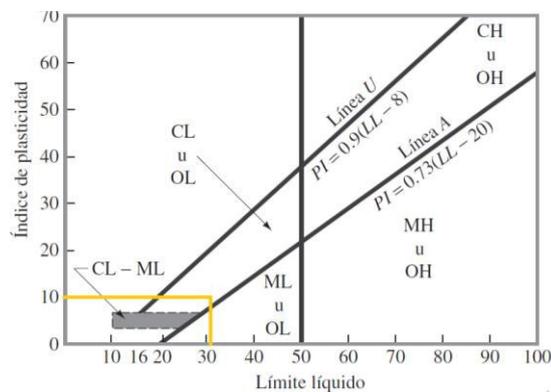


Figura 67. Carta de plasticidad de la muestra de Guanguiltagua
Fuente: (Llerena)

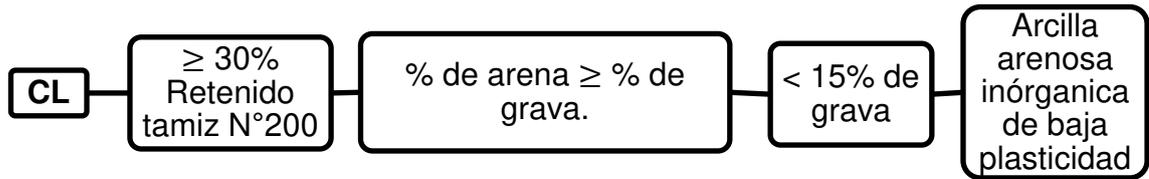


Figura 68. Clasificación SUCS de la muestra de Guanguiltagua II
Fuente: (Llerena)

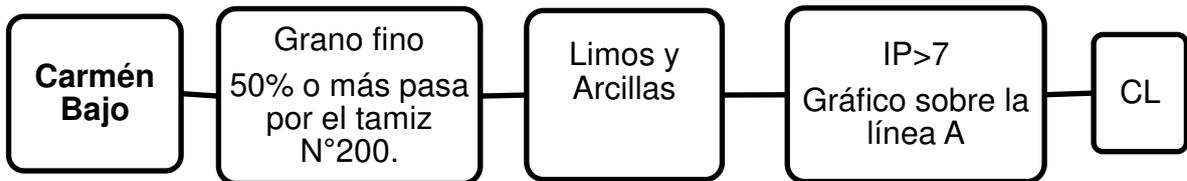


Figura 69. Clasificación SUCS de la muestra del Carmen Bajo I
Fuente: (Llerena)

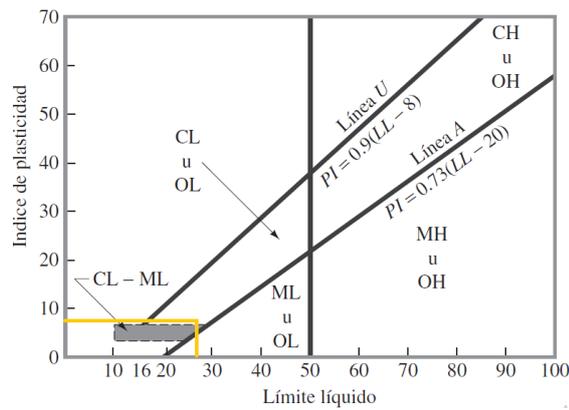


Figura 70. Carta de plasticidad de la muestra del Carmen Bajo
Fuente: (Llerena)

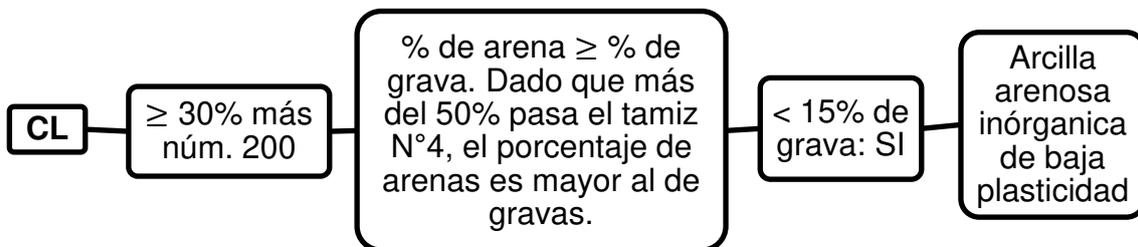


Figura 71. Clasificación SUCS de la muestra del Carmen Bajo II
Fuente: (Llerena)

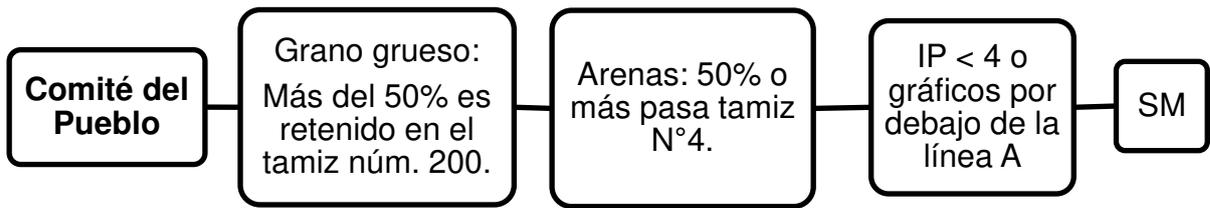


Figura 72. Clasificación SUCS de la muestra del Comité del Pueblo I
Fuente: (Llerena)

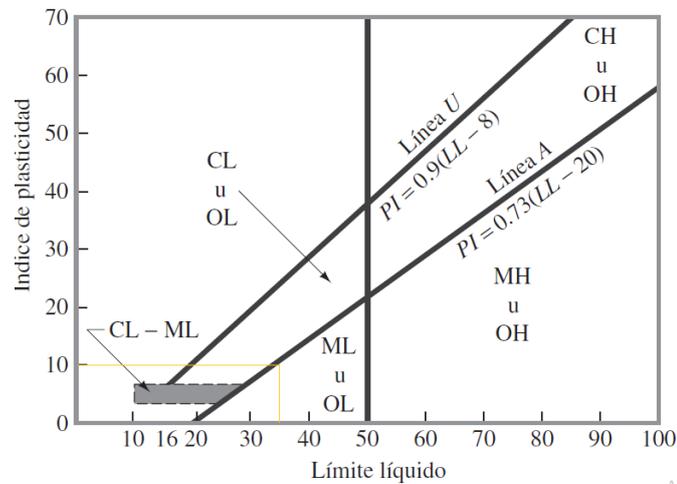


Figura 73. Carta de plasticidad de la muestra del Comité del Pueblo
Fuente: (Llerena)

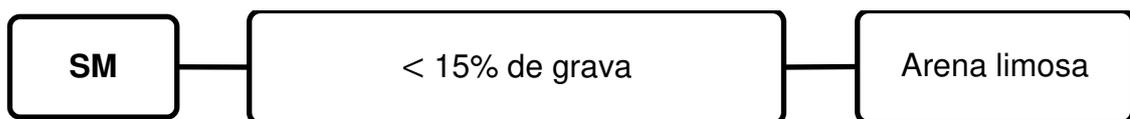


Figura 74. Clasificación SUCS de la muestra del Comité del Pueblo II
Fuente: (Llerena)

3.7.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Tabla 35.

Resultados de la clasificación SUCS para cada muestra

	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmén Bajo	Comité del Pueblo
N° Ensayo	Tipo de suelo				
1	CL	SC	CL	CL	SM
2	CL	SC	CL	CL	SM
3	CL	SC	CL	CL	SM
4	CL	SC	CL	CL	SM
5	CL	SC	CL	CL	SM
6	CL	SC	CL	CL	SM
7	CL	SC	CL	CL	SM
8	CL	SC	CL	CL	SM
9	CL	SC	CL	CL	SM
10	CL	SC	CL	CL	SM
11	CL	SC	CL	CL	SM
12	CL	SC	CL	CL	SM
13	CL	SC	CL	CL	SM
14	CL	SC	CL	CL	SM
15	CL	SC	CL	CL	SM
16	CL	SC	CL	CL	SM
17	CL	SC	CL	CL	SM
18	CL	SC	CL	CL	SM
19	CL	SC	CL	CL	SM
20	CL	SC	CL	CL	SM
21	CL	SC	CL	CL	SM
22	CL	SC	CL	CL	SM
23	CL	SC	CL	CL	SM
24	CL	SC	CL	CL	SM
25	CL	SC	CL	CL	SM
26	CL	SC	CL	CL	SM
27	CL	SC	CL	CL	SM
28	CL	SC	CL	CL	SM
29	CL	SC	CL	CL	SM
30	CL	SC	CL	CL	SM

Fuente: (Llerena)

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS ESTUDIADOS

De acuerdo con las ecuaciones expuestas en el capítulo 2, sección 2.10.2 y 2.10.3 respecto a parámetros estadísticos de posición y parámetros estadísticos de dispersión, se procede a realizar un análisis estadístico de las muestras, realizando el cálculo de la media, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación, siendo estos dos últimos parámetros los que permiten comparar la variabilidad de los resultados obtenidos entre grupos, es decir entre cada método realizado.

Tabla 36.

Parámetros estadísticos de posición y dispersión para ensayo de Límite Líquido

Ensayo de Copa de Casagrande					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
\bar{x}	35,23	39,05	31,17	27,46	35,17
s^2	0,74	0,74	0,28	0,30	0,21
s	0,86	0,86	0,53	0,55	0,46
CV	2,44	2,21	1,70	2,01	1,31
Ensayo de Penetrómetro Cónico					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
\bar{x}	34,30	39,40	31,26	28,52	38,05
s^2	0,22	0,32	0,02	0,04	0,39
s	0,47	0,56	0,13	0,20	0,62
CV	1,36	1,43	0,41	0,72	1,63

Fuente: (Llerena, 2022)

Con los datos expuestos en la Tabla 36, se puede inferir que los ensayos realizados mediante el equipo de Copa de Casagrande presentan una mayor dispersión con respecto a la media calculada, excepto para la muestra del Comité del Pueblo.

Tabla 37.*Parámetros estadísticos de posición y dispersión para ensayo de límite plástico*

Ensayo de Rollos de 3mm					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
\bar{x}	21,70	23,38	20,65	18,30	25,60
s^2	2,24	0,73	0,47	0,39	0,49
s	1,50	0,85	0,68	0,62	0,70
CV	6,90	3,65	3,31	3,39	2,74
Ensayo de Penetrómetro Cónico					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
\bar{x}	26,96	23,11	21,69	19,41	26,99
s^2	0,10	0,20	0,44	0,54	0,34
s	0,31	0,45	0,67	0,74	0,58
CV	1,15	1,93	3,07	3,80	2,15

Fuente: (Llerena)

Con los datos expuestos en la Tabla 37, se puede inferir que los ensayos realizados mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm, presentan una mayor dispersión con respecto a la media calculada, excepto para la muestra del Carmen Bajo.

Para el análisis de intervalo de confianza se va a considerar que los ensayos realizados para la obtención de límite líquido y límite plástico mediante el ensayo de Copa de Casagrande y método de rollos de 3.2 mm, respectivamente, son el conjunto de datos número uno. Por otra parte, los ensayos para la obtención de límite líquido y límite plástico mediante el Penetrómetro Cónico son tomados como el conjunto de datos número dos.

Para obtener el intervalo de confianza primero es necesario comprobar la siguiente hipótesis $s_1^2 = s_2^2$, haciendo uso de la prueba F de Fisher, para lo cual se debe obtener el valor de $F_{calculado}$, como se indica en la sección 2.10.7, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 38.

F calculado para cada conjunto de datos.

Muestra	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
Límite líquido					
$F_{calculado}$	0,29	0,43	0,06	0,14	1,81
F_{tabla}	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
$F_{cal} < F_{tabla}$	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto
Límite Plástico					
$F_{calculado}$	0,04	0,27	0,95	1,41	0,69
F_{tabla}	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
$F_{cal} < F_{tabla}$	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto	Correcto

Fuente: (Llerena)

Para un intervalo de confianza del 95%, $\frac{\alpha}{2} = 0,025$, $F_{tablas} = 2,1$; dado que se cumple la condición de que $F_{calculado} < F_{tablas}$ para todas las muestras, se puede considerar que las varianzas de los dos conjuntos de datos estudiados no difieren significativamente, comprobando así la hipótesis requerida para el cálculo de la desviación estándar y el t calculado para dos conjuntos de datos. Para este procedimiento se utilizan las ecuaciones expuestas en la sección 2.10.6, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 39.

Valor T calculado y desviación estándar para límite líquido

Ensayos para Límite Líquido					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
$ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 $	0,93	0,35	0,10	1,06	2,88
$T_{calculado}$	4,21	1,57	0,71	7,42	24,17
S_{IC}	0,69	0,73	0,39	0,42	0,55
T_{tabla}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$T_{cal} < T_{tabla}$	Variación	Correcto	Correcto	Variación	Variación

Fuente: (Llerena)

Para la determinación del intervalo de confianza para límite líquido mediante Copa de Casagrande y Penetrómetro Cónico, a partir de la Tabla 39, se puede inferir que existen diferencias significativas entre las medias de las muestras de: San Isidro, Carmen Bajo y Comité del Pueblo.

Tabla 40.*Valor T calculado y desviación estándar para límite plástico*

Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
$ x_1 - x_2 $	5,26	0,27	1,04	1,11	1,39
$T_{calculado}$	13,61	1,23	5,90	6,95	7,66
S_{IC}	1,08	0,68	0,67	0,68	0,64
T_{tabla}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
$T_{cal} < T_{tabla}$	Variación	Correcto	Variación	Variación	Variación

Fuente: (Llerena)

Para la determinación del intervalo de confianza para límite plástico mediante método de rollos de 3.2 mm y Penetrómetro Cónico, a partir de la Tabla 40, se puede inferir que existen diferencias significativas entre las medias de las muestras de: San Isidro, Guanguiltagua, Carmen Bajo y Comité del Pueblo.

Con los valores de T calculado y desviación estándar para los 2 conjuntos de datos se procede a calcular los intervalos de confianza, de acuerdo con lo expuesto en la sección 2.10.5 del presente trabajo. Es importante recalcar que los valores de límite líquido y límite plástico, se presenta en números enteros, pero con el objeto de realizar un correcto análisis de los intervalos de confianza, los mismos se presentan con dos cifras decimales.

Tabla 41.*Intervalo de confianza para obtención de límite líquido*

Intervalo de confianza Ensayo de Copa de Casagrande					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
Límite inferior	34,70	38,84	31,12	26,90	32,75
Límite superior	35,76	39,26	31,22	28,03	37,58
Intervalo de confianza Ensayo de Penetrómetro Cónico					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
Límite inferior	33,77	39,19	31,21	27,96	35,63
Límite superior	34,83	39,61	31,31	29,09	40,46

Fuente: (Llerena)

Comparando los resultados obtenidos para límite líquido mediante Copa de Casagrande de la Tabla 11 y los resultados mediante Penetrómetro Cónico de la Tabla 14, con los intervalos de confianza de la Tabla 41, se puede deducir que los resultados obtenidos mediante el método tradicional, presentan un mayor número de mediciones fuera del intervalo de confianza, para las muestras de Miraflores y Guanguiltagua un 26.67% (ocho) de sus mediciones se encuentran fuera de rango, para las muestras de San Isidro y Carmen Bajo un 6.67% (dos) de sus mediciones se encuentran fuera de rango, mientras que las mediciones del Comité del Pueblo se encuentran dentro del intervalo de confianza. En contraste, los resultados obtenidos mediante el Penetrómetro Cónico para las muestras de Miraflores y Guanguiltagua presentan un 3,33% (una) de mediciones fuera del intervalo establecido, para las demás muestras el 100.00% (treinta) de las mediciones se encuentran dentro del intervalo de confianza.

Tabla 42.

Intervalo de confianza para obtención de límite plástico

Intervalo de confianza Ensayo de Rollos de 3.2 mm					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
Límite inferior	19,02	23,23	19,92	17,43	24,70
Límite superior	24,39	23,53	21,38	19,16	26,50
Intervalo de confianza Ensayo de Penetrómetro Cónico					
Parámetro	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
Límite inferior	24,28	22,96	20,97	18,55	26,09
Límite superior	29,65	23,26	22,42	20,28	27,89

Fuente: (Llerena)

Comparando los resultados obtenidos para límite plástico mediante ensayo de rollos de 3.2 mm de la Tabla 17 y los resultados mediante Penetrómetro Cónico de la Tabla 21, con los intervalos de confianza de la Tabla 42, se puede deducir que los resultados obtenidos mediante el método tradicional, presenta un mayor número de mediciones fuera del intervalo de confianza. Para la muestra de Miraflores un 13,33% (cuatro) se sus mediciones se encuentran fuera de rango, para la muestra de Guanguiltagua un 10.00% (3) de sus mediciones se encuentran fuera de rango, las demás muestras tienen el 100.00% (treinta) de sus mediciones dentro del

intervalo de confianza. En contraste, los resultados obtenidos mediante el Penetrómetro Cónico, para la muestra de Miraflores presenta un 10.00% (tres) de mediciones fuera del intervalo establecido, para las demás muestras el 100.00% (treinta) de las mediciones se encuentran dentro del intervalo de confianza.

4.2 ANÁLISIS DE LA INCERTIDUMBRE

Como ejemplo de la metodología utilizada para determinar la incertidumbre asociada a una medida, se va a usar como ejemplo de cálculo a la muestra de San Isidro.

4.2.1 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE ENSAYO DE COPA DE CASAGRANDE

Primero: Se realiza la especificación del mesurando y se establece el modelo matemático. En este caso el mesurando es el límite líquido y el modelo matemático se representa como.

$$f = LL$$

Segundo: Se señalan las posibles fuentes de incertidumbre

- Calibración y resolución de los instrumentos utilizados; esta variable es analizada en la incertidumbre tipo B, para el desarrollo del presente trabajo se evaluó la resolución de la balanza.
- Errores de apreciación al momento en que se cierra el surco o variabilidad en la velocidad con que gira la manivela, estas dos variables son analizadas en la incertidumbre tipo A, al evaluar la repetibilidad de los resultados obtenidos.

Tercero: Se realiza la evaluación de la incertidumbre tipo A y tipo B.

- **Cálculo de la incertidumbre tipo A**

La incertidumbre tipo A para cada muestra se calcula mediante la ecuación número 12 de la sección 2.9.3.1.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,86}{\sqrt{30}} = 0,16$$

- **Cálculo de incertidumbre tipo B**

La resolución de la balanza tiene una apreciación de 0.01 g, se calcula mediante la ecuación número 13 de la sección 2.9.3.2.

$$U_B = \frac{\text{Resolución}}{\sqrt{3}} = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,01g$$

Cuarto: Se procede a estimar la incertidumbre estándar combinada con la ecuación número 15 de la sección 2.9.4.

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(0,16)^2 + (0,01)^2} = 0,16$$

Quinto: Se estima la incertidumbre expandida, con la ecuación número 16 de la sección 2.9.5, considerando un nivel de confianza del 95%, entonces $k=1,96$

$$U_E = K * U_C$$

$$U_E = 1,96 * 0,16 = 0,313$$

Sexto: Se expresa el resultado final con la ecuación número 17 de la sección 2.9.6 referente a expresión de la incertidumbre, la cual está completa cuando la medición se encuentra acompañada por una declaración cuantitativa de la incertidumbre, de tal forma se puede analizar la confiabilidad del resultado:

$$Y = y \pm U(y) = \overline{LL} \pm U_E = 35 \pm 0,31$$

Lo que significa que la mejor estimación del valor atribuible al mesurando Y es 35 y se puede esperar que en el intervalo de 34.69 a 35.31 este comprendida una gran parte de la distribución de valores que podrían ser atribuidos a Y .

Séptimo: Finalmente, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 43.

Evaluación de la incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande

Muestra	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s	0,86	0,86	0,53	0,55	0,46
u_A	0,16	0,16	0,10	0,10	0,08
u_B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
u_C	0,16	0,16	0,10	0,10	0,08
u_E	0,31	0,31	0,19	0,20	0,17

Fuente: (Llerena)

Tabla 44.

Expresión de incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande

Muestra	Valor medio	\pm	Incertidumbre
San Isidro	35	\pm	0,31
Miraflores	39	\pm	0,31
Guanguiltagua	31	\pm	0,19
Carmén Bajo	27	\pm	0,20
Comité del Pueblo	35	\pm	0,17

Fuente: (Llerena)

4.2.2 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE ENSAYO DE ROLLOS DE 3.2 mm

Primero: El mesurando a estudiar es el límite plástico y el modelo matemático se representa como:

$$F = LP$$

Segundo: Se señalan las posibles fuentes de incertidumbre

- Calibración y resolución de los instrumentos utilizados; esta variable es analizada en la incertidumbre tipo B, para el desarrollo del presente trabajo se evaluó la resolución de la balanza.
- Errores de apreciación al momento que se presentan las grietas en los rollos, cuando los mismos han alcanzado un diámetro de 3.2 mm aproximadamente, esta variable es analizada en la incertidumbre tipo A, al evaluar la repetibilidad de los resultados obtenidos.

Tercero: Se realiza la evaluación de la incertidumbre tipo A y tipo B.

- **Cálculo de la incertidumbre tipo A**

La incertidumbre tipo A para cada muestra se calcula mediante la ecuación número 12 de la sección 2.9.3.1.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{1,50}{\sqrt{30}} = 0,27$$

- **Cálculo de incertidumbre tipo B**

La incertidumbre tipo B es la misma que fue establecida en la sección 4.1.1 referente al análisis de incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande, ya que la fuente estudiada es la misma, entonces:

$$U_B = 0,01g$$

Cuarto: Se procede a estimar la incertidumbre estándar combinada con la ecuación número 15 de la sección 2.9.4.

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(0,27)^2 + (0,01)^2} = 0,27$$

Quinto: Se estima la incertidumbre expandida, con la ecuación número 16 de la sección 2.9.5, considerando un nivel de confianza del 95%, entonces $k=1,96$

$$U_E = K * U_C$$

$$U_E = 1,96 * 0,27 = 0,54$$

Sexto: Se expresa el resultado final con la ecuación número 17 de la sección 2.9.6 referente a expresión de la incertidumbre:

$$Y = y \pm U(y) = \overline{LP} \pm U_E = 22 \pm 0,54$$

Lo que significa que la mejor estimación del valor atribuible al mesurando Y es 22 y se puede esperar que en el intervalo de 21.46 a 22.54 este comprendida una gran parte de la distribución de valores que podrían ser atribuidos a Y .

Séptimo: Finalmente, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 45.

Evaluación de la incertidumbre para límite plástico mediante método de rollos de 3.2 mm

Muestra	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s	1,50	0,85	0,68	0,62	0,70
u_A	0,27	0,16	0,12	0,11	0,13
u_B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
u_C	0,27	0,16	0,12	0,11	0,13
u_E	0,54	0,31	0,24	0,22	0,25

Fuente: (Llerena)

Tabla 46.

Expresión de incertidumbre para límite plástico mediante rollos de 3.2 mm

Muestra	Valor medio	±	Incertidumbre
San Isidro	22	±	0,54
Miraflores	23	±	0,31
Guanguiltagua	21	±	0,24
Carmén Bajo	18	±	0,22
Comité del Pueblo	26	±	0,25

Fuente: (Llerena)

4.2.3 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE LÍQUIDO MEDIANTE ENSAYO DE PENETRÓMETRO CÓNICO

Primero: Se realiza la especificación del mesurando y se establece el modelo matemático. En este caso el mesurando es el límite líquido y el modelo matemático se representa como:

$$f = LL \quad (76)$$

Segundo: Se señalan las posibles fuentes de incertidumbre

- Calibración y resolución de los instrumentos utilizados; esta variable es analizada en la incertidumbre tipo B, para el desarrollo del presente trabajo se evaluó la resolución de la balanza.
- Variación en las lecturas de penetración registradas, debido a la variación del contenido de humedad, estas variables son analizadas en la incertidumbre tipo A, al evaluar la repetibilidad de los resultados obtenidos.

Tercero: Se realiza la evaluación de la incertidumbre tipo A y tipo B.

• Cálculo de la incertidumbre tipo A

La incertidumbre tipo A para cada muestra se calcula mediante la ecuación número 12 de la sección 2.9.3.1.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,47}{\sqrt{30}} = 0,09$$

- **Cálculo de incertidumbre tipo B**

La incertidumbre tipo B es la misma que fue establecida en la sección 4.1.1 referente al análisis de incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande, ya que la fuente estudiada es la misma, entonces:

$$U_B = 0,01g$$

Cuarto: Se procede a estimar la incertidumbre estándar combinada con la ecuación número 15 de la sección 2.9.4.

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(0,09)^2 + (0,01)^2} = 0,09$$

Quinto: Se estima la incertidumbre expandida, con la ecuación número 16 de la sección 2.9.5, considerando un nivel de confianza del 95%, entonces $k=1,96$.

$$U_E = K * U_C$$

$$U_E = 1,96 * 0,09 = 0,17$$

Sexto: Se expresa el resultado final con la ecuación número 17 de la sección 2.9.6 referente a expresión de la incertidumbre:

$$Y = y \pm U(y) = \overline{LL} \pm U_E = 35 \pm 0,31$$

Lo que significa que la mejor estimación del valor atribuible al mesurando Y es 35, se puede esperar que en el intervalo de 34.69 a 35.31 este comprendida una gran parte de la distribución de valores que podrían ser atribuidos a Y .

Séptimo: Finalmente, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 47.*Evaluación de la incertidumbre para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico*

Muestra	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s	0,47	0,56	0,13	0,20	0,62
u_A	0,09	0,10	0,02	0,04	0,11
u_B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
u_C	0,09	0,10	0,02	0,04	0,11
u_E	0,17	0,20	0,05	0,07	0,22

Fuente: (Llerena)

Tabla 48.*Expresión de incertidumbre para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico*

Muestra	Valor medio	±	Incertidumbre
San Isidro	34	±	0,17
Miraflores	39	±	0,20
Guanguiltagua	31	±	0,05
Carmén Bajo	29	±	0,07
Comité del Pueblo	38	±	0,22

Fuente: (Llerena)

4.2.4 ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE PARA LÍMITE PLÁSTICO MEDIANTE ENSAYO DE PENETRÓMETRO CÓNICO

Primero: El mesurando a estudiar es el límite plástico y el modelo matemático se representa como:

$$f = LP$$

Segundo: Se señalan las posibles fuentes de incertidumbre.

- Calibración y resolución de los instrumentos utilizados; esta variable es analizada en la incertidumbre tipo B, para el desarrollo del presente trabajo se evaluó la resolución de la balanza.
- Variación en las lecturas de penetración registradas, debido a la variación del contenido de humedad, estas variables son analizadas en la incertidumbre tipo A, al evaluar la repetibilidad de los resultados obtenidos.

Tercero: Se realiza la evaluación de la incertidumbre tipo A y tipo B.

- **Cálculo de la incertidumbre tipo A**

La incertidumbre tipo A para cada muestra se calcula mediante la ecuación número 12 de la sección 2.9.3.1.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,31}{\sqrt{30}} = 0,06$$

- **Cálculo de incertidumbre tipo B**

La incertidumbre tipo B es la misma que fue establecida en la sección 4.1.1 referente al análisis de incertidumbre para límite líquido mediante Copa de Casagrande, ya que la fuente estudiada es la misma, entonces:

$$U_B = 0,01g$$

Cuarto: Se procede a estimar la incertidumbre estándar combinada con la ecuación número 15 de la sección 2.9.4.

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{(0,06)^2 + (0,01)^2} = 0,06$$

Quinto: Se estima la incertidumbre expandida, con la ecuación número 16 de la sección 2.9.5, considerando un nivel de confianza del 95%, entonces $k=1,96$.

$$U_E = K * U_C$$

$$U_E = 1,96 * 0,06 = 0,11$$

Sexto: Se expresa el resultado final con la ecuación número 17 de la sección 2.9.6 referente a expresión de la incertidumbre:

$$Y = y \pm U(y) = \overline{LP} \pm U_E = 27 \pm 0,11$$

Lo que significa que la mejor estimación del valor atribuible al mesurando Y es 27, se puede esperar que en el intervalo de 26.89 a 27.11 este comprendida una gran parte de la distribución de valores que podrían ser atribuidos a Y .

Séptimo: Finalmente, los resultados obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 49.

Evaluación de la incertidumbre para límite plástico mediante Penetrómetro Cónico

Muestra	San Isidro	Miraflores	Guanguiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s	0,31	0,45	0,67	0,74	0,58
u_A	0,06	0,08	0,12	0,13	0,11
u_B	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
u_C	0,06	0,08	0,12	0,13	0,11
u_E	0,11	0,16	0,24	0,26	0,21

Fuente: (Llerena)

Tabla 50.

Expresión de incertidumbre para límite plástico mediante penetrómetro cónico

Muestra	Valor medio	\pm	Incertidumbre
San Isidro	27	\pm	0,11
Miraflores	23	\pm	0,16
Guanguiltagua	22	\pm	0,24
Carmén Bajo	19	\pm	0,26
Comité del Pueblo	27	\pm	0,21

Fuente: (Llerena)

4.3 DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN PARA LOS MÉTODOS TRADICIONALES

En la presente sección se desarrolla una propuesta de procedimiento de validación para los ensayos tradicionales utilizados para la obtención de límite líquido y límite plástico.

4.3.1 ESTABLECER LA NECESIDAD ANALÍTICA

El requerimiento para el cálculo de límite líquido y límite plástico radica en que, de una manera rápida y económica, se puede conocer información importante acerca del comportamiento del suelo. El cálculo de estos límites junto al análisis granulométrico, pertenecen a ensayos de identificación para conocer características básicas del suelo. Mientras que la granulometría permite conocer la magnitud cuantitativa de suelos finos, los límites de Atterberg señalan la calidad de este, permitiendo conocer líneas de acción ingenieril.

4.3.2 MÉTODO

La norma establecida utilizada para obtención de límite líquido y límite plástico es la siguiente:

- Norma ASTM D4318: Método de Ensayo Estándar para Límite Líquido, Límite Plástico, e Índice de Plasticidad de Suelos.

Para realizar la validación del método se va a correlacionar los resultados obtenidos tradicionalmente con los resultados obtenidos mediante el uso del equipo de penetrómetro cónico, el cual hace referencia a lo siguiente:

- BS 1377:1990; Métodos de Ensayo para Suelos con fines de Ingeniería Civil.
- Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, cuarta edición, Braja Das

4.3.3 BORRADOR DEL PROCEDIMIENTO

4.3.3.1 Objeto

El diseño de este procedimiento tiene como propósito establecer si los métodos tradicionales usados para la obtención de límite líquido y límite plástico son adecuados para su propósito.

4.3.3.2 Alcance

Este procedimiento se aplica a cinco muestras de suelo plástico tomadas en la ciudad de Quito, en las cuales se ejecutará 30 repeticiones de cada ensayo en base a la metodología expuesta en el capítulo 3 del presente trabajo.

4.3.3.3 Referencias

Las referencias utilizadas son las mencionadas en la sección 4.2.2.

4.3.3.4 Descripción

Parámetros y rangos

Los parámetros para valorar mediante el método expuesto son: límite líquido y límite plástico. El rango establecido de límite líquido puede oscilar entre 0 y 150, pero la mayor parte de suelos tienen $LL < 100$. Por otra parte, el valor de límite plástico oscila entre 0 y 100, en su mayor parte los valores son menores a 40 (Osorio, 2010).

Tabla 51.

Rangos para límite líquido y límite plástico

Suelo	LL	LP	IP
Arena	10 a 25	Ninguno	Ninguno
Limo	20 a 35	10 a 30	5 a 15
Arcilla	40 a 150	15 a 50	20 a 100

Fuente: (De Llorens, 2007)

Por otra parte, también se debe evaluar que los resultados obtenidos se encuentren dentro de los intervalos de confianza establecidos para cada método como se indican en las Tablas 41 y 42 de la sección 4.1.

Aparatos y equipos

- Copa de Casagrande: Está diseñada para obtener el valor de límite líquido de suelos, consta de una base moldeada de caucho duro, una copa torneada en bronce, montada con pasador y ranura, una leva moldeada plástico auto lubricante. Además, cuenta con la herramienta de ranura tipo ASTM plástica. Su peso neto es de 3,6kg.
- Penetrómetro cónico: cono de acero inoxidable o aluminio de largo de 35mm aproximadamente y un ángulo central de $30 \pm 1^\circ$. El dispositivo de caída debe tener un peso de 240 gr. El aparato debe tener una precisión de 0.01mm.
- Balanza: debe tener una precisión de 0.01 gr.
- Horno de secado.

Procedimiento

El procedimiento utilizado para la realización de los ensayos está expuesto en el capítulo 3 del presente trabajo.

Es importante mencionar que los equipos que van a ser utilizados para la realización de los ensayos deben ser adecuados para cumplir con los objetivos propuestos, ya que su correcto funcionamiento es un factor que influye en la exactitud y confiabilidad de los ensayos. Los equipos deben ser sujetos a procesos de mantenimiento y calibración periódicamente, como recomendación se sugiere realizar una calibración de los equipos cada 4 meses (Lisintuña, 2018).

Datos para registrar, método de análisis y presentación

Los datos registrados se presentan en la tabla 47, a partir de los cuales es posible la obtención de los parámetros a analizar.

Tabla 52.
Datos registrados y parámetros calculados

Datos	Parámetro Calculado	Método de análisis
Peso, número de golpes	Límite Líquido	Copa de Casagrande
Peso	Límite Plástico	Método de 3 rollos
Peso, deformación	Límite Líquido y límite plástico	Penetrómetro Cónico

Fuente: (Llerena)

El análisis para realizar para la obtención de cada parámetro está descrito en el capítulo 3 del presente trabajo, referente a metodología.

4.3.4 ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN

De acuerdo con el desarrollo de cada método, se analizan los parámetros de validación aplicables a los ensayos establecidos para la obtención de límite líquido y límite plástico, tomando en cuenta que no se cuenta con materiales de referencia se van a analizar los siguientes parámetros:

- Intervalo de trabajo del método
- Exactitud (veracidad y precisión).
- Repetibilidad y reproducibilidad.
- Incertidumbre

4.3.5 OBJETIVOS PARA LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN

- Contrastar que los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo de trabajo.
- Contrastar la exactitud de los métodos de ensayo a través del análisis de veracidad y precisión.
- Realizar un análisis ANOVA para obtener la desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad para cada método estudiado.
- Calcular la incertidumbre asociada a los resultados para cada método de ensayo.

4.3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ESTADÍSTICO

Para poder cumplir con los objetivos establecidos, se realiza 30 ensayos con cada metodología para las cinco muestras.

Intervalo de trabajo

La tabla 51 presenta rangos de trabajo generales de límites líquidos y límites plásticos para diferentes tipos de suelos. Sin embargo, se debe analizar si las mediciones obtenidas para cada método están dentro del intervalo de confianza, el cual se calculó en la sección 4.1 referente a comparación de los métodos estudiados, en la misma se pudo establecer que en los métodos tradicionales, tanto para obtención de límite líquido, como de límite plástico, se presentan mediciones fuera del intervalo de confianza.

Para límite líquido mediante Copa de Casagrande, en las muestras de Miraflores y Guangüiltagua se presentó un 26.67% (ocho) de mediciones fuera de rango, en las muestras de San Isidro y Carmen Bajo se presentó un 6.67% (dos) de sus mediciones fuera de rango, mientras que en las mediciones del Comité del Pueblo el 100.00% (treinta) se encuentran dentro del intervalo de confianza.

Para límite plástico mediante Penetrómetro Cónico, en la muestra de Miraflores se presentó un 13,33% (cuatro) de sus mediciones fuera de rango, en la muestra de Guangüiltagua un 10.00% (3) de sus mediciones fuera de rango y en las demás muestras el 100.00% (treinta) de sus mediciones se encuentran dentro del intervalo de confianza.

Exactitud

El análisis de la exactitud comprende el cálculo de veracidad y precisión. La veracidad se expresa en forma de sesgo, y a su vez el sesgo se halla con una comparación de la media y un valor de referencia; debido a que no se cuenta con material de referencia no se puede determinar la veracidad para cada método.

Por otra parte, para el análisis de la precisión se procede a realizar un análisis ANOVA, en el cual se va a determinar la repetibilidad y reproducibilidad de cada método. Sin embargo, cabe mencionar que, dado que la veracidad para cada método no se puede determinar, por ende, la exactitud tampoco.

Repetibilidad y reproducibilidad

Para poder determinar la repetibilidad y reproducibilidad, es necesario conocer sus respectivas varianzas, cuya determinación se va a realizar a partir de un análisis de varianza ANOVA, de acuerdo con lo establecido en la sección 2.10.8. Una vez que se han calculado estas variables, se puede determinar la desviación estándar de repetibilidad y la desviación estándar de reproducibilidad, como se establece en las ecuaciones número 9 y 10 de la sección 2.8.1 referente a “Características de desempeño analizadas para la validación de un método”.

Como ejemplo de cálculo, se va a realizar el análisis de varianza ANOVA para determinar límite líquido mediante el equipo de Copa de Casagrande, en la muestra de Miraflores. Cabe recordar que los valores de límite líquido y límite plástico se expresan con números enteros.

Tabla 53.
Datos para el análisis ANOVA de Miraflores

ANALISTA	PLL	PLL	PLL	PLL	PLL
MUESTRA	MIRAFLORES				
N° Mediciones	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
1	39	38	40	39	38
2	39	39	39	38	39
3	40	40	42	39	39
4	38	40	40	38	39
5	38	40	38	39	39
6	39	40	39	38	39
\bar{x}	39	39	40	39	39
\bar{X}	39				

Fuente: (Llerena)

Se procede a realizar el análisis de varianzas entre grupos, es decir entre cada día, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 54:

Tabla 54.
Análisis de varianzas entre grupos (DCM_B) de Miraflores

ANALISTA	PLL	PLL	PLL	PLL	PLL
FECHA	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
$\bar{X} - \bar{x}$	-0,30	0,32	0,76	-0,54	-0,23
$(\bar{X} - \bar{x})^2$	0,09	0,10	0,58	0,29	0,06
$p * (\bar{X} - \bar{x})^2$	0,55	0,60	3,47	1,75	0,33
SDC_B	6,70				
DCM_B	1,68				

Fuente: (Llerena)

Posterior a esto se realiza el análisis de varianza dentro de cada grupo, es decir dentro de cada día, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 55:

Tabla 55.
Análisis de varianza dentro de cada grupo (DCM_W) de Miraflores

ANALISTA	PLL	PLL	PLL	PLL	PLL
FECHA	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
$x_i - \bar{x}$	0,02	1,12	0,24	0,15	0,01
$x_i - \bar{x}$	0,00	0,03	0,17	0,00	0,14
$x_i - \bar{x}$	1,81	0,40	4,61	0,00	0,10
$x_i - \bar{x}$	0,54	0,02	0,04	0,01	0,17
$x_i - \bar{x}$	0,43	0,05	3,63	0,00	0,10
$x_i - \bar{x}$	0,06	0,05	0,26	0,04	0,26
SDC_T	2,88	1,66	8,94	0,21	0,77
SDC_W	14,46				
DCM_W	0,58				

Fuente: (Llerena)

Una vez que se han determinado, tanto la varianza entre grupos, como la varianza dentro de cada grupo, se puede calcular la desviación estándar de repetibilidad S_r y la desviación estándar de reproducibilidad S_R .

Tabla 56.*Repetibilidad y reproducibilidad para la muestra de Miraflores*

RESULTADOS	
s_L^2	0,18
REPETIBILIDAD Sr	0,76
REPRODUCIBILIDD SR	0,78
CVr (%)	1,95
CVR (%)	2,00
PRUEBA DE FISHER	
Fcalculado	2,90
Ftabulado	2,76
Probabilidad	0,05
Existen diferencias significativas	

Fuente: (Llerena)

A continuación, se expresan los resultados de repetibilidad y reproducibilidad para cada método:

Tabla 57.*Repetibilidad y reproducibilidad para límite líquido mediante Copa de Casagrande*

RESUMEN	San Isidro	Miraflores	Guangüiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s_L^2	-0,07	0,18	-0,02	-0,03	0,02
REPETIBILIDAD Sr	1,06	0,76	0,52	0,57	0,55
REPRODUCIBILIDD SR	1,06	0,78	0,52	0,57	0,55
CVr (%)	2,99	1,95	1,68	2,06	1,56
CVR (%)	3,00	2,00	1,68	2,07	1,56
Fcalculado	0,64	2,90	0,61	0,52	1,39
Ftabulado	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Fcal<Ftab	Preciso	No preciso	Preciso	Preciso	Preciso

Fuente: (Llerena)

Tabla 58.*Repetibilidad y reproducibilidad para límite líquido mediante Penetrómetro Cónico*

RESUMEN	San Isidro	Miraflores	Guangüiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s_L^2	0,00	0,07	0,00	0,00	0,07
REPETIBILIDAD Sr	0,54	0,53	0,13	0,21	0,67
REPRODUCIBILIDD SR	0,54	0,53	0,13	0,21	0,68
CVr (%)	1,56	1,34	0,42	0,75	1,77
CVR (%)	1,56	1,36	0,42	0,75	1,78
Fcalculado	0,99	2,56	1,44	1,03	1,97
Ftabulado	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Fcal<Ftab	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso

Fuente: (Llerena)

Tabla 59.*Repetibilidad y reproducibilidad para límite plástico mediante ensayo de rollos de 3.2mm*

RESUMEN	San Isidro	Miraflores	Guangüiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
s_L^2	-0,08	-0,09	0,01	0,02	0,02
REPETIBILIDAD Sr	1,47	0,94	0,65	0,59	0,71
REPRODUCIBILIDD SR	1,47	0,94	0,65	0,59	0,71
CVr (%)	6,76	4,00	3,17	3,24	2,77
CVR (%)	6,77	4,02	3,17	3,24	2,77
Fcalculado	0,78	0,36	1,13	1,34	1,19
Ftabulado	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Fcal<Ftab	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso

Fuente: (Llerena)

Tabla 60.

Repetibilidad y reproducibilidad para límite plástico mediante ensayo de Penetrómetro Cónico

RESUMEN	San Isidro	Miraflores	Guangüiltagua	Carmen Bajo	Comité del Pueblo
S_L^2	-0,01	-0,02	-0,03	0,05	-0,01
REPETIBILIDAD Sr	0,33	0,49	0,63	0,80	0,33
REPRODUCIBILIDAD SR	0,33	0,49	0,63	0,80	0,33
Cvr (%)	1,21	2,11	2,91	4,12	1,21
CVR (%)	1,21	2,11	2,91	4,13	1,21
Fcalculado	0,39	0,38	0,54	1,43	0,39
Ftabulado	2,76	2,76	2,76	2,76	2,76
Fcal<Ftab	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso	Preciso

Fuente: (Llerena)

El Instituto de Salud Pública de Chile, establece en la “Guía técnica para la validación de métodos y determinación de la incertidumbre”, que un método se puede considerar preciso, si su coeficiente de variación es inferior al 5.00%. Como objeto de este estudio se va a analizar los coeficientes de variación de repetibilidad y reproducibilidad de cada método, los cuales son indicados en las Tablas 57, 58, 59 y 60, evidenciando que todos los métodos tienen coeficientes de variación para repetibilidad y reproducibilidad, menores al 5.00%, excepto para el cálculo de límite plástico mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm, en la muestra de San Isidro, cuyos coeficientes son de 6.76% y 6.77% para repetibilidad y reproducibilidad, respectivamente.

Además, la aplicación de la prueba F de Fisher, permite establecer que los métodos no presentan variaciones significativas entre la varianza dentro de grupo y la varianza entre grupos, excepto para la muestra de Miraflores, que no cumple con la condición establecida de: $F_{calculado} < F_{tabulado}$.

Las Tablas 57 y 58, muestran que la desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad para cálculo de límite líquido es menor mediante el uso del Penetrómetro Cónico, excepto para la muestra del Comité del Pueblo, en la cual se evidencia una desviación estándar mayor mediante este método.

Las Tablas 59 y 60, muestran que la desviación estándar de repetibilidad y reproducibilidad para cálculo de límite plástico es menor mediante el uso del Penetrómetro Cónico, excepto para la muestra del Carmen Bajo, en la cual se evidencia una desviación estándar mayor mediante este método.

Una de las principales razones por las que las desviaciones estándar de repetibilidad y reproducibilidad son iguales, es que la contribución a la variación total del factor de agrupamiento (S_L^2) es aproximadamente cero en la mayoría de los análisis, el mismo se calcula con la ecuación 11 establecida en la sección 2.8.1 del presente trabajo.

Incertidumbre

La incertidumbre asociada al resultado fue calculada en la sección 4.2 del presente capítulo, en la cual se evidencia que la incertidumbre es menor para obtención de límite líquido y límite plástico mediante el uso del Penetrómetro Cónico.

4.3.7 COMPROBACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS PARA LOS PARÁMETROS DE VALIDACIÓN

- No todos los resultados obtenidos para los métodos tradicionales en el laboratorio se encuentran dentro del intervalo de confianza del método, motivo por el cual el objetivo no ha sido cumplido.
- La exactitud comprende a la veracidad y precisión, ya que la veracidad no pudo ser demostrada al no contar con materiales de referencia, este objetivo tampoco pudo ser cumplido.
- Los resultados obtenidos para los coeficientes de variación de repetibilidad y reproducibilidad son inferiores al 5%, excepto para el cálculo de límite plástico mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm, en la muestra de San Isidro, cuyos coeficientes son de 6.76% y 6.77% para repetibilidad y reproducibilidad.

- El cálculo de incertidumbre asociada a los resultados para los métodos tradicionales pudo ser calculada, por lo que se pudo cumplir con este objetivo.

4.3.8 DISEÑO FINAL PARA EL PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN

Dos de los cuatro objetivos planteados no se pudieron cumplir, razón por la cual no se puede seguir avanzando con la propuesta de validación.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La alternativa de uso del Penetrómetro Cónico para cálculo de límite líquido resulta ser factible para la determinación de este parámetro, ya que, en base a un análisis estadístico, se puede evidenciar que existe un menor coeficiente de variación y una menor desviación estándar entre los resultados obtenidos, en comparación con los resultados obtenidos mediante el equipo de Copa de Casagrande.
- La obtención de límite líquido mediante Penetrómetro Cónico es una alternativa que se ha venido estudiando desde años atrás, pero el estudio de la obtención de límite plástico con el uso de este equipo es una propuesta reciente que aún tiene un amplio campo de estudio. Cabe mencionar que la Norma BS 1377:1900 plantea al método tradicional como ensayo estándar para la obtención de límite plástico. Sin embargo, con base a los resultados obtenidos en el análisis estadístico de datos, se puede evidenciar que la determinación de límite plástico mediante este equipo resulta ser factible, ya que los resultados obtenidos presentan un menor coeficiente de variación una menor desviación estándar, en comparación a los resultados obtenidos mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm.
- La media muestral de límite líquido obtenido mediante el ensayo de Copa de Casagrande para cada muestra: San Isidro, Miraflores, Guangüiltagua, Carmen Bajo y Comité del Pueblo tiene una media muestral de 35, 39, 31, 27 y 35 respectivamente. Por otra parte, la media muestral obtenida mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico es de 34, 39, 31, 29 y 38 respectivamente. Pese a que los resultados de las medias muestrales no difieren en gran medida, en base a el análisis de los intervalos de confianza obtenidos para límite líquido, tanto con el equipo de Copa de Casagrande, como con el Penetrómetro Cónico, se puede evidenciar que el método más eficiente para la determinación de este parámetro es el Penetrómetro

Cónico, ya que la mayoría de los resultados obtenidos, se encuentran dentro del intervalo de trabajo.

- La media muestral de límite plástico obtenida mediante el ensayo de rollos de 3.2 mm para cada muestra: San Isidro, Miraflores, Guangüiltagua, Carmen Bajo y Comité del Pueblo es de 22, 23, 21, 18 y 26 respectivamente. En contraste, la media muestral obtenida mediante el ensayo de Penetrómetro Cónico es de 27, 23, 22, 19 y 27. Pese a que los resultados de las medias muestrales no difieren en gran medida, excepto para la muestra de San Isidro, en base a el análisis de los intervalos de confianza obtenidos para el límite plástico, tanto con el ensayo de rollos de 3.2mm, como con el Penetrómetro Cónico, se puede evidenciar que el método más eficiente para la determinación de este parámetro, es mediante el Penetrómetro Cónico, ya que la mayoría de los resultados obtenidos, se encuentran dentro del intervalo de trabajo.
- De acuerdo con la clasificación de suelos realizada mediante el sistema SUCS, las muestras de San Isidro, Guangüiltagua y Carmen Bajo pertenecen al tipo de suelo CL: arcilla inorgánica de baja plasticidad con arena, la muestra de Miraflores pertenece al tipo SC: arena arcillosa y la muestra del Comité del Pueblo pertenecen al tipo de suelo SM: arena limosa. En los cálculos de límite líquido mediante Penetrómetro Cónico se evidencio un mayor coeficiente de variación para la muestra del Comité del Pueblo, asimismo, en la determinación de límite plástico mediante Penetrómetro Cónico se evidencio un mayor coeficiente de variación en la muestra del Carmen Bajo, por lo que el uso de este equipo puede no resultar tan factible en suelos SC (arena arcillosa) y SM (arena limosa).
- De acuerdo a las estimaciones de incertidumbre obtenidas, se puede establecer que la obtención de límite líquido a través del Penetrómetro Cónico presenta una menor variación en sus resultados, esto es debido a que, al ser un método estático, para su estimación no se generan muchas fuentes de incertidumbre, siendo la más importante el contenido de humedad correspondiente a la lectura de penetración registrada. En contraste a la determinación de este parámetro a través de la Copa de Casagrande, en los cuales el método se puede ver afectado por: ritmo de golpeo, la forma en

que se realiza el surco y también la apreciación de cada laboratorista acerca de cuándo se cierra el mismo.

- En el caso de límite plástico, la incertidumbre que se genera a través del ensayo con Penetrómetro Cónico es menor a la que se genera con el método tradicional. Sin embargo, se debe considerar que esté método no sigue ninguna norma estandarizada, por lo cual, la ejecución del método tradicional sigue siendo la más factible, ya que además de ejecutarse bajo normas estándar, tiene un tiempo de ejecución menor y un cálculo más sencillo.
- La principal fuente de incertidumbre para la obtención de límite plástico mediante el método tradicional es la apreciación del laboratorista al momento que se empiezan a formar las grietas en los rollos de 3mm. En contraste para la obtención de este parámetro mediante el Penetrómetro Cónico su principal fuente de incertidumbre se genera debido a la variación de contenidos de humedad registrados para cada lectura de penetración.
- Los parámetros escogidos para desarrollar la propuesta de validación para los métodos tradicionales fueron: intervalo de trabajo, exactitud, reproducibilidad, repetibilidad e incertidumbre. Sin embargo, no se pudo cumplir con los objetivos establecidos, ya que no todos los resultados obtenidos mediante los métodos tradicionales se encontraban dentro del intervalo de trabajo. Además, al no contar con material de referencia no se pudo evidenciar la exactitud del método.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para la realización de ensayos de límites de Atterberg, se requiere suelos plásticos, por lo cual se recomienda determinar zonas en donde estén localizadas formaciones geológicas con limos o arcillas.
- Para la realización de los ensayos, es de gran importancia que el muestreo sea normado, al igual que la conservación de las muestras. Además, en el momento en que se van a preparar los suelos para los ensayos, se recomienda verificar que la muestra de suelo tomada sea homogénea, sin grumos o partículas con diferente consistencia a la porción de masa de suelo

y en el caso del uso del penetrómetro cónico se debe tener especial cuidado en que no se formen burbujas de aire.

- Con la finalidad de obtener resultados confiables que tengan validez estadística y experimental, es de gran importancia que los equipos utilizados sigan los lineamientos exigidos en las diferentes normas, por lo cual se debe controlar su correcto funcionamiento con certificados de calibración.
- Para futuros estudios acerca de la obtención de límite plástico a través del Penetrómetro Cónico se sugiere que la pesa adicional a ser utilizada sea de la misma marca y características del fabricante del equipo.
- Partiendo de la premisa anterior, se recomienda profundizar más el estudio de la utilización de Penetrómetro Cónico, para la obtención de límite plástico, como alternativa a el uso del ensayo de rollos de 3mm.
- Se recomienda analizar la incertidumbre presente en resultados obtenidos para límite líquido y límite plástico, cuando los mismos se realizan con diferentes operadores.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTM Designation: D 422-63 . (2007). Método de Ensayo Estándar para el Análisis Granulométrico.
- ASTM Designation: D4318-17. (2017). Standart Test Methods for liquid limit, plastic limit, and Plasticity Index of Soils. Danvers.
- Blázquez, Á. R. (2016). Aplicabilidad del pentrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad. Alicante.
- Botía, W. (2015). Manual de procedimientos de ensayos de suelos y memoria de cálculo. Bogotá.
- BS 1377: 1990. (1990). Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. British Standards Institute, Milton Keynes.
- Cano, J., & García, A. (2011). Desarrollo de una metodología para la estimación de la incertidumbre de medición en experimentos de Física. Pereira, Colombia. Recuperado el 16 de 05 de 2022
- Das, B. (2013). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Cuarta Edición. México: Cengage Learning .
- Díaz, D. (2017). Obtención del límite líquido y límite plástico usando el penetrómetro de cono de caída y la cazuela de Casagrande para la combinación de un suelo 50% caolín y 50% diatomea (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Colombia. Bogotá. Colombia.
- Dicovski, L. (2008). Estadística Básica. Repositorio UNI-Norte. Recuperado el 07 de:09 de 2021, de:https://frrq.cvg.utn.edu.ar/plu_ginfile.php/2101/mod_resource/content/0/DEPOSITO_DE_MATERIALES/estadistica1_1_.pdf

Duarte, M., & Rojas, H. (2017). Obtención de límite líquido y límite plástico usando el penetrómetro de cono de caída, considerando los diferentes conos existentes en la literatura para un suelo betonítico. Bogotá, Colombia.

Franch, J. (2013). Descriptores Geotécnicos (5): plasticidad, límites de Atterberg y consistencia. Recuperado el 25 de 01 de 2021, de <http://www.estudiosgeotecnicos.info/index.php/descriptores-geotecnicos-5-plasticidad-limites-de-atterberg-y-consistencia/>

“Eurolab España. P.P. Morillas y colaboradores. Guía Eurachem: La adecuación al uso de los métodos analíticos – Una Guía de laboratorio para la validación de métodos y temas relacionados (1ª ed. 2016). Disponible en www.eurachem.org”

Instituto de Salud Pública de Chile. (2010). Guía técnica para la validación de métodos y determinación de la incertidumbre. Slideshare. Recuperado el 22 de 08 de 2021, de <https://es.slideshare.net/MauricioDiez1/guia-tnica-1-validacin-de-mtodos-y-determinacin-de-la-incertidumbre-de-la-medicin-1>

JCGM. (2008). Evaluación de datos de medición - Guía para la expresión de la incertidumbre de medida. España: Centro Español de Metrología.

Lisintuña, S. (2018). Propuesta de un procedimiento de validación y cálculo de incertidumbre para ensayos de compresión en cilindros de hormigón-caso de aplicación LEMSUR-EPN. Quito.

Mena, R., Escobar, T., Haro, E., Córdova, M., & Merino, V. (2016). Estadística Básica I. Repositorio Digital UCE. Recuperado el 07 de 09 de 2021, de dspace.uce.edu.ec

Organismo Argentino de Acreditación. (2019). Guía para validación de métodos de ensayo. Argentina.

- Osorio, S. (2010). Geotecnia. Recuperado el 22 de 04 de 2022, de http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_25.html#:~:text=El%20rango%20de%20l%C3%ADmites%20l%C3%ADquidos,mayor%20siendo%20menores%20de%2040
- Portuondo, Y., & Portuondo, J. (2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de mediación. *Tecnología Química*, 117-121.
- SAE. (2016). Servicio de Acreditación Ecuatoriana. Estimación de la incertidumbre. Recuperado el 12 de 08 de 2021, de www.acreditación.gob.ec
- SAE. (2017). Servicio de Acreditación Ecuatoriana. Norma ISO/IEC 17025:2017 "Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración. Recuperado el 24 de 01 de 2021, de www.acreditación.gob.ec

ANEXOS

ANEXO 1

Registro de ensayos mediante cada metodología (CD)