



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido

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

Autor:

David Andrés Arbito Chica

0104721378

Director:

Ing. Jaime Asdrubal Bojorque Ñeguez Phd

0102857885

Cuenca-Ecuador

08 de abril del 2019



Resumen

El ensayo de cuchara de Casagrande es el método más utilizado en la actualidad para determinar el límite líquido en Ecuador. Sin embargo, la norma ASTM D4318-00 relacionada con el ensayo de Casagrande ha demostrado que existe variabilidad en los resultados obtenidos de un mismo suelo cuando estos son realizados por distintos laboratoristas, lo que implica que se pueden obtener distintos resultados para el mismo suelo.

En paralelo existe un procedimiento conocido como el método del cono de penetración, que consiste en dejar caer un cono con dimensiones especificadas por la norma BS 1377:2-1990 por un tiempo de 5 segundos sobre una muestra de suelo para medir la penetración. Este procedimiento es menos susceptible al operador lo que resulta ventajoso.

El método del cono no es un procedimiento estándar en Ecuador, por lo que es necesario realizar estudios a nivel local. De aquí que la presente investigación se enfoca en comparar ambos métodos, empleando tres distintos suelos de la región.

Por un procedimiento estadístico que dimensiona el tamaño muestral necesario para comparar medias se determina el número de ensayos que se deben realizar en cada uno de los suelos seleccionados para comparar los límites líquidos.

Los resultados demuestran que el método del cono de penetración es aplicable para la obtención del límite líquido. Es importante mencionar que se detectó una diferencia significativa en el límite líquido de entre 6 y 9 puntos porcentuales entre ambos métodos de ensayo, lo que podría cambiar la interpretación de las características de los suelos.

Palabras clave: Límite líquido. Cuchara de Casagrande. Cono de penetración.



Abstract

The Casagrande cup test is the most common method used to determine the liquid limit in Ecuador. However, the ASTM D4318-00 standard related to the Casagrande method has shown that there is variability in the results obtained from the same soil when these tests are performed by different laboratorians, which implies that different results can be obtained from the same soil.

In parallel there is a procedure known as the penetration cone method, which consist in dropping a cone with dimensions specified by the BS 1377: 2-1990 standard for a 5 seconds period on a sample of soil to measure the penetration. This procedure is less susceptible to the operator which is advantageous.

The cone method is not a standard procedure in Ecuador, so it is necessary to conduct studies on the region. Hence, the present investigation focuses on comparing both methods, using three different soils from the region.

By statistical procedure that measures the sample size necessary to compare means of 2 samples is determined the number of tests that must be performed in each of the soils to compare the liquid limits.

The results show that the penetration cone method is applicable to obtain the liquid limit. It is important to mention that a significant difference is detected in the liquid limit, the difference is between 6 and 9 percentage points between both test methods, which could change the interpretation of soil characteristics.

Keywords: Liquid limit. Casagrande cup. Penetration cone.



Índice

Resumen	2
Abstract	3
Índice.....	4
Índice figuras	6
Índice tablas.....	8
1.Capítulo 1: Introducción.....	11
1.1 Problema	12
1.2 Justificación	12
1.3 Objetivos.....	13
1.3.1 Objetivo general	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
2.Capítulo 2: Estado del arte	14
2.1 Antecedentes	14
2.2 Estado de investigaciones	15
2.2.1 Cono de Penetración	15
2.2.2 Repetitividad y reproductividad por el método de Casagrande.....	17
2.3 Selección de los equipos de medición.....	21
2.4 Análisis de ensayos.....	21
2.5 Ensayo de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración	24
2.5.1 Cuchara de Casagrande.....	24
2.5.2 Cono de Penetración y Penetrómetro	25
2.6 Normas para calibración equipos y procedimientos.....	27
3.Capítulo 3: Metodología	28
3.1 Paso 1: Selección de equipos para toma de medidas en el desarrollo de los ensayos ...	28
3.2 Paso 2: Diseño y construcción del Cono de Penetración	31
3.3 Paso 3: Localización, descripción y extracción de suelos	33
3.4 Paso 4: Granulometría	35
3.5 Paso 5: Preparación del suelo para ensayo del Límite Líquido	38
3.6 Paso 6: Límite Líquido por proceso de la Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración 40	
3.6.1 Procedimiento Cuchara de Casagrande.....	41
3.6.2 Procedimiento Cono de Penetración	43
4.Capítulo 4: Resultados	46
4.1 Construcción del Cono de Penetración	46
4.2 Descripción del suelo	47



4.3	Clasificación del suelo	50
4.3.1	Suelo 1.....	50
4.3.2	Suelo 2.....	50
4.3.3	Suelo 3.....	50
4.4	Número de ensayos para la desviación estándar prototipo	51
4.4.1	Error esperado	51
4.4.2	Desviación estándar estimada	51
4.4.3	Factor de excedencia del error.....	51
4.4.4	Número de ensayos necesario.....	52
4.5	Resultados de ensayos de Cuchara de Casagrande	52
4.6	Dimensionamiento del tamaño muestral de ensayos con Cono de Penetración	54
4.6.1	Desviación estándar del grupo de control o prototipo.....	54
4.6.2	La diferencia mínima que se desea detectar	54
4.6.3	Riesgo aceptable.....	54
4.6.4	Poder estadístico de detección	54
4.6.5	Número de ensayos de Cono de Penetración necesarios	55
4.6.6	Resultados de ensayos de Cono de Penetración	55
4.7	Análisis de los resultados	57
4.7.1	Resultados Cuchara de Casagrande.....	57
4.7.2	Resultados del Cono de Penetración	57
4.7.3	Resultados desviación estándar Cono de Penetración	58
4.7.4	Comparación de medias por ambos métodos de ensayo	58
4.7.5	Correlación entre métodos de ensayo	59
5.	Conclusiones	61
6.	Recomendaciones	63
7.	Bibliografía.....	64
8.	Anexos.....	66



Índice figuras

Figura 1: Cono de Georgia (Osorio, 2010).	11
Figura 2: Cono Hindú desarrollado: Indian Central Road Research Institute (Jiménez and Alpañés, 1975).	12
Figura 3: Límites de Atterberg.	14
Figura 4: Definición del tipo de suelo en base al Límite Líquido. ASTM D2487-00.	14
Figura 5: Cono de Penetración (Littleton and Familo, 1977).	15
Figura 6: Límite Líquido medido por los métodos de Casagrande y Cono de Penetración de acuerdo a la especificaciones y procedimientos de la norma BS 1377-2:1990 (Littleton and Familo, 1977).	16
Figura 7: Esquema de la Cuchara de Casagrande (ASTM D4318-00).	24
Figura 8: Equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.	24
Figura 9: Ranurador disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Suelos de la Universidad de Cuenca.	25
Figura 10: Detalle de cono para ensayo de Límite Líquido (BS 1377-2:1990).	25
Figura 11: Aparato de penetración en materiales bituminosos disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.	26
Figura 12: Copa metálica para ensayos de Cono de Penetración.	27
Figura 13: Goniómetro con precisión de minuto.	29
Figura 14: Balanza OHAUS.	29
Figura 15: Calibrador de resolución 0.1 mm.	30
Figura 16: Balanza OHAUS con resolución de 0.1 g.	31
Figura 17: Vástago primario y balanza.	31
Figura 18: Diseño del Cono de Penetración de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990.	32
Figura 19: Mapa geológico de la ciudad de Cuenca.	34
Figura 20: Lavado de suelo de acuerdo a la norma ASTM C117-95.	36
Figura 21: Tamizado suelo para determinación de granulometría ASTM D422-63.	37
Figura 22: Curva granulométrica de los suelos 1, 2 y 3.	38
Figura 23: Bandeja y tamiz para preparación del suelo por el método húmedo.	39
Figura 24: Proceso de lavado del suelo a través del tamiz #40.	39
Figura 25: Eliminación del exceso de agua del suelo de acuerdo a ASTM D4318-00.	40
Figura 26: Mezclado y homogenización del suelo según las normas ASTM D4318-00 y BS 1377-2:1990.	41
Figura 27: Suelo colocado en la Cuchara de Casagrande.	41
Figura 28: Ranurado del suelo en la Cuchara de Casagrande.	42
Figura 29: Límite Líquido determinado gráficamente con línea de tendencia lineal.	42
Figura 30: Suelo colocado en la copa de ensayo de Cono de Penetración.	43



Figura 31: Cono de Penetración apenas en contacto con el suelo.....	43
Figura 32: Toma de dato de penetración con caída libre de 5±1 s.....	44
Figura 33: Límite líquido determinado gráficamente con línea de tendencia lineal del Cono de Penetración.....	45
Figura 34: Cono de Penetración construido para este estudio.....	46
Figura 35: Peso del Cono de Penetración en conjunto con el vástago principal.	46
Figura 36: Comprobación punta del Cono de Penetración.....	47
Figura 37: Construcción del Megaparque Ictocruz con coordenadas geográficas (-2.928222,-79.002983).	47
Figura 38: Suelo extraído del Megaparque Ictocruz.	48
Figura 39: Construcción del Megaparque de la Luz con coordenadas geográficas (-2.878952,-78.992872).	48
Figura 40: Suelo extraído del Megaparque de la Luz.....	49
Figura 41: Paso elevado en Américas y Humboldt con coordenadas geográficas (-2.885261, -79.006409).	49
Figura 42: Suelo extraído en la construcción de paso elevado en la Av. de las Américas y Humboldt.	50
Figura 43: Suelos del presente ensayo en la carta de plasticidad.	51
Figura 44: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 1 por método de la Cuchara de Casagrande.	53
Figura 45: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 2 por método de la Cuchara de Casagrande.	53
Figura 46: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 3 por método de la Cuchara de Casagrande.	53
Figura 47: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 1 por método de la Cono de Penetración.	56
Figura 48: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 2 por método de la Cono de Penetración.	56
Figura 49: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 3 por método de la Cono de Penetración.	56
Figura 50: Correlación de ensayos de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración.	59
Figura 51: Comparación entre correlaciones de varios autores y la correlación del presente proyecto.	60



Índice tablas

Tabla 1: Comparación entre Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración (Belviso et al., 1985).	17
Tabla 2: Resumen de resultados de ensayos de Límites Líquido (ASTM D4318-00).	18
Tabla 3: Ecuaciones de correlación propuestas por distintos autores (Rabat Blázquez, 2016).....	18
Tabla 4: Comparación de resultados de Límite Líquido (Rabat Blázquez, 2016).	19
Tabla 5: Ecuaciones propuestas (Rabat Blázquez, 2016).	21
Tabla 6: Valores de c para probabilidad de que el error exceda E (ASTM E122-00).	22
Tabla 7: Resumen de resultados de Límites de Atterberg (ASTM D4318-00).	22
Tabla 8: Valores de $Z\alpha$ más utilizados (Fernández, 1996).....	23
Tabla 9: Valores de $Z\beta$ más utilizados (Fernández, 1996).....	23
Tabla 10: Cálculo de resolución e incertidumbre.	28
Tabla 11: Requerimientos para pesado de muestras y legibilidad de balanza (ASTM 2216-10). ...	30
Tabla 12: Densidad acero stainless.....	32
Tabla 13: Dimensiones, masas y volúmenes del Cono de Penetración	33
Tabla 14: Designación de tamices para ensayos de clasificación según la norma ASTM D2487-00.	35
Tabla 15: Peso mínimo de muestras para ensayos de clasificación según la norma ASTM D2487-00.	36
Tabla 16: Masa del suelo después de lavado.	36
Tabla 17: Pesos retenidos en los tamices de los tres suelos.....	38
Tabla 18: Número de ensayos necesario para obtención de desviación estándar.	52
Tabla 19: Resultados de Límite Líquido con Cuchara de Casagrande.....	52
Tabla 20: Resultados estadísticos de los ensayos de Casagrande.	54
Tabla 21: Número de ensayos necesario para detectar diferencias entre ambos métodos de ensayo.	55
Tabla 22: Resultados de Límite Líquido de Cono de Penetración.	55
Tabla 23: Resultados estadísticos de los ensayos de Cono de Penetración.....	57
Tabla 24: Comparación de resultados entre Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración.	58
Tabla 25: Variaciones en estudios previos y actual entre método de Casagrande y Cono de Penetración.....	59



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

David Andrés Arbito Chica en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 08 de abril del 2019

David Andrés Arbito Chica

C.I: 0104721378



Cláusula de Propiedad Intelectual

David Andrés Arbito Chica autor del trabajo de titulación **Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 08 de abril de 2019

David Andrés Arbito Chica

C.I: 0104721378

1. Capítulo 1: Introducción

Los Límites de Atterberg definen las propiedades físicas de plasticidad (Das, 2001), estas propiedades varían con la humedad presente en el suelo y se determinan según la norma ASTM D2216-10. El Límite Líquido (LL) define el estado del suelo entre semilíquido y plástico, límite que es de gran importancia para determinar el Índice de Plasticidad (IP) que a través de la clasificación del suelo permite conocer la trabajabilidad del material de acuerdo al contenido de humedad.

La Cuchara de Casagrande desarrollada por Arthur Casagrande (1932) es el método más utilizado en la actualidad para el Límite Líquido de un suelo, sin embargo, se han desarrollado métodos alternativos para determinar el Límite Líquido. Uno de ellos es el instrumento desarrollado por el Instituto Tecnológico de Georgia en el año 1951 conocido como Cono de Georgia pero sin mayores usos, éste fue uno de los primeros instrumentos utilizados para la realización del ensayo de penetración, un esquema se aprecia en la figura 1 (Rabat Blázquez, 2016).

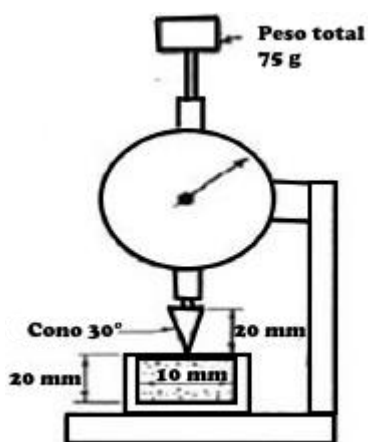


Figura 1: Cono de Georgia (Osorio, 2010).

Posteriormente, el "Indian Central Road Research Institute" desarrolló un mecanismo conocido como Cono Hindú, que se muestra en la figura 2, cuyo cambio principal fue en el peso de la carga. Con el Cono Hindú se obtiene el Límite Líquido a una penetración de una pulgada (Rabat Blázquez, 2016).

El ensayo de Cono de Penetración se sustenta en que la capacidad portante del suelo y el esfuerzo que soporta son similares, obteniendo una relación de la capacidad portante y la penetración del cono, el método también toma en cuenta que la capacidad portante del suelo varía con la humedad, por tanto, la penetración varía con la humedad del suelo (Littleton and Familo, 1977).

En el presente estudio es necesario contar con un equipo para realizar los ensayos de cono, por lo que al no disponer del Cono de Penetración en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca, es necesario construir el cono mencionado.

Una vez construido el Cono de Penetración, es necesario comprobar dichos componentes del sistema realizando pruebas comparativas entre el ensayo de la Cuchara de Casagrande y el ensayo del Cono de Penetración, para corroborar que el ensayo de penetración permite la obtención de resultados equivalentes. Debido a que este ensayo ha sido estudiado a profundidad en otras partes del mundo existen diferentes correlaciones entre el ensayo de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración dadas por diferentes autores (Rabat Blázquez, 2016) como se puede observar en la tabla 3, existiendo un precedente para desarrollar el estudio de correlación que se obtendrá a partir de los ensayos que se realicen en esta investigación.

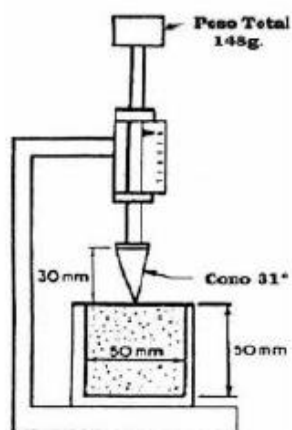


Figura 2: Cono Hindú desarrollado: Indian Central Road Research Institute (Jiménez and Alpañés, 1975).

1.1 Problema

El ensayo de Casagrande se encuentra regulado por la norma ASTM D4318-00, permite obtener el Límite Líquido de suelos arcillosos y limosos, sin embargo, a pesar de la normativa se genera un número de errores instrumentales y personales en la ejecución del ensayo como: la dificultad de realizar la ranura en ciertos suelos arenosos, la tendencia de los suelos de baja plasticidad de deslizar por la cuchara en lugar de fluir, la sensibilidad de pequeñas diferencias en el aparato (forma del acanalador, dureza de la base, la forma de la leva, la rugosidad de la cuchara, etc.), la sensibilidad de la técnica del operador en realizar el ensayo, la experiencia del laboratorista y de su experticia a la hora de realizar los ensayos.

La combinación de todos estos factores deriva en la variabilidad de los resultados, ya que ensayos sobre un mismo suelo presentarían resultados diferentes al ser realizados en diferentes laboratorios, en el análisis estadístico que se presenta en la norma ASTM D4318-00, se puede apreciar esta diferencia en los resultados al comparar la desviación estándar de ensayos realizados en el mismo laboratorio con la desviación estándar de ensayos realizados sobre el mismo suelo pero en laboratorios diferentes.

1.2 Justificación

Con la finalidad de sobrellevar algunas de las incertidumbres del método de la Cuchara de Casagrande y poder validar la información de los ensayos de Límite Líquido es necesario buscar alternativas viables como el Cono de Penetración. Actualmente, en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca no existe un Cono de Penetración normalizado para el ensayo de penetración, sin embargo, existe un equipo de penetración en materiales bituminosos que cumple con la norma ASTM D5-06 de acuerdo a los requerimientos de la norma BS 1377-2:1990, luego de la inspección del equipo, se pudo comprobar que este dispone de partes desmontables que permite la adaptación de un cono.

Ante la falta de un cono en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales se propone construir un Cono de Penetración de acuerdo a las especificaciones de la norma BS 1377-2:1990 que permita determinar el Límite Líquido siguiendo el procedimiento descrito en la norma BS 1377-2:1990, debiendo comprobar que los resultados obtenidos a través de este método sean confiables.

Se espera beneficiar tanto a laboratoristas como a ingenieros que contarán con un método alternativo para la obtención del Límite Líquido, así se dará apertura a nuevas líneas de investigación para obtener correlaciones para diferentes suelos y estudiar la afeción en los resultados al utilizar la Cuchara de Casagrande.



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio comparativo y correlativo entre el procedimiento del Cono de Penetración y el de la Cuchara de Casagrande para obtención el Límite Líquido en suelos de diferente plasticidad.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar el actual uso de equipos y alternativas para la determinación del Límite Líquido de suelos.
- Diseñar y construir un Cono de Penetración que adaptado al vástago del aparato de penetración para materiales bituminosos existente en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales que cumpla con las dimensiones y peso de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990.
- Caracterizar tres suelos de la ciudad de Cuenca de tipo arcilloso o limoso en los cuales se realizará el estudio.
- Realizar un número estadísticamente aceptable de ensayos de Casagrande y Cono de Penetración sobre los suelos seleccionados.
- Realizar un análisis comparativo y correlativo entre los métodos Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración.

2. Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Antecedentes

Cuando existe arcilla en un suelo fino este puede ser moldeado y mantiene su forma cuando el contenido de humedad es el apropiado. Lo que permite que el suelo mantenga su forma es la cohesión que es debida al agua que las partículas de arcilla absorben (Das 2001).

A principios de 1900 el científico Albert Mauritz Atterberg describió la consistencia de los suelos de grano fino de acuerdo al contenido de agua, si el contenido de agua es muy bajo el suelo se comporta como un sólido frágil y cuando el contenido de humedad es muy alto el suelo fluye como un líquido. Por tanto, en dependencia del contenido de agua el suelo se clasifica en estados: solido, semisólido, plástico y líquido (Das 2001).

En la figura 3 se puede observar que: el límite entre el estado sólido y semisólido se llama Límite de Contracción, el límite entre el estado semisólido y plástico se llama Límite Plástico y el límite entre el estado plástico y el líquido se llama Límite Líquido.



Figura 3: Límites de Atterberg.

Casagrande (1932) concluye que cada golpe de un mecanismo normalizado corresponde a una resistencia cortante del suelo de 1 g/cm^2 por lo cual el Límite Líquido es el contenido de humedad para que el suelo tenga una resistencia a cortante de 25 g/cm^2 (Das, 2001).

En la figura 4 se muestra como distintos tipos de suelo tienen diferentes Límites Líquidos, en donde el Índice de Plasticidad se presenta en las ordenadas y el Límite Líquido en las abscisas, se observa la línea de división A que marca la diferencia entre limos y arcillas al igual que los valores de 30 y 50 definen los estados y comportamiento del suelo.

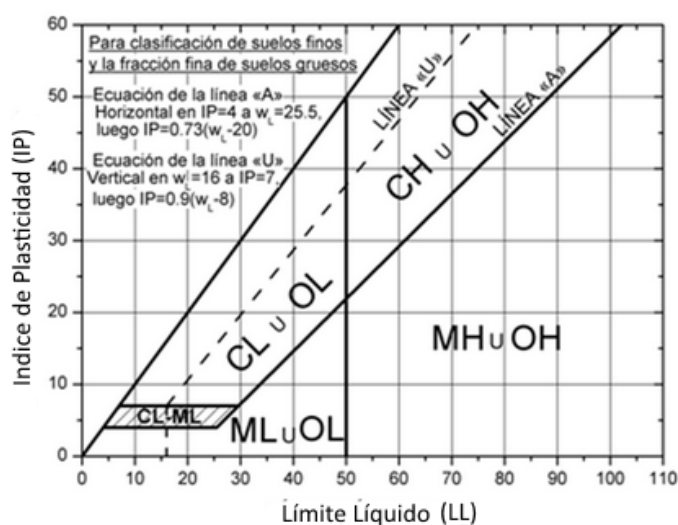


Figura 4: Definición del tipo de suelo en base al Límite Líquido. ASTM D2487-00

2.2 Estado de investigaciones

2.2.1 Cono de Penetración

El Cono de Penetración es un elemento construido para realizar penetraciones sobre una muestra de suelo arcilloso o limoso reconstituida que pasa el tamiz #40, para determinar el Límite Líquido o Límite Plástico. El funcionamiento del Cono de Penetración se basa en la resistencia portante del suelo que se considera constante con la profundidad y carga aplicada sobre el suelo, por lo que se puede igualar la resistencia portante del suelo con la capacidad portante del suelo, obteniendo la ecuación 1 para el Cono de Penetración (Littleton and Farmilo, 1977).

$$q = \frac{W}{\pi * \tan(\alpha)^2 * h_o^2} = p \quad \text{Ecuación 1. (Littleton and Farmilo, 1977).}$$

Donde:

q: Capacidad portante del suelo.

p: Resistencia portante del suelo.

W: Peso del cono de penetración.

α : Ángulo del cono de penetración.

h_o : Penetración en la muestra de suelo a ensayar.

En la figura 5 se muestra la disposición de las dimensiones en el cono.

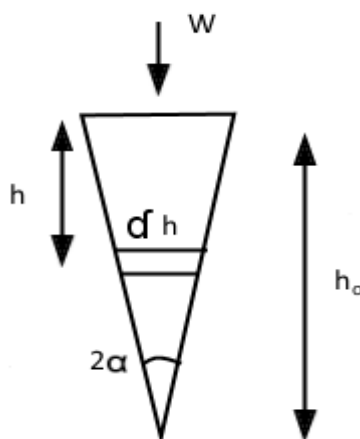


Figura 5: Cono de Penetración (Littleton and Farmilo, 1977).

Cuando el trabajo realizado por la gravedad iguala a la resistencia portante del suelo se obtiene la ecuación 2.

$$W * h_o = \frac{h_o'}{0} \int_0^{h_o} q * \pi * \tan(\alpha)^2 * \delta h$$

$$W * h_o = \frac{q * \pi * \tan(\alpha)^2 * h_o^3}{3}$$

$$h_o = \frac{1}{\tan(\alpha)} \sqrt{\frac{3 * W}{q * \pi}} \quad \text{Ecuación .2 (Littleton and Farmilo, 1977).}$$

En el estudio realizado por Littleton and Farnilo (1977) se empleó la ecuación 2 para describir el comportamiento de los conos: Británico, Ruso, Americano e Indio. Como se muestra en la ecuación 2 los resultados de penetración varían con el peso del cono. Como existe una variación en la penetración por el peso se realizó un número de ensayos comparativos entre los distintos conos descritos anteriormente, llegando a la conclusión de que el Cono de Penetración cuyas dimensiones están bajo la norma BS 1377-2:1990 tiene las mejores correlaciones con el ensayo de Casagrande, (ver figura 6), por tanto, se decidió utilizar las medidas proporcionadas por la norma BS 1377-2:1990 para la construcción del cono sobre el cual se desarrollará el proyecto de titulación.

Cabe destacar que el cono con dimensiones de acuerdo de la norma BS 1377-2:1990 fue diseñado con la finalidad de obtener resultados muy similares a los de la Cuchara de Casagrande además de ser un cono con un uso mucho mayor al de otros conos que se podrían encontrar en el mercado de acuerdo a O' Kelly (2018), razón por la cual las correlaciones con Casagrande son las mejores y el cono de 30° y 80 g es el aparato ideal para el presente proyecto.

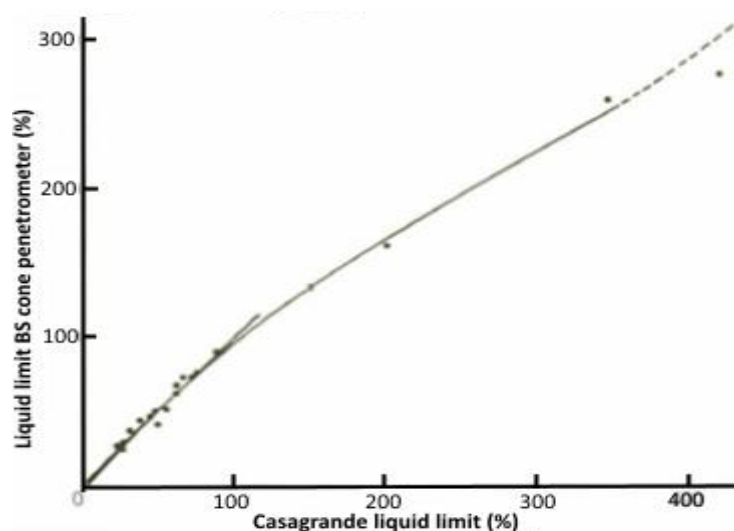


Figura 6: Límite Líquido medido por los métodos de Casagrande y Cono de Penetración de acuerdo a la especificaciones y procedimientos de la norma BS 1377-2:1990 (Littleton and Farnilo, 1977).

En la tabla 1 se muestran los resultados del Límite Líquido de distintos suelos de un estudio que compara los resultados que se obtienen a través del método de Casagrande y el Cono de Penetración realizados por Belviso (1985), donde: en la columna 1 están las muestras sobre las cuales se realizaron los ensayos, en la columna 2 están los resultados de Límite Líquido de acuerdo a la norma ASTM D4318-00, en la columna 3 se muestran los resultados de Límite Líquido realizados con la norma BS 1377-2:1990, la columna 4 tiene la diferencia entre los valores de Límite Líquido obtenidos por ambos métodos y en la columna 5 se observa la diferencia entre ambos métodos en porcentaje.

Como se puede ver en la tabla 1 la mayoría de los suelos ensayados con el método de Cono de Penetración presentan un valor de Límite Líquido mayor al obtenido por el método de Casagrande, esta tendencia se puede observar en todos los suelos que tienen un valor de Límite Líquido por debajo de 100 puntos porcentuales.

Se observa que la diferencia máxima en los resultados por ambos métodos en valores de Límite Líquido corresponde a la muestra F con un valor de 10 puntos porcentuales, sin embargo, la mayor variación de Límite Líquido en porcentaje corresponde a la muestra J con un 15.5% de variación.

Tabla 1: Comparación entre Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración (Belviso et al., 1985).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Muestra	LL ASTM	LL BS1377	Diferencia	Diferencia en porcentaje (%)
A	42	46	4	9.5
B	34	38	4	11.8
C	44	49	5	11.4
D	54	61	7	13.0
E	43	47	4	9.3
F	90	100	10	11.1
G	48	50	2	4.2
H	47	47	0	0.0
I	51	54	3	5.9
J	58	67	9	15.5
K	134	133	-1	0.7
L	50	52	2	4.0
M	57	57	0	0.0
N	57	62	5	8.8
O	45	51	6	13.3
P	95	103	8	8.4

2.2.2 Repetitividad y reproductividad por el método de Casagrande

El método de Casagrande se ve afectado directamente por el operador o laboratorista en la variabilidad de los resultados del Límite Líquido de acuerdo a la norma ASTM D4318-00 que realizó ensayos para la obtención de Límites de Atterberg en múltiples laboratorios y en un solo laboratorio, estos ensayos fueron realizados de acuerdo a la práctica ASTM E691-99 que recomienda realizar los ensayos por triplicado para cada laboratorista.

En la tabla 2 se muestran los resultados de Límite Líquido realizados en múltiples laboratorios obtenidos por la norma ASTM D4318-00, en donde: la columna 1 indica los suelos sobre los cuales se realizaron los ensayos, en la columna 2 se muestra el número de ensayos realizados por triplicado, en la columna 3 se observa los resultados de la desviación estándar en puntos porcentuales y en la columna 4 está el resultado de dos ensayos realizados con el mismo suelo, el mismo equipo, por el mismo laboratorista y en con el menor tiempo posible entre ambos ensayos.

Se puede ver en la tabla 2 que la desviación estándar aumenta en los ensayos realizados por laboratoristas diferentes, al comparar los resultados obtenidos por laboratoristas diferentes con ensayos realizados por el mismo laboratorista se deja en evidencia la variación en los resultados del ensayo de Casagrande consecuencia de la experiencia y experticia del laboratorista que realiza los ensayos.

Lo cual queda corroborado en el artículo de revisión "Uso de conos para la determinación de Límites de Atterberg: una revisión" en donde O'Kelly (2018) describe a la Cuchara de Casagrande como un método con poca consistencia en sus resultados, siendo la principal causa de variación la manufactura de los equipos, incluso si son construidos bajo la normativa actual.



Tabla 2: Resumen de resultados de ensayos de Límites Líquido (ASTM D4318-00).

(1)	(2)	(3)	(4)
Tipo de suelo	Número de ensayos por triplicado	Desviación estándar (puntos porcentuales)	Rango aceptable de dos resultados (puntos porcentuales)
Resultados un solo laboratorista			
CH	13	0.7	2
CL	14	0.3	1
ML	12	0.5	2
Resultados múltiples laboratorios			
CH	13	1.3	4
CL	14	1.0	3
ML	12	1.3	4

Debido a la complejidad y variabilidad de los suelos por su ubicación, composición química, edad geológica, etc. La variación que se puede presentar entre el ensayo de Casagrande y el Cono de Penetración cambia de acuerdo a las propiedades de cada suelo sobre los cuales fueron desarrollados los ensayos, por lo tanto, distintos ensayos comparativos entre Casagrande y Cono de Penetración en diferentes regiones han llevado a la obtención de varias ecuaciones de correlación para distintos tipos de suelo.

En la tabla 3 se muestran las correlaciones obtenidas por distintos autores en donde en la columna 1 está el autor, en la columna 2 está la correlación y en la columna 3 esta el rango de Límite Líquido para el cual se aplica la correlación.

Tabla 3: Ecuaciones de correlación propuestas por distintos autores (Rabat Blázquez, 2016)

(1)	(2)	(3)
Autores	Ecuación	Rango de LL
Karlsoon (1961,1977)	$LL_{cono} = 0.85 * LL_{cuchara} + 5.02$	30-76 %
Sherwood y Ryley (1970)	$LL_{cono} = 0.95 * LL_{cuchara} + 0.95$	30-72 %
Wires (1984)	$LL_{cono} = 0.94 * LL_{cuchara} + 0.97$	38-55 %
Belviso et al. (1985)	$LL_{cono} = 0.97 * LL_{cuchara} + 1.19$	34-134 %
Wasti and Bezirci (1986)	$LL_{cono} = 1.01 * LL_{cuchara} + 4.92$	27-110 %
Leroueil y Le Bihan (1996)	$LL_{cono} = 0.86 * LL_{cuchara} + 6.34$	30-74 %
Dragoni et al. (2008)	$LL_{cono} = 1.02 * LL_{cuchara} + 2.87$	28-74 %
Ozer (2009)	$LL_{cono} = 0.90 * LL_{cuchara} + 6.04$	29-104 %
Fojtová et al. (2009)	$LL_{cono} = 1.00 * LL_{cuchara} + 2.44$	20-50 %
Gornbech et al. (2011)	$LL_{cono} = 0.95 * LL_{cuchara} + 9.4$	100-340 %
Di Matteo (2012)	$LL_{cono} = 1.00 * LL_{cuchara} + 2.20$	24-40 %
Spagnoli (2012)	$LL_{cono} = 0.99 * LL_{cuchara} + 1.05$	20-61 %

El modelo de la ecuación 3 es la más generalizada para correlacionar los ensayos de Casagrande y Cono de Penetración donde el factor “a” varía de 0.85 a 1.02 y el factor “b” varía de 0.95 hasta 9.4. Hay que considerar que cada correlación tiene un rango de Límite Líquido para su aplicabilidad.



$$LL_{cono} = a * LL_{cuchara} + b \quad \text{Ecuación 3.}$$

La correlación se obtiene por medio de ajuste de mínimos cuadrados donde los valores de Límite Líquido obtenidos por el método de Casagrande (ordenadas) y Cono de Penetración (abscisas) de cada suelo representan un punto, por lo tanto los valores de "a" y "b" trazan la recta que mejor se ajusta a los datos de Límite Líquido obtenidos por ambos métodos para un número determinado de suelos.

En las ecuaciones 4 y 5 se obtienen los valores de a y b respectivamente. Mientras que la ecuación 6 indica el coeficiente de correlación el cual tiene rangos entre 0 y 1 e indica que tanto se aproxima la recta a los datos obtenidos de un experimento o ensayos.

$$a = \frac{n * \sum x * y - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$b = \frac{\sum x^2 * \sum y - \sum x * y * \sum x}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad \text{Ecuación 5.}$$

$$r^2 = \frac{n * \sum x * y - \sum x * \sum y}{\sqrt{(n * \sum x^2 - (\sum x)^2) * (n * \sum y^2 - (\sum y)^2)}} \quad \text{Ecuación 6.}$$

Donde:

x: valores en las abscisas (ensayos de Casagrande).

y: valores en las ordenadas (ensayos de Cono de Penetración).

n: número de ensayos realizados.

En un estudio realizado por Rabat Blázquez (2016) sobre 41 suelos de distintas regiones de España determinó la variación entre ambos métodos ensayados, los cuales se pueden apreciar en la tabla 4, en la cual los suelos tienen un rango de Límite Líquido que varía entre 19.3 y 61.8. En la columna 1 está el numeral de ensayo, en la columna 2 esta le Límite Líquido por Cuchara de Casagrande, en la columna 3 el Límite Líquido por Cono de Penetración, en la columna 4 está la diferencia entre ambos métodos y en la columna 5 está la diferencia en porcentaje.

Tabla 4: Comparación de resultados de Límite Líquido (Rabat Blázquez, 2016).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Número	LL Cuchara	LL Cono de Penetración	Xi=LL Cuchara-LL Cono de Penetración	% Variación
1	27.8	29.1	1.3	4.68
2	22.0	23.7	1.7	7.73
3	20.6	20.2	-0.4	-1.94
4	24.2	24.3	0.1	0.41
5	31.2	31.5	0.3	0.96
6	25.6	24.5	-1.1	-4.30
7	72.3	70.3	-2	-2.77
8	22.7	23.5	0.8	3.52



9	23.8	24.6	0.8	3.36
10	19.0	20.5	1.5	7.89
11	26.5	28.1	1.6	6.04
12	19.3	20.9	1.6	8.29
13	23.0	23.1	0.1	0.43
14	20.2	21.4	1.2	5.94
15	20.9	21.8	0.9	4.31
16	23.3	23.9	0.6	2.58
17	21.3	21.6	0.3	1.41
18	23.1	25.1	2	8.66
19	28.3	28.5	0.2	0.71
20	22.5	23.3	0.8	3.56
21	42.9	40.4	-2.5	-5.83
22	23.9	25.2	1.3	5.44
23	26.2	25.1	-1.1	-4.20
24	22.3	21	-1.3	-5.83
25	22.1	21.8	-0.3	-1.36
26	23.1	23.6	0.5	2.16
27	42.2	40.3	-1.9	-4.50
28	24.0	24.1	0.1	0.42
29	28.4	28.1	-0.3	-1.06
30	61.8	63.0	1.2	1.94
31	28.4	27.8	-0.6	-2.11
32	26.5	28.1	1.6	6.04
33	27.5	27.3	-0.2	-0.73
34	21.6	23.5	1.9	8.80
35	25.4	26.0	0.6	2.36
36	21.6	22.8	1.2	5.56
37	27.7	28.4	0.7	2.53
38	24.2	26.0	1.8	7.44
39	32.7	33.8	1.1	3.36
40	28.1	27.9	-0.2	-0.71
41	24.6	26.3	1.7	6.91

Se observa en la tabla 4 las variaciones porcentuales entre ambos métodos se encuentran por debajo del 10%, frente a la variabilidad de los resultados el autor procede a proponer dos nuevas correlaciones para los suelos sobre los cuales se han realizado los ensayos, estas correlaciones se presentan en la tabla 5 en donde: la columna 1 está la ecuación desarrollada y la columna 2 está el rango de humedad en el suelo para el cual se aplica.



Tabla 5: Ecuaciones propuestas (Rabat Blázquez, 2016).

(1)	(2)
Ecuación	Rango de estudio de LL
LLcono= 0.95 * LLcuchara + 1.73	20-75 % (baja y media plasticidad)
LLcono= 0.94 * LLcuchara + 2.18	20-35 (baja plasticidad)

2.3 Selección de los equipos de medición

El elemento mecánico conocido como Cono de Penetración se construirá en la ciudad de Cuenca, cuidando que las dimensiones y pesos coincidan con las dimensiones y pesos presentados en la norma BS 1377-2:1990.

Al ser comprobadas las dimensiones por medio de instrumentos de medición (micrómetros y balanzas) estos equipos deben tener una resolución apropiada, esto quiere decir que los equipos de medición sean capaces de detectar pequeñas variaciones en las dimensiones y peso. La ecuación 7 que se encuentra en la sección 7.6 del libro Metrología (Restrepo, 2016), permite determinar la resolución requerida en los equipos de acuerdo a las tolerancias que tiene el Cono de Penetración.

$$R = \frac{T}{K} \quad \text{Ecuación 7. (Restrepo, 2016).}$$

Donde:

R: Resolución deseada en el equipo (valor mínimo capaz de medir).

T: Tolerancias del Cono de Penetración (rango de valores que permite la norma en más y menos al valor establecido).

K: Constante que puede variar entre 4 y 10, valor determinado por cuanto se desea que la resolución en el equipo sea mejor que la tolerancia permitida (mayor el valor mejor la resolución que la tolerancia).

A continuación, se evalúa la incertidumbre del equipo (IT), que se calcula con la ecuación 8 de la sección 7.7 del libro Metrología de Restrepo (2016). Entre mayor el valor de la incertidumbre (IT) se obtiene un mejor resultado en las mediciones, sin embargo, de acuerdo a Restrepo (2016) un valor viable de incertidumbre (IT) para un proceso de medición correcto se encuentra entre 3 y 10.

$$IT = \frac{T}{R} \quad \text{Ecuación 8. (Restrepo, 2016)}$$

2.4 Análisis de ensayos

Lo primero será determinar el número de ensayos de la muestra prototipo de los ensayos de Cuchara de Casagrande, de la que se obtiene la desviación estándar. Para ello, se emplea la ecuación 9 de la norma ASTM E122-00.

$$n = \left(\frac{C*\sigma_0}{E}\right)^2 \quad \text{Ecuación 9. (ASTM E122-00)}$$



Donde:

n: Tamaño de la muestra que se utilizará para determinar la desviación estándar prototipo.

E: Error esperado.

σ_0 : Desviación estándar estimada u obtenida de otros estudios.

c: Factor que indica la probabilidad de que el error exceda el error esperado E.

En la tabla 6 se indica el valor de c que está en la columna 1 y en la columna 2 está la probabilidad de que el error esperado sea excedido.

Tabla 6: Valores de c para probabilidad de que el error exceda E (ASTM E122-00).

(1)	(2)
c	Probabilidad de exceder E
3	3 en 1000 (certeza práctica)
2.56	10 en 1000
2	45 en 1000
1.96	50 en 1000 (1 en 20)
1.64	100 en 1000 (1 en 10)

Para la desviación estándar esperada se utilizan los valores de la tabla 7 obtenida de la norma ASTM D4318-00, esta tiene el propósito de determinar los rangos aceptables de ensayos de los Límites de Atterberg en suelos de tipo arcilloso o limoso, realizados en múltiples laboratorios donde: en la columna 1 se tiene el tipo de suelo sobre el cual se realizaron los ensayos, la columna 2 describe el número de laboratorios en los cuales se realizaron los ensayos, y las columnas 3, 4 y 5 muestran los valores promedio obtenidos en cada suelo en puntos porcentuales, en las columnas 6, 7 y 8 se muestran los valores de la desviación estándar en puntos porcentuales y las columnas 9, 10 y 11 describen la variación permitida en ensayos sobre el mismo suelo.

El término puntos porcentuales, se entiende como la diferencia aritmética de dos porcentajes.

Tabla 7: Resumen de resultados de Límites de Atterberg (ASTM D4318-00).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Tipo de suelo	Laboratorios	Valor promedio (puntos porcentuales)			Desviación estándar (puntos porcentuales)			Rango aceptable de 2 resultados (puntos porcentuales)		
		LL	PL	PI	LL	PL	PI	LL	PL	PI
CH	24	59.9	20.4	39.5	2.1	2.7	3.1	6	7	9
CL	24	33.3	19.9	13.4	0.8	1.3	1.6	2	4	4
ML	18	27.1	23.2	3.9	1.3	1.2	1.8	4	3	5

Una vez determinado el tamaño de la muestra y la desviación estándar se procederá a calcular la cantidad de ensayos comparativos entre el ensayo de Casagrande y Cono de Penetración utilizando la ecuación 10.

$$n = \frac{2*(Z_{\alpha}+Z_{\beta})^2*S^2}{d^2}$$

Ecuación 10. Tamaño de la muestra para comparación de medias (Femández, 1996).



Donde:

S: Valor de la desviación estándar del grupo de control o prototipo.

d: Diferencia mínima que se desea detectar entre las dos muestras a analizar.

n: Número de ensayos necesarios en cada una de las muestras.

Z_{α} : Riesgo aceptable (tabla 8).

Z_{β} : Poder estadístico para detectar diferencias (tabla 9).

En la tabla 8: la columna 1 α es el valor de riesgo aceptado de que se pueda cometer un error, en la columna 2 está el valor de Z_{α} para test unilateral que se utiliza cuando se conoce cuál de las medias a comparar es mayor y la columna 3 está el valor de Z_{α} para test bilateral que se utiliza cuando no se conoce cuál de las medias a comparar es mayor.

La tabla 9 presenta valores para determinar el tamaño de la muestra y se tiene: en la columna 1 se presenta el valor de β que es el poder estadístico para detectar diferencia entre las medias a comparar, en la columna 2 se presenta el resultado de la operación $1 - \beta$ y en la columna 3 está el valor de Z_{β} .

Tabla 8: Valores de Z_{α} más utilizados (Fernández, 1996).

(1)	(2)	(3)
α	Test unilateral	Test bilateral
0.200	0.842	1.282
0.150	1.036	1.440
0.100	1.282	1.645
0.050	1.645	1.960
0.025	1.960	2.240
0.010	2.326	2.576

Tabla 9: Valores de Z_{β} más utilizados (Fernández, 1996).

(1)	(2)	(3)
β	$1 - \beta$	
0.01	0.99	2.326
0.05	0.95	1.645
0.10	0.90	1.282
0.15	0.85	1.036
0.20	0.80	0.842
0.25	0.75	0.674
0.30	0.70	0.524
0.35	0.65	0.385
0.40	0.60	0.253
0.45	0.55	0.126

Otro método para determinar el valor de Z_β es a través de la ecuación 11.

$$Z_\beta = \sqrt{\frac{n}{2}} * \frac{d}{S} - Z_\alpha \quad \text{Ecuación. Poder estadístico. (Fernández, 1996).}$$

Donde:

S: Valor de la desviación estándar del grupo de control o prototipo.

d: Diferencia mínima que se desea detectar entre las dos muestras a analizar.

n: Número de ensayos necesarios en cada una de las muestras.

Z_α : Riesgo aceptable.

Z_β : Poder estadístico para detectar diferencias.

2.5 Ensayo de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración

A continuación, se describen los distintos equipos necesarios para cumplir con los objetivos propuestos en cuanto a la parte práctica del presente estudio.

2.5.1 Cuchara de Casagrande

La Cuchara de Casagrande es un instrumento mecánico que consiste de una copa de bronce, una base dura sobre la cual se deja caer la copa, un mecanismo excéntrico capaz de levantar la copa de bronce para permitir la caída de la misma de acuerdo a la norma ASTM D4318-00. En la figura 7 se muestra un esquema de la Cuchara de Casagrande y en la figura 8 se muestra el equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

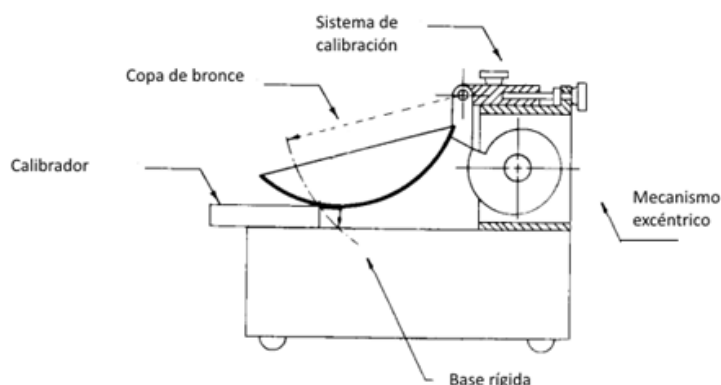


Figura 7: Esquema de la Cuchara de Casagrande (ASTM D4318-00).

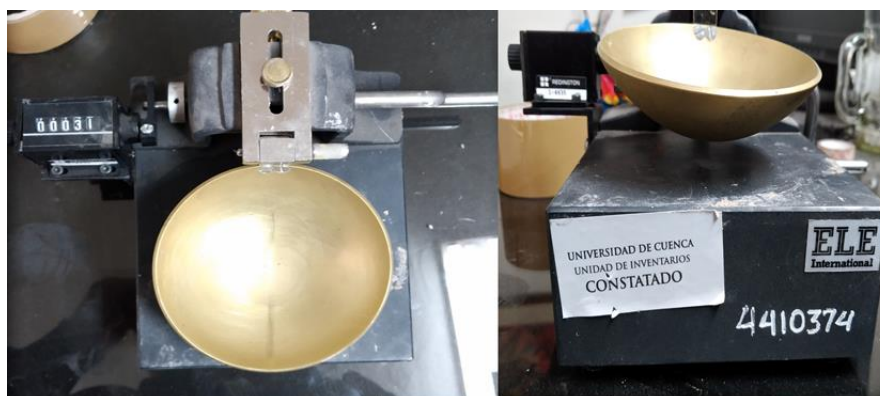


Figura 8: Equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

En la figura 9 se muestra el ranurador normalizado y calibrado de acuerdo a la norma ASTM D4318-00 que se utiliza para realizar la ranura en el suelo colocado en la copa de la Cuchara de Casagrande, de igual manera el calibrador que no necesariamente se encuentra unido al ranurador sirve para calibrar la altura de caída de la copa de bronce.



Figura 9: Ranurador disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Suelos de la Universidad de Cuenca.

2.5.2 Cono de Penetración y Penetrómetro

El Cono de Penetración se encuentra regulado por la norma BS 1377-2:1990, la norma describe las dimensiones que se observan en detalle en la figura 10, así como la placa de comprobación del cono, que tiene un espesor de 1.75 ± 0.1 mm y con un agujero de 1.5 ± 0.02 mm. El estado del Cono de Penetración se comprueba al introducir la punta por el agujero de la placa y se debe poder sentir la punta del cono de forma dactilar por el otro lado de la placa de comprobación, en caso de no ser así el cono presenta un desgaste excesivo y ya no es utilizable.

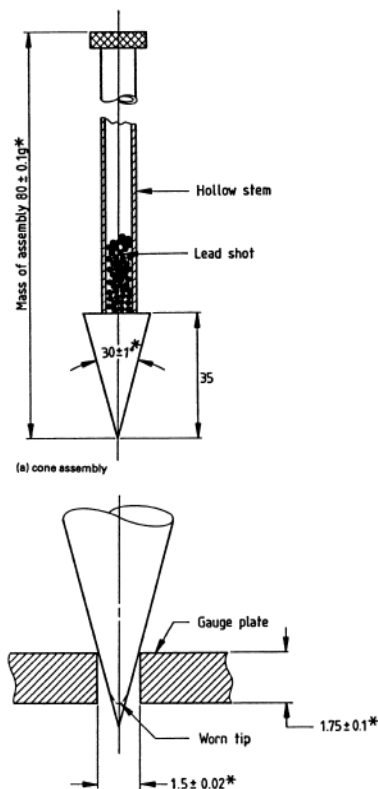


Figura 10: Detalle de cono para ensayo de Límite Líquido (BS 1377-2:1990).

Es necesario contar con un dispositivo eléctrico o mecánico que permite la caída controlada del Cono de Penetración por un tiempo determinado por la norma BS 1377-2:1990 de 5 segundos al mismo tiempo que toma una medida de la penetración del cono sobre el suelo, este procedimiento se repite cuatro veces para poder determinar el Límite Líquido por medio de ajuste de mínimos cuadrados. El aparato de penetración en materiales bituminosos se encuentra regulado por la norma ASTM D5-06. En la figura 11 se puede apreciar el equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.



Figura 11: Aparato de penetración en materiales bituminosos disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

La copa metálica necesaria para la contención del suelo durante el ensayo de Cono de Penetración, debe tener un diámetro interno de 55 ± 2 mm y una altura total interna de 40 ± 2 mm (BS 1377-2:1990). En la figura 12 se muestra la copa metálica.



Figura 12: Copa metálica para ensayos de Cono de Penetración.

2.6 Normas para calibración equipos y procedimientos

Para obtener resultados que tengan validez estadística y experimental es necesario que los equipos cumplan con los requisitos exigidos por las distintas normas, para garantizar la correcta medición de los parámetros en cada ensayo.

La norma ASTM D4318-00 describe las medidas que debe cumplir la Cuchara de Casagrande, la altura de caída que debe generar el dispositivo mecánico, el ranurador, y calibraciones adicionales. La norma BS 1377-2:1990 describe las medidas y pesos que debe cumplir el Cono de Penetración, así como los procedimientos para la obtención del Límite Líquido. La norma ASTM D5-06 describe los equipos de penetración para bitúmenes y asfaltos, el tiempo de caída y las unidades de medida en la que se registra la penetración que es exigido por la norma BS 1377-2:1990 para la realización del ensayo de Límite Líquido con Cono de Penetración.

Debido a la existencia de procedimientos pre establecidos y normados para la realización de los ensayos de Cono Penetración y de Casagrande se procederá a realizar una revisión de los procedimientos a seguir de acuerdo a las normas recientes.

La norma ASTM D2488-00 permite obtener una descripción e identificación del suelo para propósitos de ingeniería a través de la examinación visual del suelo, sus características físicas y el uso de ensayos sencillos de aplicar. Al utilizar esta norma se podrá identificar los posibles suelos necesarios para la realización del proyecto de titulación.

La norma ASTM D2487-00 tiene los procedimientos para la clasificación de los suelos de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Esta norma logra la clasificación a través de la separación del suelo por su tamaño de partículas con la utilización de medios mecánicos como análisis granulométrico, la obtención del Límite Líquido y Límite Plástico para determinar el Índice de Plasticidad y demás procedimientos descritos en la norma.

La norma ASTM D4318-00 describe tanto los equipos, la calibración de los mismos y los procedimientos para la obtención del Límite Líquido por el método de Casagrande y el Límite Plástico, así como los cálculos necesarios para llegar a determinar el Índice de Plasticidad.

La norma BS 1377-2:1990 describe el procedimiento para la determinación del Límite Líquido utilizando el Cono de Penetración, así como los equipos necesarios para la realización del ensayo.

La norma ASTM D2216-10 describe el procedimiento para determinar la humedad en suelos. De suma importancia ya que el Límite Líquido es definido por la humedad que tiene el suelo en el cambio de estado.



3. Capítulo 3: Metodología

Los suelos con los que se realizarán los ensayos deben tener un contenido mayor al 50% de arcillas o limos y al mismo deben tener características plásticas diferentes, las características plásticas son necesarias ya que en suelos no plásticos no se puede determinar el Límite Líquido, anulando la posibilidad de realizar los ensayos, por lo tanto los suelos necesarios para desarrollar el presente proyecto tienen características específicas que deben ser determinadas en laboratorio, para tal fin se optará por solicitar el apoyo de la Dirección General de Fiscalización del GAD Municipal de Cuenca que tienen gran experiencia en los suelos de la ciudad de Cuenca.

La Dirección General de Fiscalización del GAD Municipal de Cuenca se encuentra a cargo del Ing. Carlos Cordero quien brindará su apoyo en la localización de los suelos necesarios para la elaboración de los ensayos de Cono de Penetración y Cuchara de Casagrande. Este apoyo es posible gracias a que la Dirección General de Fiscalización tiene a cargo la fiscalización de varios proyectos constructivos.

3.1 Paso 1: Selección de equipos para toma de medidas en el desarrollo de los ensayos

El cono tiene tres medidas que deben ser controladas para que se puedan obtener resultados apropiados de Límite Líquido, las medidas son: el peso (80.0 g), la longitud (35 mm) y el ángulo de la punta (30°). Debido a que existen pequeñas desviaciones en la construcción de cualquier componente mecánico la norma BS 1377:2-1990 establece la tolerancia en que puede variar las distintas medidas del cono, en base a la tolerancia, se escoge la resolución del instrumento o su capacidad para detectar estas variaciones.

En la tabla 10: la columna 1 se encuentra el equipo de medición a utilizar, la columna 2 se muestra la tolerancia de las dimensiones del Cono de Penetración según la norma BS 1377:2-1990 y en la columna 3 se muestra el valor de factor k seleccionado, Restrepo (2016) recomienda un valor k de 5 para obtener una medida correcta, sin embargo, ya que se busca que la resolución del equipo de medición sea considerablemente mejor que la tolerancia permitida en el Cono de Penetración se escoge un valor de k igual a 10.

Tabla 10: Cálculo de resolución e incertidumbre.

(1)	(2)	(3)
	Tolerancia	Factor K
Goniómetro (ángulo)	30±1.0°	10
Balanza	80±0.1 g	10
Calibrador	35±1.0 mm	10

Estos valores se utilizarán para realizar los cálculos de la resolución e incertidumbre utilizando la ecuación 7 y la ecuación 8 de la sección 2.3 del presente proyecto.

Goniómetro

$$R = \frac{1.0}{10} = 0.10^\circ$$

$$IT = \frac{1.0}{0.1} = 10$$

Balanza

$$R = \frac{0.1}{10} = 0.01g$$

$$IT = \frac{0.10}{0.01} = 10$$

Calibrador

$$R = \frac{1.0}{10} = 0.10mm$$

$$IT = \frac{1.0}{0.1} = 10$$

Como se puede observar la resolución requerida para el goniómetro es de 0.10° y el goniómetro disponible tiene una resolución de $5'$ es decir 0.083° lo que es adecuado para obtener una medida metrológica correcta del Cono de Penetración, sin embargo, al ser el cono construido por un proceso de maquinado CNC (Control Numérico Computarizado) la posibilidad de que exista un error en la construcción se reduce drásticamente. Aun así, se realizará la medida del Cono de Penetración con los goniómetros disponibles en el mercado como el que se muestra en la figura 13.



Figura 13: Goniómetro con precisión de minuto.

Debido a que el peso del Cono de Penetración es de vital importancia para la obtención de resultados correctos, en la medición del Límite Líquido se utilizará un equipo que cumple con los requerimientos de la norma ASTM E617-13 en la figura 14 se muestra la balanza OHAUS que cumple con la resolución necesaria de 0.01 g.



Figura 14: Balanza OHAUS.

En cuanto al calibrador se ocupa los disponibles en el mercado, el cual se muestra en la figura 15. El calibrador disponible en el laboratorio tiene una resolución de 0.1 mm por lo que cumple con la resolución necesaria para obtener una medida correcta del Cono de Penetración.



Figura 15: Calibrador de resolución 0.1 mm.

Para la determinación del porcentaje de humedad (del Límite Líquido tanto con la Cuchara de Casagrande como con el Cono de Penetración, se procederá de acuerdo a la norma ASTM D2216-10. La norma describe dos métodos a través de los cuales se puede determinar el porcentaje de humedad: el método A donde la masa del contenido de agua se aproxima al 1% más cercano y el método B donde el contenido de agua en masa se aproxima al 0.1% más cercano.

En la tabla 11 se muestra la resolución requerida de la balanza por la norma, así como la cantidad de suelo necesario para la determinación de la humedad de acuerdo al tamaño máximo de tamiz, donde: la columna 1 provee el tamaño de tamiz por donde pasa el 100% del material, la columna 2 tiene el tamaño de la muestra de suelo y la columna 3 muestra la resolución de la balanza a utilizar para realizar las medidas.

Tabla 11: Requerimientos para pesado de muestras y legibilidad de balanza (ASTM 2216-10).

(1)	(2)	(3)
Máximo tamaño de partículas (100% pasa)	Método A: contenido de agua registrado al 1%	
Tamaño de tamiz (mm)	Masa de la muestra (g)	Resolución balanza (g)
75.0	5000	10
37.5	1000	10
19.0	250	1
9.5	50	0.1
4.75	20	0.1
2.00	20	0.1

Debido a que la norma ASTM D4318-00 y la norma BS 1377-2:1990 piden que los valores del Límite Líquido sean expresados en porcentaje de valor entero, se procederá a utilizar el método A para el pesado de las muestras de suelo, utilizando una balanza con una resolución de 0.1 g para muestras de masa igual o mayor a 20.0 g. En la figura 16 se presenta el equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca con resolución de 0.1 g.



Figura 16: Balanza OHAUS con resolución de 0.1 g.

3.2 Paso 2: Diseño y construcción del Cono de Penetración

Consiste en el diseño y construcción del Cono de Penetración con las medidas de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990, sin embargo, las medidas geométricas otorgadas por la norma están enfocadas únicamente en el Cono de Penetración, mientras que las del peso que se deja caer sobre la muestra de suelo, que es de $80.0 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ es el peso total del cono y vástago que permite la caída vertical controlada por el aparato de penetración de materiales bituminosos.

El peso normado presenta una dificultad constructiva ya que como se muestra en la figura 17 el vástago consta de varias partes removibles a través de roscas, las cuales también tienen un peso característico que debe ser tomado en cuenta a la hora de diseñar el cono. El peso del vástago principal es de 46.33 g lo cual impone un peso de diseño para el Cono de Penetración de 33.77 g.



Figura 17: Vástago primario y balanza.

Para la construcción del dispositivo se comenzará por la selección del material, que según la norma BS 1377-2:1990 puede ser de duraluminio o de acero stainless. Se escogerá el acero stainless 304 que se encuentra disponible en el mercado y posee una mayor densidad que el duraluminio, lo que facilita el diseño ya que hace innecesaria la adición de masas para lograr el peso requerido por la norma respetando las medidas y restricciones.

El diseño del Cono de Penetración se basa en el ajuste de medidas geométricas hasta lograr el volumen deseado. Debido a los metales y otros compuestos que son añadidos al acero stainless 304 para lograr sus propiedades mecánicas, este no tiene una densidad normada ASTM A580/A580M-15. Varios fabricantes como parte de la información del producto presentan una densidad que varía de 7.9 a 8.0 g/cm^3 , por lo que se determinará la misma en laboratorio.

La barra de acero stainless fue medida y pesada para determinar la densidad del material seleccionado, en la tabla 12 se muestran los valores obtenidos donde: en la columna 1 es el peso de la barra de acero, la columna 2 el diámetro de la barra de acero, la columna 3 tiene la longitud medida en diferentes puntos de la barra de acero, la columna 4 tiene el volumen calculado de la barra de acero y en la columna 5 se encuentra la densidad calculada de la barra de acero.

Tabla 12: Densidad acero stainless.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Peso (g)	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
396.65	2.52	10.09	50.30	7.89
396.65	2.52	10.13	50.52	7.85
396.65	2.52	10.08	50.28	7.89
Densidad del acero stainless 304				7.87

Lo primero que se hace es diseñar el Cono de Penetración siguiendo las medidas determinadas por la norma BS1377-2:1990, teniendo una longitud de 7.60 cm en total para poder acoplarse apropiadamente al vástago del aparato de penetración de materiales bituminosos.

Como se puede ver en la figura 18 se continúa con el diseño del Cono de Penetración (1) que según la norma tiene una longitud de 35.0 mm y 18.9 mm de diámetro en su parte posterior, sin embargo, para el diseño se optará por adicionar un cilindro de 1.0 mm de espesor y diámetro de 18.9 mm en la parte final del cono, el cilindro será construido monolíticamente con el Cono de Penetración.

Para lograr ajustar el peso del cono se utilizará una pieza adicional metálica que puede ser de un material diferente y que tiene como único propósito añadir peso al no estar en contacto con el suelo, En este caso se utilizará una pieza de bronce con una densidad de 7.80 g/cm³. En la figura 18 la pesa (2) tiene una longitud de 6 mm y diámetro de 10 mm.

En la figura 18 también se ve el diseño del vástago del cono (3), esta parte se acopla al cono por medio de una unión roscada y al vástago principal por medio de un tornillo de apriete que ejerce presión lateral logrando así la fijación del Cono de Penetración con el vástago principal. El vástago del cono tiene una longitud de 34 mm y un diámetro de 3.1 mm.

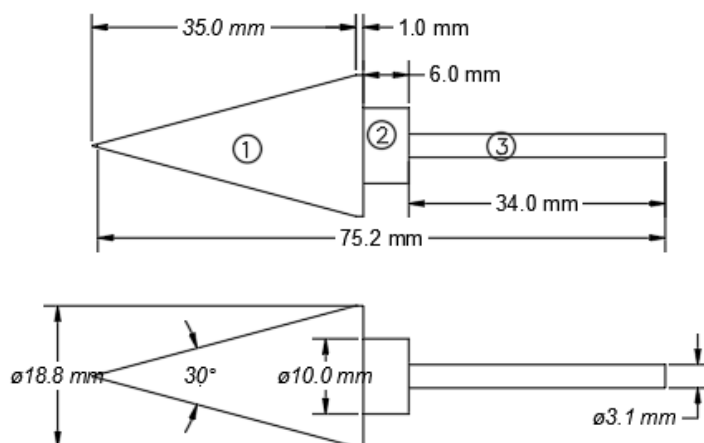


Figura 18: Diseño del Cono de Penetración de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990.

Información sobre el Cono de Penetración se muestra en la tabla 13 en donde: la columna 1 y 2 muestran las partes del cono y su designación numérica, la columna 3 muestra el material de fabricación, la columna 4 tiene el diámetro de cada componente, la columna 5 tiene la longitud de



cada componente, la columna 6 el volumen de cada pieza, la columna 7 muestra la densidad de cada pieza y la columna 8 tiene el cálculo del peso de cada pieza del cono así como la sumatoria de estas masas.

Tabla 13: Dimensiones, masas y volúmenes del Cono de Penetración

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	Parte	Material	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	Masa (g)
1	Cono	Acero inoxidable	0.00-1.89	3.60	3.55	7.87	27.94
2	Pesa	Bronce	1.00	0.60	0.47	7.80	3.67
3	Vástago Cono	Acero inoxidable	0.31	3.40	0.26	7.87	2.05
4	Vástago principal	Acero Inoxidable	-	-	-	-	46.33
Masa total Cono de Penetración							79.99

La construcción se realizará mediante un proceso computarizado en torno CNC (Control Numérico Computarizado) que tiene la capacidad de lograr una mayor precisión en las medidas que se proveen al software de la computadora del torno. Para la realización del trabajo se opta por contratar a la empresa INGMATRICOM de la ciudad de Cuenca, que tiene una larga trayectoria en la construcción de elementos y mecanismos de material metálico de alta precisión.

En el proceso constructivo se espera pequeñas variaciones de la masa debido a la incertidumbre en las cantidades de materiales añadidos para formar la aleación de acero inoxidable 304, estas variaciones se consideraron para el diseño, dejando una sobredimensión en el vástago de 4 mm de longitud con el propósito de hacer ajustes posteriores.

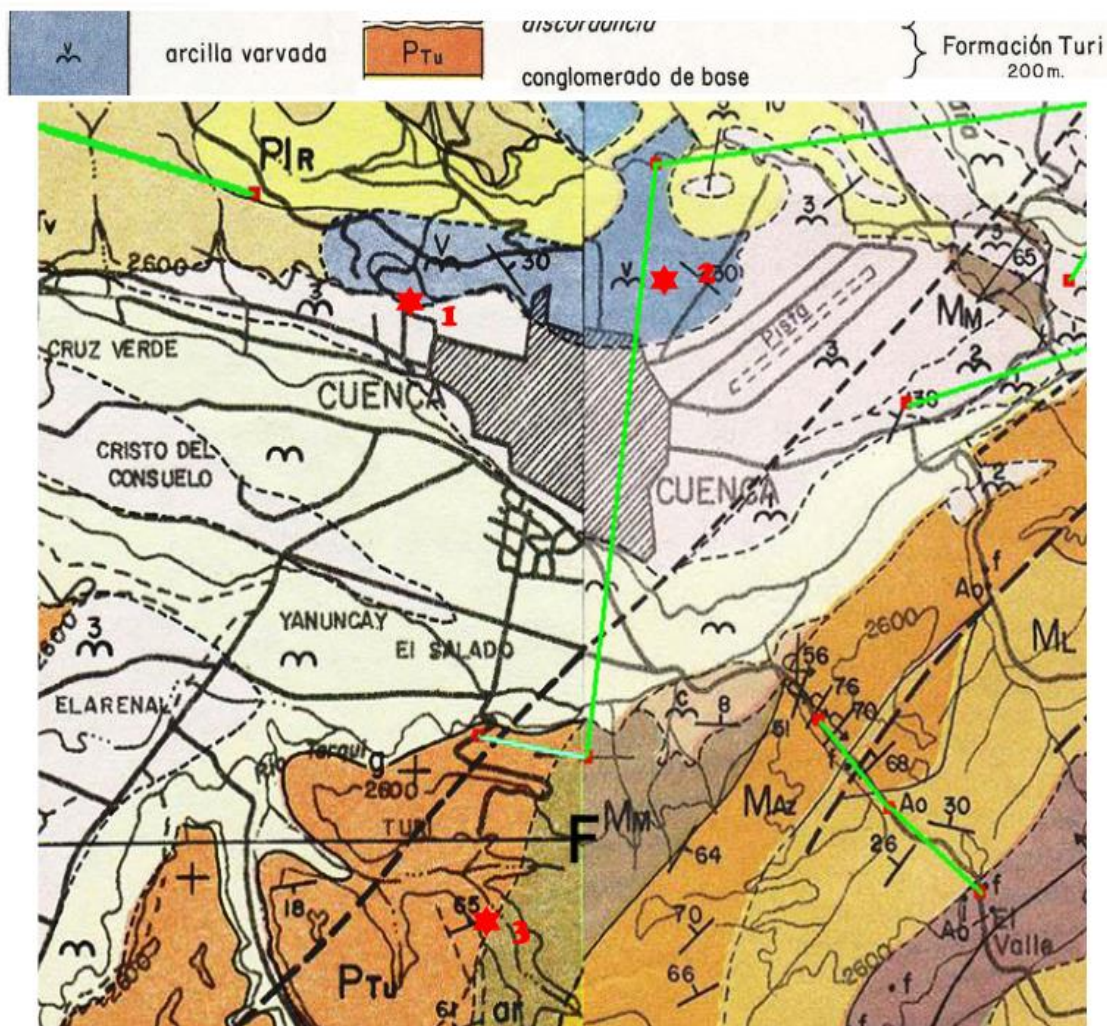
De ser necesario la sobre dimensión será desbastada por procedimientos abrasivos de limado hasta lograr la masa especificada anteriormente, para luego comprobar las medidas del Cono de Penetración mediante un proceso metrológico

3.3 Paso 3: Localización, descripción y extracción de suelos

Para la selección de los suelos en los que se realizarán los ensayos se procede a la revisión del mapa geológico de la ciudad de Cuenca y cercanías para poder determinar las zonas en donde se puede encontrar formaciones geológicas que contengan limos o arcillas.

Formaciones que destacan por sus altos contenidos de arcillas y limos son la formación Turi y un depósito lacustre de arcilla varvada, los cuales se aprecian en la figura 19. Tras un recorrido por estos sectores se identifica tres proyectos en construcción, la ubicación de estos tres proyectos se puede ver en la figura 19 con el símbolo “ ★ ”.

Los proyectos constructivos que se identificaron son construcciones que tienen los siguientes nombres: el que se encuentra ubicado en la zona 1 es el paso a desnivel ubicado en la Av. de las Américas y Humboldt con coordenadas geográficas (-2.885261, -79.006409), en la zona 2 se encuentra el Megaparque de la Luz con coordenadas (-2.878952,-78.992872) y en la zona 3 se encuentra ubicado el Megaparque de Ictocruz con coordenadas (-2.928222,-79.002983).



★ SITIOS DE EXTRACCION DE SUELOS

Figura 19: Mapa geológico de la ciudad de Cuenca.

Se obtendrán las muestras con la ayuda del Ing. Carlos Cordero, director de la Dirección General de Fiscalización del GAD Municipal de Cuenca, para la extracción de la cantidad de suelo necesario para los ensayos.

Para tener una mejor idea del tipo de suelo de cada uno de los sitios seleccionados se procederá a realizar la descripción del suelo (ASTM D2488-00)

Angularidad: describe el terminado de los filos de las partículas de tamaño de entre 19 mm y 76 mm, siendo estos terminados angulares, subangulares, semi redondeados y redondeados.

Color: de importancia para identificar suelos de origen geológico similar, así como suelos de tipo orgánico. El color debe ser descrito para muestras tengan o no, contenido de humedad.

Olor: en muestras húmedas se puede distinguir cuando existe un contenido vegetal en el suelo por el olor a vegetación en descomposición. En caso de encontrarse con olores inusuales también deben ser notificados.

Condición de humedad: puede ser descrita como: seca, húmeda o mojada.



Consistencia: se describe de acuerdo a la penetración que puede tener el dedo cuando este se presiona contra el suelo, el suelo puede ser descrito como: muy suave, suave, firme, duro y muy duro.

Cementación: describe la facilidad con la que el suelo se desintegra con la manipulación o presión y puede ser descrito como: débil, moderado y fuerte.

Rango de tamaño de partículas: que por su tamaño pueden ser descritas como gravas (4.75 mm – 76 mm), arenas (0.075 mm – 4.75 mm) y arcillas y limos (menores a 0.075 mm).

Tamaño máximo de partículas: describe el tamaño máximo de partícula encontrado en la muestra.

Dureza: que describe la resistencia de las partículas ante el impacto de martillos.

3.4 Paso 4: Granulometría

La granulometría tiene como propósito la clasificación del suelo de acuerdo a la norma ASTM D2487-00, a continuación, se describe el proceso para: la preparación del suelo, el cribado y la determinación de los pesos retenidos. Cabe indicar que debido a que el proceso es repetitivo se procederá a describir el proceso una sola vez para un tipo de suelo.

En la descripción del suelo de acuerdo a la norma ASTM D2488-00 a través de la observación se presenta que el tamaño máximo de las partículas es de 4.75 mm por lo tanto de acuerdo a la norma ASTM D2487-00 es necesario una cantidad de suelo mínima de 100 g para poder realizar el cribado.

Para realizar el cribado la norma ASTM D2487-00 especifica la abertura de los tamices que se ve en la tabla 14 en donde: la columna 1 describe la designación de los tamices a utilizar y la columna 2 describe la apertura de los mismos.

Debido a que el tamaño máximo de partículas es de 4.75 mm se procede a utilizar solo los tamices: No. 4 (4.75 mm), No. 10 (2.00 mm), No. 40 (0.425 mm) y No. 200 (0.075 mm).

Tabla 14: Designación de tamices para ensayos de clasificación según la norma ASTM D2487-00.

(1)	(2)
Tamiz	Apertura de tamices
3	75.0 mm
¾	19.0 mm
No 4	4.75 mm
No 10	2.00 mm
No 40	0.425 mm
No 200	0.075 mm

La norma ASTM D2487-00 describe la cantidad en masa que se requiere de material para poder llevar a cabo el análisis granulométrico en relación al tamaño máximo de partículas, debido a que el suelo tiene un tamaño de partículas máximo de 4.75 mm de acuerdo a la descripción del suelo con la norma ASTM D2488-00 se requiere una masa mínima de 100 g. En la tabla 15 se describen las masas de las muestras seleccionadas para la realización del análisis granulométrico en donde: la columna 1 está la procedencia del suelo y en la columna 2 está la masa del suelo.

Tabla 15: Peso mínimo de muestras para ensayos de clasificación según la norma ASTM D2487-00.

(1)	(2)
Suelo (ubicación)	Tamaño muestra (g)
Megaparque Ictocruz	200.0
Megaparque de la Luz	201.1
Paso elevado	200.4

Debido a que varias de las partículas de arcilla o limos se encuentran consolidadas la reducción de estas partículas a su menor tamaño por medio de impacto con martillos de goma no resultaría eficiente a la hora de obtener los porcentajes reales de la granulometría. Por tanto, para conocer la cantidad real de suelo cuyo tamaño máximo es 0.075 mm se escogerá el procedimiento descrito por la norma ASTM C117-95.

La norma ASTM C117-95 determina el contenido de partículas menores a 0.075 mm por medio del lavado del suelo sobre el tamiz #200, empezando por el secado de la muestra de suelo seleccionada a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y determinando la masa de la muestra secada con una precisión de 0.1%, es decir, con una resolución mínima de 0.2 g, se colocará la muestra de suelo en el tamiz #200 y cubriéndolo con agua para permitir que las partículas de suelo que estén consolidadas se suelten, para luego verter agua de lavado como se observa en la figura 20, se repite el proceso hasta que el agua de lavado sea clara al pasar por el tamiz #200.



Figura 20: Lavado de suelo de acuerdo a la norma ASTM C117-95.

El proceso se termina, tomando el material retenido en el tamiz #200, se lo seca a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se determina la masa del material secado al 0.1% (0.2 g) de la masa original de la muestra del suelo. En la tabla 16 se aprecia un resumen de resultados en donde en la columna 1 está la procedencia del suelo y en la columna 2 está el peso del suelo seco después del lavado.

Tabla 16: Masa del suelo después de lavado.

(1)	(2)
Suelo	Peso suelo seco después del lavado (g)
Megaparque Ictocruz	61.1
Megaparque de la Luz	50.8
Paso elevado	24.8

El cálculo del porcentaje de suelo que pasa se lo realiza con la ecuación 12, en donde A es el porcentaje de suelo que pasa el tamiz #200, B es la masa seca de la muestra seleccionada de cada suelo en gramos y C es la masa seca después del lavado del suelo en gramos. El resultado de los cálculos se muestra a continuación.

$$A = \frac{B-C}{B} * 100$$

Ecuación 1. Determinación porcentaje suelo que pasa el tamiz # 200. (ASTM C117-95).

Megaparque Ictocruz (Suelo 1).

$$A = \frac{200.0 - 60.6}{200.0} * 100 = 69.70 \%$$

Megaparque de la Luz (Suelo 2).

$$A = \frac{201.1 - 50.8}{201.1} * 100 = 74.74 \%$$

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca (Suelo 3).

$$A = \frac{200.4 - 24.8}{200.4} * 100 = 87.62 \%$$

El siguiente paso consiste en determinar los porcentajes de suelo que son retenidos en cada tamiz de los seleccionados de acuerdo a la norma ASTM D2487-00, que debido al tamaño máximo de las partículas de cada suelo (4.75 mm) son los tamices #4, #10, #40 y fondo. Se procederá a tamizar el suelo retenido en el tamiz #200 después del lavado.

Luego de colocar los tamices en orden ascendente se coloca el suelo y la tapa sobre este, se procede a tamizar en la máquina de sacudidas como se observa en la figura 21 por un periodo de 5 minutos, la máquina provee de un movimiento vertical y horizontal que permite el tamizado del suelo.



Figura 21: Tamizado suelo para determinación de granulometría ASTM D422-63.



Luego del tamizado se determina la masa del material retenido en cada uno de los tamices con una precisión del 0.1% de la masa original de la muestra (0.2 g) obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 17, donde: en la columna 1 están los tamices, en la columna 2 y 3 están el peso retenido en cada tamiz y su respectivo porcentaje del suelo recuperado del Megaparque Ictocruz, en la columna 4 y 5 están el peso retenido en cada tamiz y su respectivo porcentaje del suelo recuperado del Parque de la Luz y la columna 6 y 7 está el peso retenido en cada tamiz y su respectivo porcentaje del suelo recuperado del paso elevado de la Universidad de Católica de Cuenca.

Tabla 17: Pesos retenidos en los tamices de los tres suelos.

(1)	(2)		(4)		(6)	
	Megaparque Ictocruz (suelo 1)		Megaparque de la Luz (suelo 2)		Paso elevado(suelo 3)	
Tamiz	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido	Peso retenido (g)	Porcentaje retenido
4	0.0	0.0 %	1.4	0.7 %	2.1	1.0 %
10	0.9	0.4 %	4.5	2.2 %	2.6	1.3 %
40	3.0	1.5 %	18.1	9.0 %	7.7	3.9 %
200	56.7	28.4 %	26.8	13.4 %	12.4	6.2 %
Pasa 200	139.4	69.7 %	150.3	74.7 %	175.6	87.6 %
Sumatoria	200.0	100.0%	201.1	100.0 %	200.4	100.0 %

El la figura 22 se puede observar la curva granulométrica de los tres suelos sobre los cuales se realizaron los ensayos.

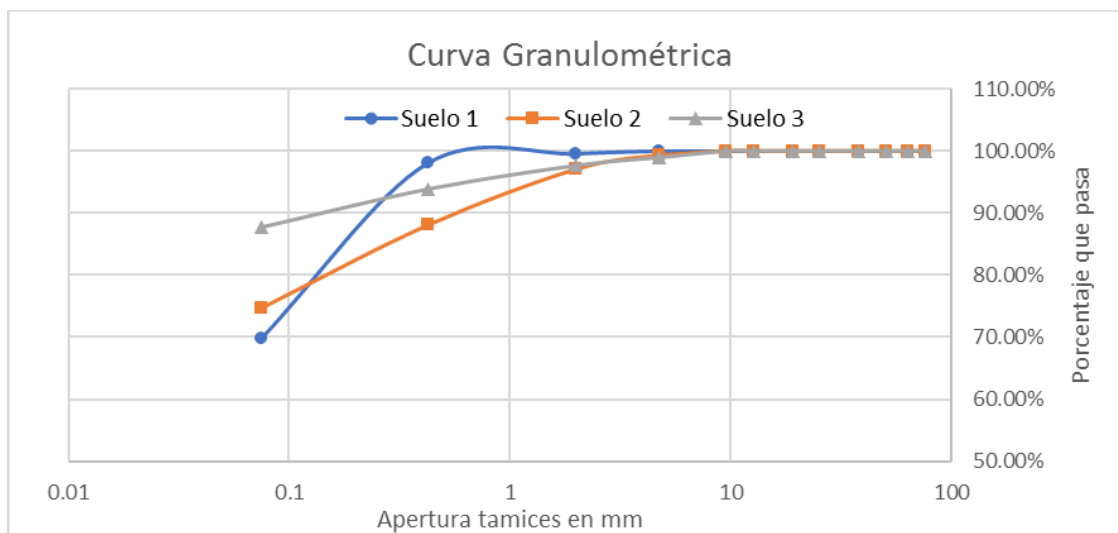


Figura 22: Curva granulométrica de los suelos 1, 2 y 3.

3.5 Paso 5: Preparación del suelo para ensayo del Límite Líquido

La norma ASTM D4318-00 provee dos métodos para la preparación del suelo que va a ser utilizado en la realización de los ensayos de Límite Líquido, en el primer método se debe disgregar las partículas con la utilización de un martillo de goma, para luego este material ser pasado por el tamiz #40 y todo el suelo que pase será utilizado para los ensayos de Límite Líquido.

El primer método presenta el problema con los suelos que contienen partículas de arcilla y limo consolidados, porque su dureza dificulta y alarga el proceso de disgregación del suelo con el martillo

de goma, existiendo la posibilidad de que muchas partículas consolidadas sean descartadas como material grueso. También existe la posibilidad de que el suelo cambie sus propiedades al ser sometido a temperatura de 60°C o superior en el horno al momento de ser secado para el proceso de disgregación, lo cual dependería de la cantidad de materia orgánica presente en el suelo.

Por estas razones se optará por el segundo método, que describe la norma ASTM D4318-00 como método húmedo para la preparación del suelo. Se coloca el suelo en reposo sumergido en agua el suficiente tiempo para que las partículas consolidadas se aflojen, y para que las partículas de arcillas y limos que se encuentran adheridas a las arenas y materiales gruesos se comiencen a separar.

Para el lavado se utiliza un recipiente capaz de contener al tamiz #40 y al mismo tiempo permita que el nivel del agua se encuentre 13 mm por encima de la malla del tamiz para que el suelo pueda ser lavado, el recipiente al igual que el tamiz que se va a utilizar se pueden observar en la figura 23.



Figura 23: Bandeja y tamiz para preparación del suelo por el método húmedo.

A continuación, se procede a colocar el suelo a ser lavado en el tamiz en cantidad no mayor a 500 g. En la figura 24 se observa el material colocado en el tamiz y sumergido, el cual se remueve con los dedos suavemente para que el material fino caiga desde el tamiz a la bandeja al mismo que tiempo que se disgrega con los dedos el material que pueda estar acumulado.



Figura 24: Proceso de lavado del suelo a través del tamiz #40.

Cuando la sensación del suelo al ser disgregado con los dedos se vuelve áspera se levanta el tamiz de la bandeja para lavar el suelo con una pequeña cantidad de agua limpia y luego desechar el material grueso. El material fino que se sedimenta al fondo de la bandeja se extrae con una cuchareta, sin embargo, debido a la gran cantidad de material fino que se encuentra en suspensión el agua de lavado no se puede desechar.

Para extraer el suelo del agua de lavado la norma ASTM D4318-00 indica varios métodos: exponer a corrientes de aire a temperatura ambiente, exponer a corrientes de aire caliente, decantando agua limpia que se encuentre cercana a la superficie, filtrando en un colador, entre otros. En este caso al contar con hornos de convección de temperatura regulable se utilizó una corriente de aire caliente a una temperatura de 35°C para eliminar el exceso de agua, como se observa en la figura 25.



Figura 25: Eliminación del exceso de agua del suelo de acuerdo a ASTM D4318-00.

3.6 Paso 6: Límite Líquido por proceso de la Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración

En la norma ASTM D4318-00 el suelo se lleva a una humedad aproximada a la humedad del Límite Líquido, al colocarlo en una copa y mezclándolo con agua hasta que la consistencia permita que el ranurado se cierre por una longitud de 13 mm con 25 a 35 caídas de la copa. En la norma BS 1377-2:1990 se pide que se utilice una placa de vidrio en la cual el suelo será mezclado con agua para que tenga una consistencia homogénea hasta que la penetración con el cono sea de aproximadamente 15 mm, el mezclado se debe realizar por un periodo de 10 minutos.

Para los ensayos tanto de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración se procederá a utilizar una copa de goma para mezclar el suelo con agua hasta llevarlo a la consistencia necesaria para los requerimientos de cada norma como se aprecia en la figura 26. Para asegurar que el suelo sea tan homogéneo como sea posible se procederá a mezclar por un periodo mayor a 20 minutos y comprobando de forma visual y dactilar que el suelo no tenga grumos o masas de diferente consistencia.



Figura 26: Mezclado y homogenización del suelo según las normas ASTM D4318-00 y BS 1377-2:1990.

3.6.1 Procedimiento Cuchara de Casagrande

Como se ve en la figura 27 el suelo se coloca en la cuchara enrasando la superficie hasta que ésta se encuentra lo más horizontal posible y procurando que no existan burbujas de aire atrapadas en el suelo, al mismo tiempo se cuida que la profundidad del suelo en la parte más profunda de la cuchara sea de aproximadamente 10 mm.



Figura 27: Suelo colocado en la Cuchara de Casagrande.

Posteriormente, se realizará una ranura por la mitad del suelo como se ve en la figura 28. Una vez realizado el ranurado se procede a dar manivela a la Cuchara de Casagrande para que se levante y deje caer la cuchara a un ritmo de entre 1.9 y 2.1 golpes por segundo con la superficie dura hasta que ambos lados del suelo se desplacen hacia el interior del ranurado y se junten en una longitud de 13 mm.

Cuando el suelo se haya juntado 13 mm se procede a anotar el número N de caídas necesario para que se haya juntado los 13 mm y se procederá a tomar una muestra de masa mayor a 20 g por lo recomendado en la norma ASTM D2216-10 de la parte en la cual el suelo se unió, esta muestra de suelo se coloca en un contenedor o tara de masa conocida y se lo tapa para que conserve la humedad que contiene al momento del ensayo.



Figura 28: Ranurado del suelo en la Cuchara de Casagrande.

El suelo que sobra después de tomar la muestra debe ser retirado de la Cuchara de Casagrande y colocado en la copa de goma para ser mezclado y homogenizado con un contenido mayor de humedad para repetir el procedimiento dos veces más, siendo así que en el primer ensayo el número de golpes debe estar entre 25 y 35 caídas, en el segundo ensayo el número de golpes debe estar entre 20 y 30 caídas y el tercer ensayo debe estar entre 15 y 25 caídas. Cabe mencionar que entre cada ensayo la copa y el ranurador deben ser lavados y secados.

En las tres muestras de suelo se procede a determinar el contenido de agua del suelo de acuerdo al Método A descrito en la norma ASTM D2216-10. Posteriormente se grafica la relación entre el contenido de humedad y el número de caídas de la Cuchara de Casagrande como un punto donde el contenido de humedad está en las ordenadas y el número de caídas está en las abscisas las cuales tiene escala logarítmica. Con los tres puntos graficados se traza una línea de tendencia lineal obtenida por mínimos cuadrados utilizando las ecuaciones 4 y 5.

En la figura 29 se puede ver los tres puntos graficados y la línea recta que mejor se adapta a los puntos, el Límite Líquido se obtiene al trazar una recta vertical desde el valor de 25 golpes en la abscisa hasta cruzarse con la línea de tendencia. En el punto donde se unen las dos rectas se traza una tercera recta horizontal hasta el eje de las ordenadas, el valor en porcentaje entero que se encuentre en el cruce de la tercera recta y el contenido de humedad es el Límite Líquido del suelo.

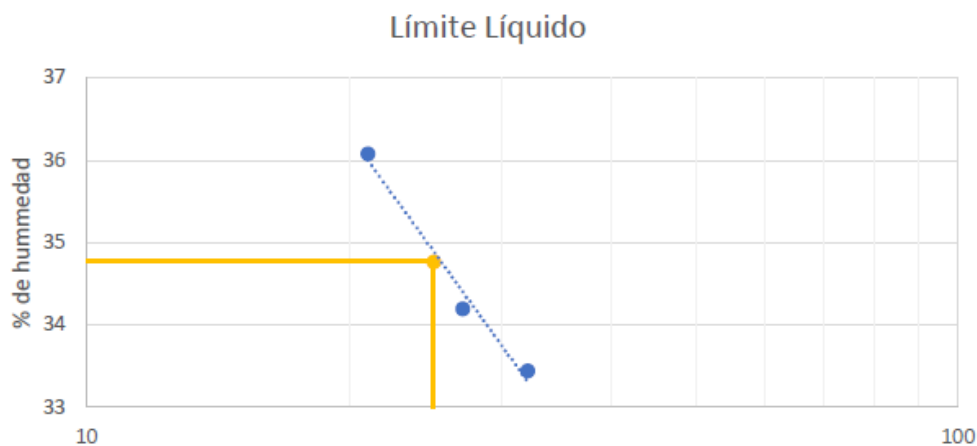


Figura 29: Límite Líquido determinado gráficamente con línea de tendencia lineal.

3.6.2 Procedimiento Cono de Penetración

Para determinar el Límite Líquido con el Cono de Penetración se coloca el suelo en la copa de ensayo con una espátula empujándolo hacia el interior, asegurando que no se atrape burbujas de aire en el suelo, cuando la copa esté llena, se enrasa hasta que quede una superficie homogénea y pareja como se ve en la figura 30.



Figura 30: Suelo colocado en la copa de ensayo de Cono de Penetración.

La copa de ensayo se coloca en la base del aparato de penetración para ensayos en materiales bituminosos bajando el cono hasta que roce la superficie del suelo, siendo así que cuando se mueva la copa de ensayo la punta del cono apenas marque la superficie del suelo como se muestra en la figura 31. En esta posición, se toma la medida que presente el dial.



Figura 31: Cono de Penetración apenas en contacto con el suelo.

Posteriormente, accionando el aparato de penetración en materiales bituminosos el Cono de Penetración cae libremente sobre el suelo como se muestra en la figura 32 por un tiempo de 5 ± 1 s, se mide la penetración que el cono ha tenido en el suelo con una resolución de 0.1 mm para luego levantar el Cono de Penetración limpiarlo y reemplazar el suelo que se perdió de la primera penetración con suelo proveniente de la copa de mezclado, después de enrasar el suelo se vuelve

a repetir la caída libre del cono para anotar la segunda penetración con la misma resolución de 0.1 mm.

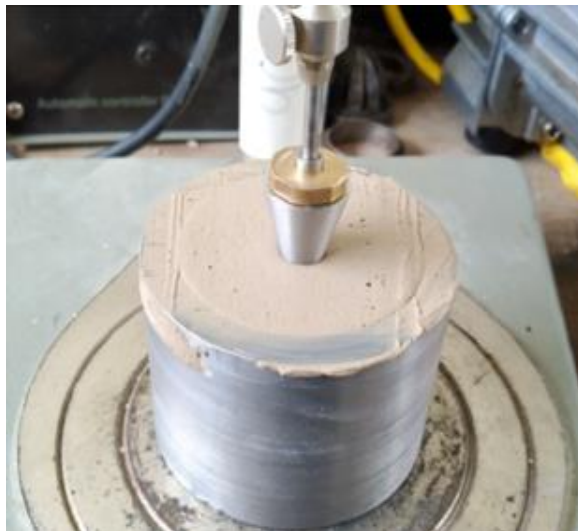


Figura 32: Toma de dato de penetración con caída libre de 5 ± 1 s.

Si la diferencia entre las dos penetraciones es menor a 0.5 mm el ensayo es válido y se toma una muestra de suelo con un peso mínimo de 10 g de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990, sin embargo, se opta por tomar una muestra de aproximadamente 20 g según la norma ASTM 2216-10 debido a la disponibilidad del equipo para realizar la medición de masa. En el caso de que la variación entre las dos penetraciones se encuentre en el rango de 0.5 a 1 mm se procede a realizar una tercera penetración y si entre las tres penetraciones hay una variación máxima de 1 mm el ensayo se considera válido y se extrae una muestra aproximada de 20 g para determinar el contenido de humedad.

La muestra se coloca en un contenedor de masa conocida y cubierta para conservar la humedad del suelo al momento del ensayo, en caso de no ser válido el ensayo el cono se limpia, se retira el suelo de la copa de ensayo, se lava y seca la copa y se vuelve a mezclar y homogenizar el suelo para repetir el ensayo.

Para determinar el Límite Líquido se debe tomar al menos cuatro datos que se encuentren en el rango de 15 a 25 mm de penetración, tomando una muestra de suelo de cada ensayo. Cabe recalcar que el Cono de Penetración debe ser limpiado entre cada penetración y la copa de ensayo debe ser lavada después de obtenerse la muestra de suelo o al repetirse el ensayo.

En las cuatro muestras de suelo se procede a determinar el contenido de agua del suelo de acuerdo al Método A descrito en la norma ASTM D2216-10. Posteriormente, se grafica la relación entre el contenido de humedad y el promedio de las dos o tres penetraciones correspondientes a cada dato de penetración como un punto donde el contenido de humedad está en la abscisa y la penetración promedio en la ordenada.

Con los cuatro puntos graficados se traza una línea de tendencia con mínimos cuadrados utilizando las ecuaciones 4 y 5 en la cual se traza una recta horizontal desde el valor de 20 mm de penetración en la ordenada hasta encontrarse con la línea de tendencia, desde el punto donde se cruzan ambas líneas se traza una recta vertical la cual determina el Límite Líquido en el punto donde se cruza con la abscisa con la humedad del suelo.

En la figura 33 se puede apreciar los 4 puntos graficados, así como la línea de tendencia que mejor se ajusta a estos puntos y la humedad que coincide con la penetración de 20 mm del Cono de Penetración.

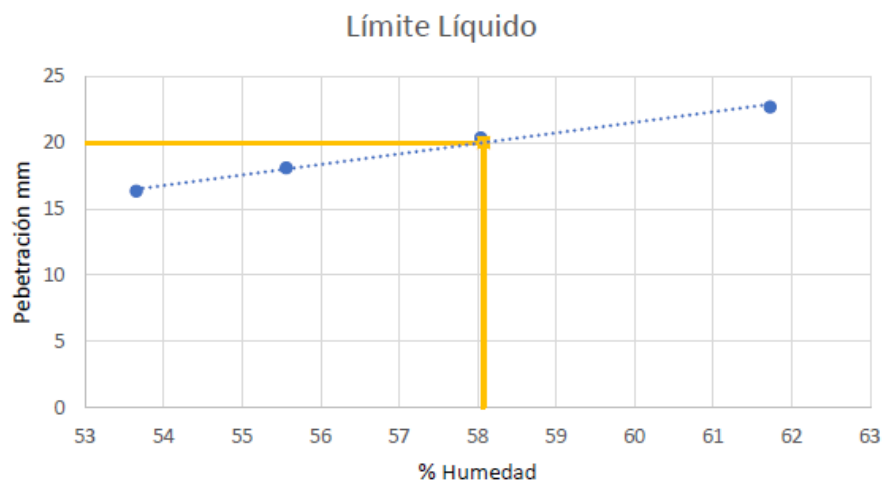


Figura 33: Límite líquido determinado gráficamente con línea de tendencia lineal del Cono de Penetración.

4. Capítulo 4: Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la construcción del Cono de Penetración, el análisis estadístico para determinar el número de ensayos necesario para el análisis de los dos métodos de ensayo y los resultados obtenidos.

4.1 Construcción del Cono de Penetración

El Cono de Penetración construido tiene un peso de 80.11 g como se muestra en la figura 34. El exceso de peso se eliminó a través de un proceso de devastado asegurando que el peso del cono se encuentre en los límites dados por la norma BS 1377-2:1990 de 80.0 ± 0.1 g.



Figura 34: Cono de Penetración construido para este estudio.

Tras haber terminado el proceso de devastado, se procedió a pesar el cono en conjunto con el vástago principal, en la figura 35 se observa que el peso de ambos componentes es de exactamente 80.00 g tal como lo determina la norma BS 1377-2:1990 por lo cual la característica más importante para el correcto funcionamiento del Cono de Penetración se cumple.



Figura 35: Peso del Cono de Penetración en conjunto con el vástago principal.

La longitud del cono es de 35.6 mm longitud que de acuerdo a la norma BS 1377-2:1990 debe ser aproximada por lo cual no tiene mayor importancia. Luego se comprueba el ángulo del cono con un goniómetro dando un resultado $30^{\circ}15'$.

Por último, se comprueba que la punta se encuentre en buen estado antes y después de realizar los ensayos, esto se lo hace al pasar el Cono de Penetración por la placa de comprobación cuyas dimensiones se pueden observar en la figura 10 de tal forma que se pueda sentir la punta de forma dactilar al otro lado de la placa como se observa en la figura 36.



Figura 36: Comprobación punta del Cono de Penetración.

4.2 Descripción del suelo

En el caso del Megaparque Ictorcruz el suelo fue extraído de una profundidad comprendida entre 1.5 a 2.5 m, la zona de la cual se obtuvo la muestra del suelo se encuentra cerca de la construcción principal que aún se encontraba en ejecución al momento de la extracción el 15 de junio del 2018. En la figura 37 se puede observar la zona general de donde se extrajo el suelo.



Figura 37: Construcción del Megaparque Ictorcruz con coordenadas geográficas (-2.928222,-79.002983).

El suelo extraído del Megaparque Ictorcruz, denominado "Suelo 1" se muestra en la figura 38 y se describe: el olor como de suelo común húmedo, aunque se puede observar la presencia de raíces secas, el suelo se encuentra en un estado húmedo, de una consistencia firme, de cementación débil, con un rango de tamaño de partículas de arcillas y limos hasta arenas, un tamaño máximo de

partículas de 4.75 mm y una resistencia al impacto débil, se encontraron partículas redondeadas y semi redondeadas, tiene un color negro,



Figura 38: Suelo extraído del Megaparque Ictocruz.

En el caso del suelo extraído del Megaparque de la Luz por el avance de la obra no se logró recuperar el suelo insitu, sin embargo, existía grandes cantidades de este material que estaba siendo utilizado como relleno en obras complementarias del parque, como se puede apreciar en la figura 39, el suelo se extrajo el 20 de julio del 2018.



Figura 39: Construcción del Megaparque de la Luz con coordenadas geográficas (-2.878952,-78.992872).

El suelo extraído del Megaparque de la Luz denominado "Suelo 2" en la figura 40 se describe como: se encontraron partículas angulares que están formadas por arcillas consolidadas, tiene un color café verdoso, el olor es de suelo común húmedo, el suelo se encuentra en un estado húmedo, de una consistencia suave, de cementación fuerte de algunas partículas de arcilla consolidada y demás partículas cementación débil, con un rango de tamaño de partículas de arcillas y limos hasta partículas de arcilla consolidada de tamaño de gravas, un tamaño máximo de partículas de 4.75 mm y una resistencia al impacto moderada.



Figura 40: Suelo extraído del Megaparque de la Luz.

En el paso a desnivel para el cruce de estudiantes de la Universidad Católica de Cuenca y población general ubicado en la avenida de las Américas y Humboldt el avance de la obra se puede observar en la figura 41. El suelo se extrajo entre 1.0 a 1.5 m de profundidad insitu el 23 de julio del 2018.



Figura 41: Paso elevado en Américas y Humboldt con coordenadas geográficas (-2.885261, -79.006409).

El suelo extraído del paso elevado denominado “Suelo 3” se aprecia en la figura 42 y se describe como: no se encontraron partículas que se puedan describir con el criterio de angularidad, tiene un color café grisáceo, el olor es de suelo común húmedo, el suelo se encuentra en un estado entre húmedo y saturado, de una consistencia firme, de cementación débil, con un rango de tamaño de partículas de arcillas y limos hasta arenas, un tamaño máximo de partículas de 4.75 mm y una resistencia al impacto muy débil.



Figura 42: Suelo extraído en la construcción de paso elevado en la Av. de las Américas y Humboldt.

4.3 Clasificación del suelo

4.3.1 Suelo 1

El suelo 1 tiene un porcentaje de finos que pasa el tamiz #200 en 69.7% por lo cual se considera un suelo fino, a través del ensayo de Casagrande se obtuvo un Límite Líquido de 52 y un Límite Plástico de 22.

El Índice de Plasticidad se obtiene de la diferencia entre el Límite Líquido y el Límite Plástico siendo este 30. Estas características definen al suelo 1 de acuerdo a la clasificación SUCS como una arcilla de alta plasticidad (CH).

La clasificación del suelo 1 se puede ver a detalle en el Anexo A1.

4.3.2 Suelo 2

El suelo 2 tiene un porcentaje de finos que pasa el tamiz #200 en 74.74% por lo cual se considera un suelo fino, a través del ensayo de Casagrande se obtuvo un Límite Líquido de 41 y un Límite Plástico de 25.

El Índice de Plasticidad es de 16. Estas características definen al suelo 2 de acuerdo a la clasificación SUCS una arcilla de baja plasticidad (CL).

La clasificación del suelo 2 se puede ver a detalle en el Anexo A2.

4.3.3 Suelo 3

El suelo 3 tiene un porcentaje de finos que pasa el tamiz #200 de 87.62% por lo cual se considera un suelo fino, a través del ensayo de Casagrande se obtuvo un Límite Líquido de 35 y un Límite Plástico de 15.

El Índice de Plasticidad es de 20. Estas características definen al suelo 3 de acuerdo a la clasificación SUCS es una arcilla de baja plasticidad (CL).

La clasificación del suelo 3 se puede apreciar a detalle en el Anexo A3.

En la figura 43 se observa la ubicación de los tres suelos en la carta de plasticidad de Atterberg, el suelo 1 se indica como S1, el suelo 2 como S2 y el suelo 3 como S3.

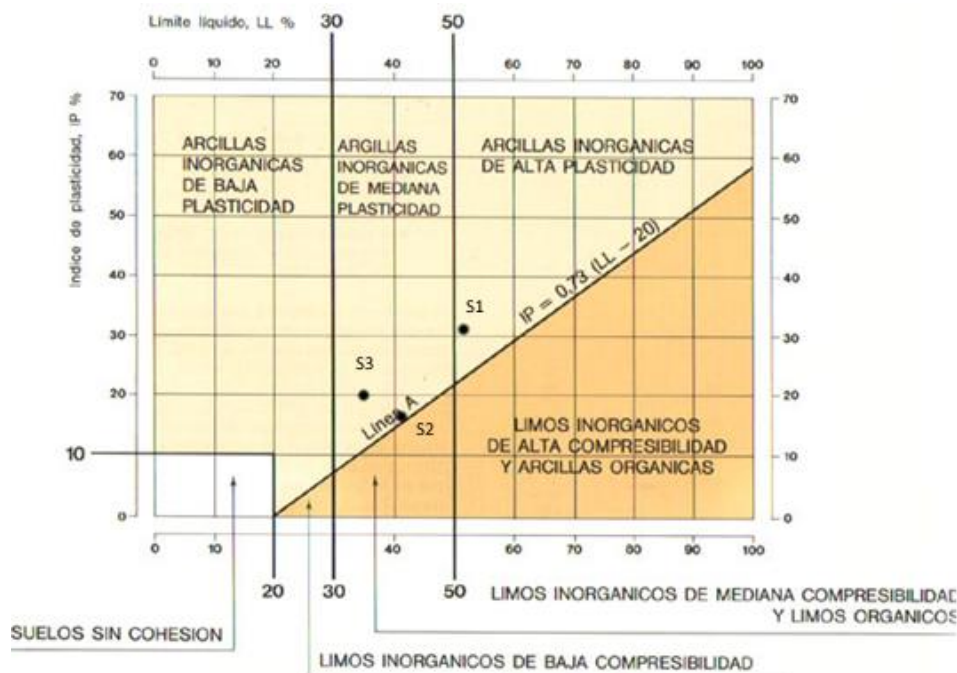


Figura 43: Suelos del presente ensayo en la carta de plasticidad.

4.4 Número de ensayos para la desviación estándar prototipo

Utilizando la ecuación 9 se determina el número de ensayos de Cuchara de Casagrande necesarios para determinar la desviación estándar prototipo. Para esto es necesario determinar los parámetros a utilizar.

4.4.1 Error esperado

El error esperado (E) se obtiene a partir de las variaciones máximas esperadas en dos ensayos realizados por el mismo laboratorista con el mismo equipo y en el menor tiempo posible entre ambos ensayos de Límite Líquido de acuerdo a la ASTM D4318-00, estos valores se pueden apreciar en la columna 4 de la tabla 2, los cuales son: 2 puntos porcentuales para suelos de alta plasticidad y 1 punto porcentual para suelos de baja plasticidad.

4.4.2 Desviación estándar estimada

De igual manera en la columna 6 de la tabla 7 se obtiene una desviación estándar estimada debido a que esta es la mayor desviación estándar que se puede esperar en ensayos realizados por dos laboratoristas sobre un mismo suelo en días diferentes y con equipo diferente de acuerdo a la ASTM D4318-00.

Para suelos de alta plasticidad con un Límite Líquido de 59.9 puntos porcentuales se tiene una desviación estándar de 2.1 puntos porcentuales, siendo esta la desviación estándar estimada para los suelos de alta plasticidad.

En cambio, para suelos de baja plasticidad el Límite Líquido es 33.3 puntos porcentuales mientras que la desviación estándar es de 0.8 puntos porcentuales, la cual es la desviación estándar estimada para suelos de baja plasticidad.

4.4.3 Factor de excedencia del error

De la tabla 6 se escoge un factor de excedencia de 2.56 lo que quiere decir que existe una posibilidad de 10 en 1000 (1%) de que el error esperado sea excedido, este valor se considera adecuado para el proyecto debido a que el contenido de humedad para Límite Líquido del suelo se lee en valores de porcentaje enteros.



4.4.4 Número de ensayos necesario

En la tabla 18 se puede observar el número de ensayos necesario para cada tipo de suelo, en donde: la columna 1 está el suelo, la columna 2 tiene la clasificación SUCS, la columna 3 tiene el error esperado, la columna 4 tiene la desviación estándar estimada, la columna 5 tiene el factor de excedencia y en la columna 6 y 7 están el número de ensayos necesario.

Tabla 18: Número de ensayos necesario para obtención de desviación estándar.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Suelo	Tipo de suelo	Error esperado (puntos porcentuales)	Desviación estándar estimada (puntos porcentuales)	Factor de excedencia	Número de ensayos calculado	Número de ensayos seleccionado
Suelo 1	CH	2	2.1	2.56	7.23	8
Suelo 2	CL	1	0.8	2.56	4.19	5
Suelo 3	CL	1	0.8	2.56	4.19	5

4.5 Resultados de ensayos de Cuchara de Casagrande

En la tabla 19 se presentan los resultados de Límite Líquido de los ensayos con la Cuchara de Casagrande de los suelos 1, 2 y 3 en donde: la columna 1 están los resultados del suelo 1 y su respectivo anexo, en la columna 2 están los resultados del suelo 2 y su respectivo anexo y en la columna 3 están los resultados del suelo 3 y su respectivo anexo.

Tabla 19: Resultados de Límite Líquido con Cuchara de Casagrande.

(1)		(2)		(3)	
LL Suelo 1		LL Suelo 2		LL Suelo 3	
Anexo	Resultado LL	Anexo	Resultado LL	Anexo	Resultado LL
B1	53	C1	40	D1	36
B2	54	C2	42	D2	35
B3	51	C3	41	D3	37
B4	51	C4	41	D4	37
B5	53	C5	40	D5	35
B6	52				
B7	52				
B8	53				

Para apreciar mejor la información se presentan las figuras 44, 45 y 46 en donde las barras muestran el resultado de los ensayos de Casagrande mientras que la línea muestra la frecuencia o el número de ensayos que arrojaron el mismo resultado de Límite Líquido.

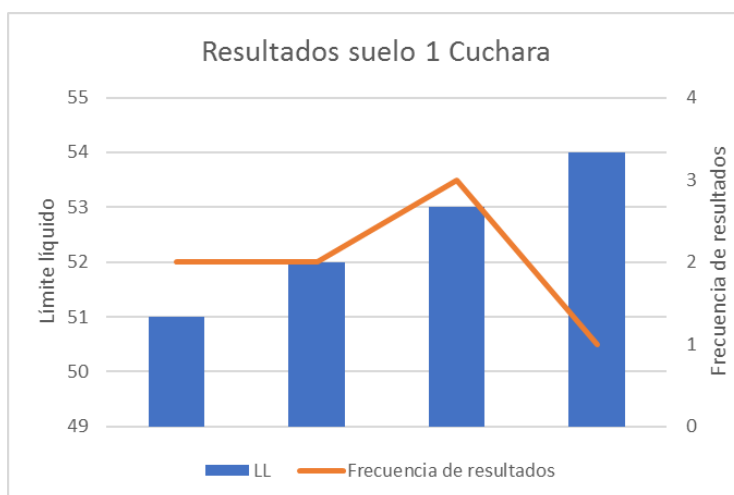


Figura 44: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 1 por método de la Cuchara de Casagrande.

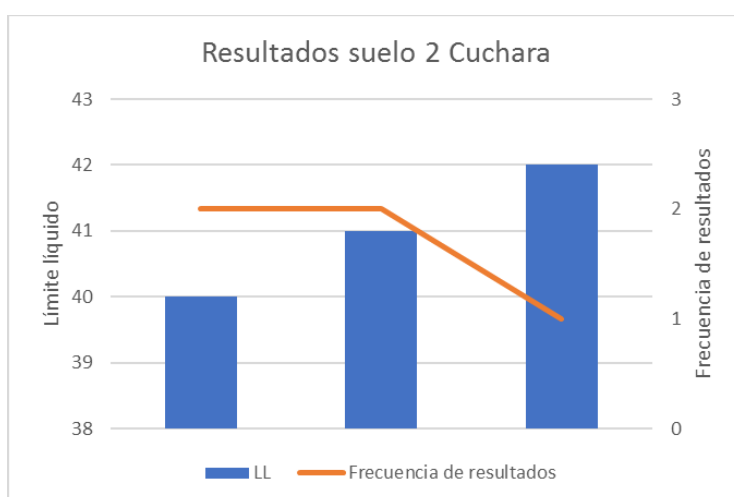


Figura 45: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 2 por método de la Cuchara de Casagrande.

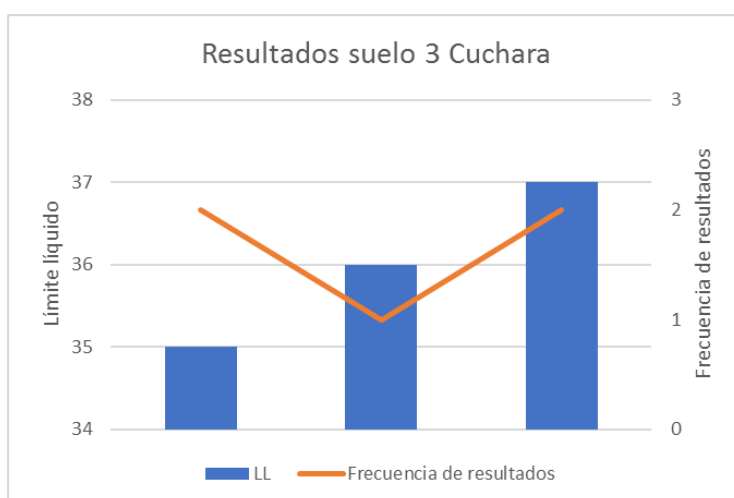


Figura 46: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 3 por método de la Cuchara de Casagrande.



En la tabla 20 se pueden ver los resultados de la media y la desviación estándar de los suelos en los cuales se realizaron los ensayos, utilizando los resultados de Límite Líquido de múltiples ensayos sobre cada suelo que se pueden ver en la tabla 19 en donde: en la columna 1 está la designación del suelo, la columna 2 está la media, la columna 3 está la variación de los resultados y la columna 4 tiene la desviación estándar.

Tabla 20: Resultados estadísticos de los ensayos de Casagrande.

(1)	(2)	(3)	(4)
Suelos	Media (puntos porcentuales)	Variación resultados (puntos porcentuales)	Desviación estándar (puntos porcentuales)
Suelo 1	52.38	+1.62 -1.38	1.061
Suelo 2	40.80	+1.20 -0.80	0.837
Suelo 3	36.00	+1.00 -1.00	1.000

4.6 Dimensionamiento del tamaño muestral de ensayos con Cono de Penetración

Para dimensionar el tamaño muestral se utiliza la ecuación 10 con los siguientes datos:

4.6.1 Desviación estándar del grupo de control o prototipo

Esta desviación se obtiene de los ensayos de Cuchara de Casagrande realizados: suelo 1 (1.061), suelo 2 (0.837) y suelos 3 (1.000). Estos resultados se pueden apreciar en la columna 3 de la tabla 20.

4.6.2 La diferencia mínima que se desea detectar

De la tabla 2 en la columna 4 la variación permisible máxima para suelos finos realizados con la Cuchara de Casagrande por el mismo laboratorista, con el mismo equipo y en el menor tiempo posible es 2 puntos porcentuales para suelos de alta plasticidad y 1 punto porcentual para suelos de baja plasticidad, por lo cual se decidió que la diferencia mínima detectable entre los ensayos con el Cono de Penetración y la Cuchara de Casagrande sea de 2 puntos porcentuales.

4.6.3 Riesgo aceptable

En la tabla 4 que tiene los resultados de ensayos comparativos entre Cono de Penetración y Casagrande se puede observar que los resultados de ensayos de Cono de Penetración pueden ser mayores o menores que los de Cuchara de Casagrande, por lo tanto, de la tabla 8 se optó por escoger el valor de 1.96 correspondiente a un riesgo aceptable del 5% para test bilateral, lo que quiere decir que existe la posibilidad de que se presente un error en 1 de 20 ensayos comparativos.

4.6.4 Poder estadístico de detección

Debido a que en este caso se conoce los parámetros de la muestra prototipo se determinó el poder estadístico de detección utilizando la ecuación 11.

Suelo 1

$$Z_{\beta} = \sqrt{\frac{8}{2}} * \frac{2}{1.06} - 1.96 = 1.81$$

Suelo 2

$$Z_{\beta} = \sqrt{\frac{5}{2}} * \frac{2}{0.84} - 1.96 = 1.54$$



Suelo 3

$$Z_{\beta} = \sqrt{\frac{5}{2}} * \frac{2}{1} - 1.96 = 1.20$$

Estos valores nos indican que en el suelo 1 el poder estadístico de detección esta sobre el 96%, mientras que en el suelo 2 es del 93.5% y en el suelo 3 es del 88.33%.

4.6.5 Número de ensayos de Cono de Penetración necesarios

En la tabla 21 se ve el número de ensayos necesarios en donde: la columna 1 está el suelo, la columna 2 tiene la desviación estándar prototipo, la columna 3 la diferencia mínima que se desea detectar, en la columna 4 el valor correspondiente al riesgo aceptable, en la columna 5 el valor correspondiente al poder estadístico de detección y en la columna 6 el número de ensayos necesario.

Tabla 21: *Número de ensayos necesario para detectar diferencias entre ambos métodos de ensayo.*

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Suelo	Desviación estándar de control	Diferencia a detectar	Riesgo aceptable	Poder estadístico de detección	Número de ensayos
Suelo 1	1.061	2	1.96	1.81	8
Suelo 2	0.840	2	1.96	1.54	5
Suelo 3	1.000	2	1.96	1.20	5

4.6.6 Resultados de ensayos de Cono de Penetración

En la tabla 22 se puede observar los resultados de Límite Líquido de los ensayos de Cono de Penetración de los suelos 1, 2 y 3 en donde: la columna 1 es el número de ensayo, en la columna 2 están los resultados del suelo 1, en la columna 3 están los resultados del suelo 2 y en la columna 4 están los resultados del suelo 3.

Tabla 22: *Resultados de Límite Líquido de Cono de Penetración.*

(1)		(2)		(3)	
LL Suelo 1		LL Suelo 2		LL Suelo 3	
Anexo	Resultado	Anexo	Resultado	Anexo	Resultado
E1	58	F1	50	G1	45
E2	59	F2	50	G2	45
E3	58	F3	49	G3	45
E4	58	F4	49	G4	45
E5	58	F5	50	G5	45
E6	58				
E7	56				
E8	56				

A continuación, se presentan las figuras 47, 48 y 49 en donde se puede ver con mayor claridad los resultados obtenidos y la respectiva frecuencia de los mismos.



Figura 47: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 1 por método de la Cono de Penetración.

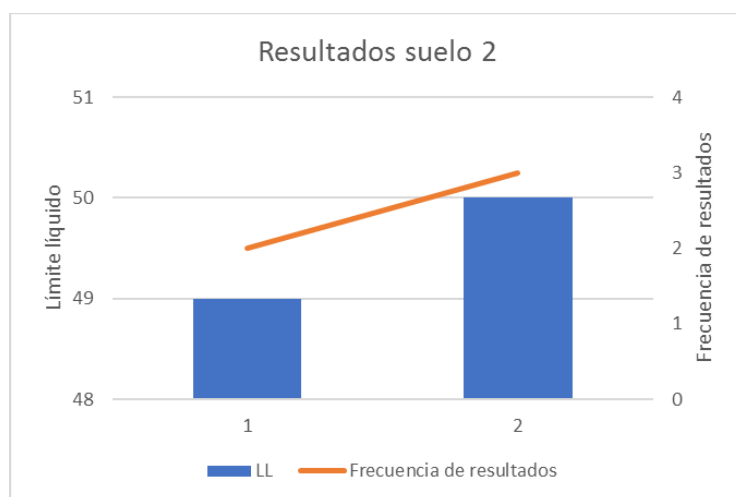


Figura 48: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 2 por método de la Cono de Penetración.

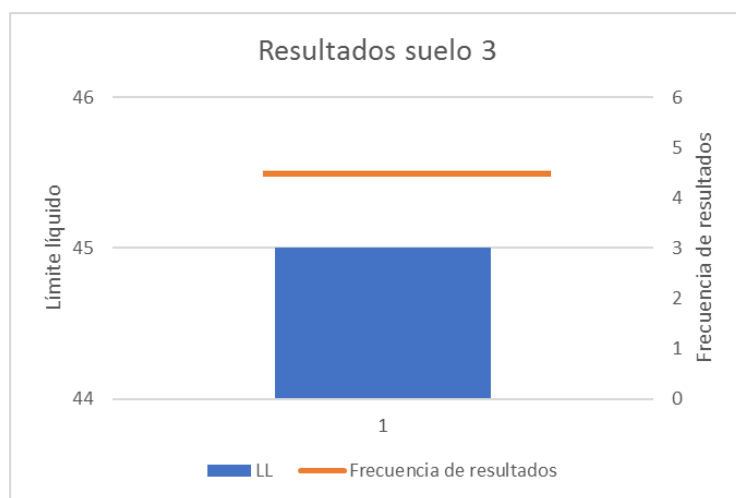


Figura 49: Resultados de ensayos y frecuencia del suelo 3 por método de la Cono de Penetración.



En la tabla 23 se puede apreciar los resultados de la media y la desviación estándar de los suelos en los cuales se realizaron los ensayos, utilizando los resultados de Límite Líquido por el método de Cono de Penetración de la tabla 22, en la tabla 23: la columna 1 el suelo, la columna 2 la media y la columna 3 tiene la variación de los datos y la columna 4 presenta la desviación estándar.

Tabla 23: Resultados estadísticos de los ensayos de Cono de Penetración.

(1)	(2)	(3)	(4)
Suelos	Media (puntos porcentuales)	Variación resultados (puntos porcentuales)	Desviación estándar (puntos porcentuales)
Suelo 1	57.63	+1.37 -1.63	1.061
Suelo 2	49.60	+0.40 -0.60	0.548
Suelo 3	45.00	±0.00	0.000

4.7 Análisis de los resultados

4.7.1 Resultados Cuchara de Casagrande

La variación que presentan los resultados de los ensayos realizados con la Cuchara de Casagrande con respecto a su media es de:

+1.62 y -1.38 puntos porcentuales para el suelo 1, este rango se encuentra dentro del rango de variación permisible de 2 puntos porcentuales para ensayos realizados por el mismo laboratorista en de acuerdo a la norma ASTM D4318-00.

El suelo 2 presenta una variación en +1.20 y -0.80 puntos porcentuales, este rango es superior a la variación máxima permitida de 1 punto porcentual de acuerdo a la norma ASTM D4318-00 para suelos de baja plasticidad realizados por el mismo laboratorista en igualdad de condiciones.

El suelo 3 presenta una variación de ± 1 punto porcentual, variación permitida por la norma ASTM D4318-00 para suelos de baja plasticidad realizados por el mismo laboratorista en igualdad de condiciones.

Se aprecia que la desviación estándar es similar para los tres suelos, siendo el valor más elevado la desviación estándar del suelo 1 que es un suelo de alta plasticidad con 1.061 puntos porcentuales, la desviación estándar del suelo 2 es la menor con 0.837 puntos porcentuales y la desviación estándar del suelo 3 es 1.00, muy cercana a la desviación estándar del suelo 1 a pesar de ser un suelo de baja plasticidad

4.7.2 Resultados del Cono de Penetración

Se puede observar la variación que presentan de acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 23 los cuales son:

El suelo 1 presenta una variación +1.37 y -1.63 puntos porcentuales con respecto a la media, valores que se encuentran por debajo del rango de variación máximo de 2 puntos porcentuales para suelos de alta plasticidad permitido en ensayos realizados por el mismo laboratorista bajo las mismas condiciones de acuerdo a la norma ASTM D4318-00.

El suelo 2 presenta una variación +0.40 y -0.60 puntos porcentuales, valores que son significativamente menores al máximo rango de variación de 1 punto porcentual para suelos de baja plasticidad con ensayos realizados por el mismo laboratorista bajo las mismas condiciones de acuerdo a la norma ASTM D4318-00.

Por último el suelo 3 no presenta variación en sus resultados.



4.7.3 Resultados desviación estándar Cono de Penetración

La desviación estándar del suelo 1 (1.061 puntos porcentuales) es mayor a la desviación estándar obtenida en resultados de ensayos con Cuchara de Casagrande realizados por triplicado por un solo laboratorista en igualdad de condiciones de acuerdo a la norma ASTM D4318-00 en la columna 3 de la tabla 2 que es 0.7 puntos porcentuales.

La desviación estándar del suelo 2 (0.548 puntos porcentuales) es mayor que la desviación estándar de un suelo de baja plasticidad obtenida por ASTM D4318-00 para ensayos realizados por triplicado por un mismo laboratorista en la columna 3 de la tabla 2 que es 0.3 puntos porcentuales. La razón de estos resultados se puede deber a que el suelo 2 en particular tiene características que lo ubican en el límite entre un suelo arcilloso y limoso como se puede observar en la sección 4.3.1

Con ensayos de Cono de Penetración la desviación estándar del suelo 3 (0.0 puntos porcentuales) es menor a la desviaciones estándar de ensayos por triplicado que se realizan en un mismo laboratorio realizados por la ASTM D4318-00 que se pueden apreciar en la columna 3 de la tabla 2 siendo 0.3 puntos porcentuales para suelos de baja plasticidad.

Se puede apreciar que únicamente la desviación estándar del suelo 1 con el Cono de Penetración es igual a la desviación estándar por el método de Casagrande mientras que en los suelos 2 y 3 la desviación estándar con el cono es menor que con la cuchara, la desviación del suelo 1 se debe a los resultados de los ensayos que se pueden ver en los anexos E7 y E8 que dan resultados de 56 puntos porcentuales en el Límite Líquido mientras los demás resultados son de 58 y 59 puntos porcentuales.

Al analizar los resultados del suelo 1 que se pueden ver en el anexo E, no se encuentra una explicación en cuanto a la variación que se pueda relacionar a la penetración del primer y último dato de humedad del suelo, que según la norma BS 1377-2:1990 debe ser entre 15 y 25 mm. Esto es debido a que igual que el suelo 3 cuyos resultados se pueden ver en el anexo G, el primero y últimos datos de humedad tienen una penetración del cono muy variable.

Por el contrario el suelo 2 cuyos resultados se pueden apreciar en el anexo F, muestra una relación directa en cuanto a los resultados de Límite Líquido y el primer dato de humedad, ya que para los resultados de 49 puntos porcentuales la primera penetración se fue en promedio de 14.67 mm y los resultados de 50 puntos porcentuales tuvieron un primer dato de humedad a una penetración promedio de 16.43 mm.

4.7.4 Comparación de medias por ambos métodos de ensayo

En la tabla 24 se presenta el análisis de los dos métodos de ensayo en donde: en la columna 1 está el suelo analizado, en la columna 2 el valor medio de Límite Líquido de Casagrande, en la columna 3 el valor medio de Límite Líquido por Cono de Penetración, en la columna 4 la diferencia entre ambos métodos en y la columna 5 está la diferencia en porcentaje.

Tabla 24: Comparación de resultados entre Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Suelo	LL Casagrande medio (ASTM D4318-00)	LL Cono medio (BS 1377-2:1990)	Diferencia (puntos porcentuales)	Diferencia (%)
Suelo 1	52	58	6	11.54
Suelo 2	41	50	9	21.95
Suelo 3	36	45	9	25.00

En la tabla 1 y 4 existe un precedente de la variación que se puede encontrar en estudios comparativos entre Casagrande y Cono de Penetración sobre el mismo suelo. En la tabla 25 se puede ver la diferencia máxima entre ambos métodos de ensayo para suelos de alta y baja plasticidad de acuerdo a los autores Belviso (1985) y Rabat Blázquez (2016) en donde: en la

columna 1 está el autor del estudio, en la columna 2 está la variación máxima y mínima para suelos de baja plasticidad y en la columna 3 está la variación máxima y mínima para suelos de alta plasticidad.

Tabla 25: Variaciones en estudios previos y actual entre método de Casagrande y Cono de Penetración.

(1)	(2)		(3)	
Autor estudio	Máxima variación suelos de baja plasticidad. (puntos porcentuales)		Máxima variación suelos de alta plasticidad. (puntos porcentuales)	
	Variación (%)	Variación (puntos porcentuales)	Variación (%)	Variación (puntos porcentuales)
Estudio presente	25.00	9	11.54	6
Belviso (1985)	11.00	15.5	13.30	10
Blázquez (2016)	8.80	2.5	1.940	1.2
	Mínima variación suelos de baja plasticidad		Mínima variación suelos de alta plasticidad.	
Belviso (1985)	0.00	0.00	0.00	0.00
Blázquez (2016)	0.42	0.10	-	-

Como se puede observar en la tabla 25, al igual que las tablas 1 y 4 no existe una tendencia en la variación de los resultados entre Casagrande y Cono de Penetración que se pueda relacionar claramente a la plasticidad del suelo. Cada suelo presenta una variación propia en cuanto a los resultados por ambos métodos que depende de la composición del suelo, así como de sus propiedades mecánicas. Aun así, se puede observar que la tendencia de los suelos de baja plasticidad en este estudio es tener una mayor variación en porcentaje en sus resultados.

4.7.5 Correlación entre métodos de ensayo

Se procede a obtener una correlación entre los métodos de ensayo al graficar los resultados de cada suelo como un punto de cada suelo en donde el dato obtenido a través del ensayo de Cuchara de Casagrande es la abscisa y el dato obtenido a través del Cono de Penetración es la ordenada. En la figura 50 están los puntos, así como la línea de tendencia obtenida con una regresión lineal.

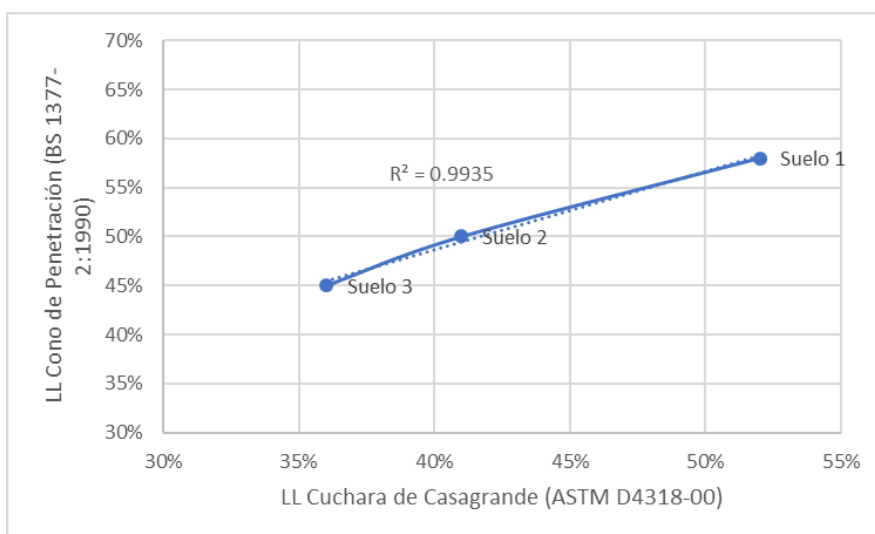


Figura 50: Correlación de ensayos de Cuchara de Casagrande y Cono de Penetración.

De la regresión lineal por mínimos cuadrados se obtiene el valor $a=0.7985$ y el valor $b=16.664$ que representa la correlación entre ambos métodos de ensayo. (Ecuación 13)

$$LL_{CONO} = 0.7985 * LL_{CUCHARA} + 16.664$$

Ecuación 13: Correlación métodos de Casagrande y Cono de Penetración para Límite Líquido.

La correlación tiene un coeficiente de correlación de 99.35%, lo cual indica una alta relación.

En la figura 51 se puede apreciar las correlaciones dadas por distintos autores para el rango de Límite Líquido de los suelos sobre los cuales se realizó el estudio, así como la correlación de la ecuación 13.

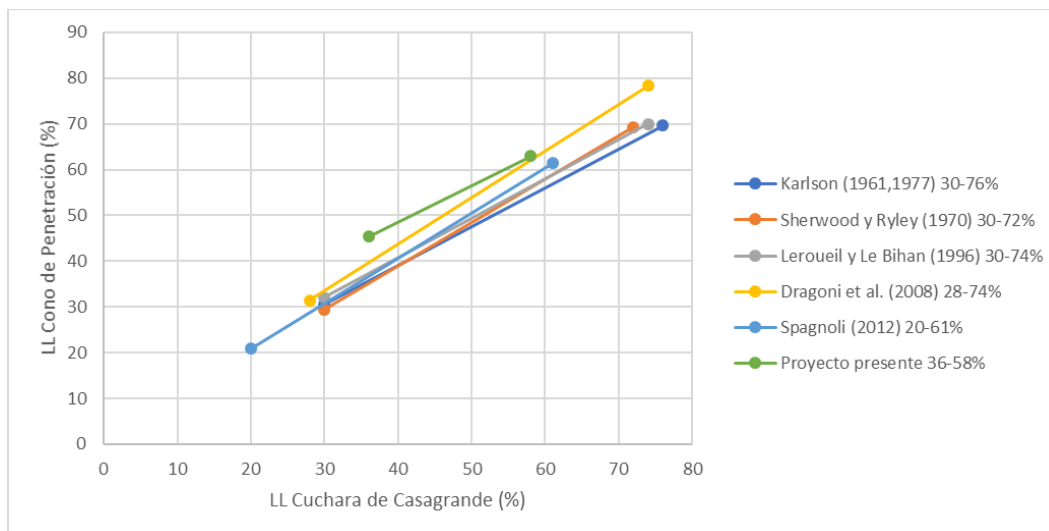


Figura 51: Comparación entre correlaciones de varios autores y la correlación del presente proyecto.

De las líneas de tendencia de distintos autores, se puede ver que la línea de tendencia correspondiente a la correlación obtenida en el presente proyecto presentará valores mayores de Cono de Penetración en relación a Casagrande conforme menor sea el Límite Líquido, por el contrario, cuanto mayor sea el Límite Líquido menor será la diferencia entre los resultados obtenidos por el método de Casagrande y Cono de Penetración.

También, se puede ver que el rango de valores de Límite Líquido para los cuales la correlación obtenida en el presente proyecto es pequeña en comparación con las correlaciones obtenidas por otros autores. Aspecto a tomar en cuenta para futuros estudios.



5. Conclusiones

En la actualidad el método más utilizado para la obtención del Límite Líquido es la Cuchara de Casagrande, método que de acuerdo a la norma ASTM D4318-00 tiene una variabilidad en sus resultados cuando los ensayos son realizados por distintos laboratorios. Por el contrario, el Cono de Penetración es un método de ensayo cuyo procedimiento se encuentra estandarizado por la norma BS 1377-2:1990 que a diferencia del método tradicional tiene menor influencia en su procedimiento de ensayo por parte del laboratorista.

Varios autores como Blazquez (2016) o Belviso (1985) entre otros han realizado ensayos comparativos que demuestran la aplicabilidad del cono debido a que presenta pequeñas variaciones frente al método de Casagrande, mientras otros autores como Spagnoli (2012) o Dragoni (2008) entre otros han desarrollado correlaciones para las variaciones entre los resultados de ambos métodos. Se concluye que el Cono de Penetración es un método de ensayo que puede ser utilizado de forma universal al presentar menos variabilidad en sus ensayos en múltiples laboratorios en comparación con el método tradicional de Casagrande, conclusión a la que también llega el autor O'Kelly (2018) en su publicación "Use of fall cones to determine Atterberg limits: a review".

En la región austral del Ecuador no se han realizado estudios de correlación entre ambos métodos, a partir de esta premisa el presente estudio se llevó a cabo. La inexistencia del equipo en la región austral hizo necesario la construcción del mismo.

En la construcción del Cono de Penetración el reto principal fue la incertidumbre en la densidad del material seleccionado (acero Stainless 304). Se concluye que con la utilización de procedimientos computarizados se puede construir un cono de longitud de 35 mm y ángulo de 30° requerido por la norma BS1377-2:1990. Sin embargo, la característica principal del cono que es la masa del mismo por presentar un rango de variabilidad muy pequeño (0.1 g) requirió de un procedimiento adicional de calibración, logrando así la masa exacta requerida por la norma de 80.0 g.

De gran importancia para el presente proyecto también es la selección de los suelos para lo cual fue fundamental la caracterización de los mismos para la realización del proyecto, que tuvo como principal objetivo encontrar suelos de tipo fino (+50% pasa tamiz #200), también fue necesario identificar si los suelos finos eran de alta o baja plasticidad para el correcto dimensionamiento de los tamaños muestrales.

Para obtener el número de ensayos necesarios de Casagrande para obtener una desviación estándar prototipo se utilizó como error permisible el rango de variabilidad entre dos ensayos realizados por el mismo laboratorista con el mismo suelo, en el menor tiempo posible y con el mismo equipo. Para la desviación estándar se utilizó el rango de variabilidad de dos ensayos de Límite Líquido realizados por distintos laboratoristas con equipos diferentes.

Se determinó que el número de ensayos requeridos para cada suelo por el método de Casagrande fue: suelo 1: ocho ensayos, suelo 2: cinco ensayos y suelo 3: cinco ensayos. Este número de ensayos permitió observar la variabilidad en los resultados de Límite Líquido al ser los ensayos realizados por el mismo laboratorista.

También se concluye que los ensayos fueron realizados correctamente ya que la variación en los resultados de +1.62 y -1.38 para el suelo 1 y ± 1 para el suelo 3 está dentro del rango permisible para ensayos realizados por el mismo laboratorista y con el mismo equipo, sin embargo, el suelo 2 presenta una variación de +1.20 y -0.80, variación que es mayor al rango de variación permisible para suelos de baja plasticidad que es ± 1 punto porcentual. Esta variación se explica por el Índice de Plasticidad del suelo (16%) valor que por su Límite Líquido es muy cercano al límite entre suelos arcillosos y limosos por lo cual se esperaría que la variación supere al rango permisible para suelos de baja plasticidad pero sea menor a la variación permisible para suelos de tipo limoso que es 2%..

Los resultados obtenidos por el método del Cono de Penetración: el suelo 2 tiene un rango de variación de +0.40 y -0.60 y el suelo 3 tiene una variación de ± 0.00 en los múltiples ensayos



realizados en el presente proyecto. Rangos que son claramente menores a los rangos de variabilidad permisibles de acuerdo a la norma ASTM D4318-00. También se puede observar que la variación por el método del Cono de Penetración es menor a la variación obtenida por el método de Casagrande en este proyecto.

En la desviación estándar la cual para el suelo 2 es 0.548 y para el suelo 3 es 0.000, desviación estándar que es menor a la desviación estándar obtenida en los mismos suelos por el método de Casagrande en el presente proyecto. Lo que concluye que para suelos de baja plasticidad se espera resultados con menor variación cuando son realizados con el Cono de Penetración.

Por el contrario, el suelo 1 de alta plasticidad tuvo una variación de +1.37 -1.63 que es menor al rango de variación permisible de acuerdo a la ASTM D4318-00 al igual que a la variación de los resultados obtenidos por el método de Casagrande, pero su desviación estándar de 1.061 es igual a la desviación estándar obtenida por el método de Casagrande, estos resultados se deben a dos resultados de Límite Líquido con valor de 56% que se alejan de la moda de resultados de Límite Líquido que es 58%.

Se concluye que a pesar de que los resultados del suelo de alta plasticidad se encuentran dentro del rango de variabilidad, estos podrían obtener una variabilidad y desviación estándar menor al realizarse un mayor número de ensayos que de verificar una moda de 58% en el Límite Líquido podría implicar que existe un error por parte del laboratorista en los dos ensayos con un Límite Líquido de 56% ya sea en la correcta homogenización del suelo así como en la comprobación de la existencia de burbujas de aire en el suelo.

Del análisis de la variación en los ensayos del Cono de Penetración se concluye que los factores que pueden generar variaciones en los resultados de ensayos con el Cono de Penetración son: la existencia de burbujas de aire en el suelo, un suelo con un homogenizado incorrecto y datos tomados fuera del rango de penetración que recomienda la norma BS 1377-2:1990.

La correlación obtenida a partir de las medias de Límite Líquido de cada suelo muestra un alto de 99.35 lo que indica una correcta predicción de correlaciones entre ambos métodos, sin embargo, se concluye que la correlación tiene un alto por el reducido número de ensayos con el cual fue obtenida y el pequeño rango de Límite Líquido de los suelos utilizados para el presente proyecto, por lo que es necesario realizar más ensayos para corroborar dicha correlación.

Basados en los resultados del Cono de Penetración, los rangos de variaciones que se dan en cada suelo y la desviación estándar de los mismos, se concluyen que el método de ensayo del Cono de Penetración con el equipo actual del Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca, es aplicable para la obtención del Límite Líquido



6. Recomendaciones

Se recomienda profundizar en el análisis de la variabilidad de los resultados obtenidos a través de ensayos por el método de Cuchara de Casagrande, ya que las variaciones que se puedan dar en distintos laboratorios representarían un problema en la obtención de datos para estudios y proyectos que dependan de estos resultados.

Se recomienda ampliar el estudio realizado utilizando una mayor cantidad de suelos de distintas zonas del Ecuador para generar una base de datos amplia que se pueda utilizar para validar la ecuación presentada en esta investigación y obtener otras correlaciones para los distintos tipos de suelos.

Se recomienda realizar más ensayos de Cono de Penetración con distintos equipos de penetración para analizar las posibles variaciones en los resultados obtenidos por distintos equipos en distintos laboratorios.

Al realizar futuros ensayos por el método del Cono de Penetración se recomienda tener especial cuidado con la preparación del suelo ya que de no ser homogéneo y tener partículas o grumos con consistencia distinta a la masa principal de suelo. También se debe tener cuidado de evitar las burbujas de aire en la copa de ensayo al momento de colocar el suelo y cumplir con los rangos de penetración impuestos por la norma BS 1377-2:1990 para evitar errores en los resultados de Límite Líquido.



7. Bibliografía

Al-Dahlaki, M. H. and Al-Sharify, G. A. (2008). A proposed approach for plastic limit determination using the drop-cone penetrometer device. *Journal of Engineering and Development*, Vol. 12, No. 1.

ASTM-A580 (2015). Standard Specification for Stainless Steel Wire. ASTM.

ASTM-C117 (1995), Materials Finer than 75- μm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. ASTM

ASTM D2216 (1993). Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. ASTM.

ASTM-D2487 (2000). Classification of soils for engineering purposes (SUCS). ASTM.

ASTM-D2488 (2000). Standard Practice for Description and Identification of Soils (Visual-Manual Procedure). ASTM.

ASTM-D4318 (2005). Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils. ASTM.

ASTM-D4753 (2002). Evaluating, Selecting, and Specifying Balances and Standard Masses for Use in Soil, Rock, and Construction Materials Testing. ASTM.

ASTM-D5 (2006). Penetration of Bituminous Materials. ASTM.

ASTM-E122 (2000). Standard Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for a Characteristic of a Lot or Process. ASTM.

ASTM-E145 (1994). Standard Specification for Gravity-Convection and Forced Ventilation Ovens. ASTM.

ASTM-E177 (2014). Standard Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test METHODS. ASTM.

ASTM-E691 (1999). Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method. ASTM.

Belviso, R., Ciampoli, S., Cotecchia, V., and Federico, A. (1985). Use of the cone penetrometer to determine consistency limits. *Ground Engineering*, Vol. 18, No. 5.

BS1377 (1990). Part 2. Classification test. Determination of the liquid limit. Methods of test for Soils for civil engineering purposes. BS.

Das, B. M. (2001). *Fundamentos de la ingeniería geotécnica*. Thomson Learner.

Di Matteo, L. (2012). Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: Comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, Vol. 71.

Fernández, P. S. (1996). Determinación del tamaño muestral. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo.



Fojtová, L., Marschalko, M., Franeková, R., and Kovár, L. (2009). Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech state standard and newly adopted European standard. *GeoScience Engineering* No 1.

Grønbech, G. L., Nielsen, B. N., and Ibsen, L. B. (2011). Comparison of liquid limit of highly plastic clay by means of Casagrande and fall cone apparatus. In *Proceedings of the Pan American Geotechnical Conference*.

iRestal Group. *Tablas técnicas del acero inoxidable*. iRESTAL GROUP.

Jiménez, S. J. and Alpañés, J. J. (1975). *Geotecnia y Cimientos I Propiedades de los suelos y de las rocas*. (2a Ed.). Rueda.

Kodikara, J. K., Seneviratne, H. N., and Wijayakulasooriya, C. V. (1986). Evaluation of plastic limit and plasticity index by cone penetrometer. In *Proceedings of the Asian Regional Symposium on Geotechnical Problems and Practices in Foundation Engineering*, Vol. 1.

Littleton, I. and Farmilo, M. (1977). Some observations on liquid limit values with reference to penetration and Casagrande tests. *Ground Engineering*, Vol. 10, No. 5.

Álvaro Rabat Blázquez (2016). *Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad*. Master's thesis, Universidad de Alicante.

Mishra, A. K., Ohtsubo, M., L.Y., L., and Higashi, T. (2012). Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method. *Environmental Earth Sciences*, Vol. 65.

Restrepo, D. J. D. (2016). *Metrología Aseguramiento Metrológico Industrial*. Digiprint Editores.

B. C. O'Kelly and P. J. Vardanega and S. K. Haigh (2018). Use of fall cones to determine Atterberg. *Géotechnique* No 10 limits: a review.



8. Anexos.

A1: Clasificación SUCS suelo 1.

A2: Clasificación SUCS suelo 2.

A2: Clasificación SUCS suelo 3.

B1: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B2: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B3: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B4: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B5: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B6: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B7: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

B8: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 1.

C1: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 2.

C2: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 2.

C3: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 2.

C4: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 2.

C5: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 2.

D1: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 3.

D2: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 3.

D3: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 3.

D4: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 3.

D5: Ensayo Límite Líquido por el método de Casagrande, suelo 3.

E1: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E2: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E3: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E4: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E5: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E6: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E7: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

E8: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 1.

F1: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 2.

F2: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 2.

F3: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 2.

F4: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 2.

F5: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 2.

G1: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 3.



G2: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 3.

G3: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 3.

G4: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 3.

G5: Ensayo Límite Líquido por el método de Cono de Penetración, suelo 3.

Anexo: A1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Análisis de ensayo granulométrico

Normas:

ASTM D422-63

Procedencia suelo

Megaparque Ictocruz

Profundidad (m)

1.5-2.0

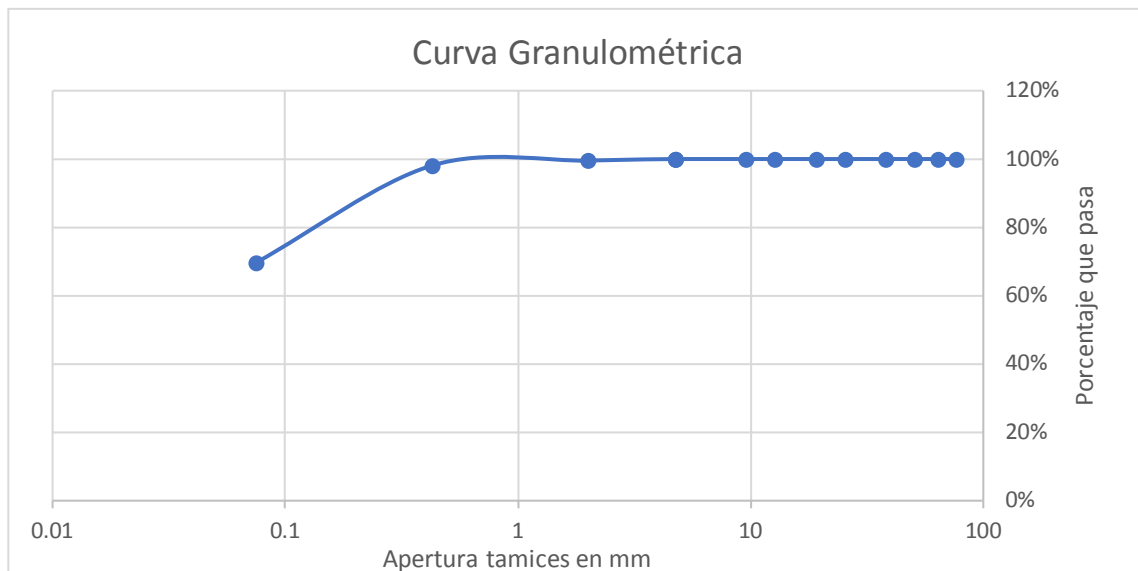
Peso muestra (g)

200

Peso despues lavado (g)

56.7

Tamiz		Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
Pulgadas	mm				
3"	76.2	0	0	0%	100.00%
2 1/2"	63.5	0	0	0%	100.00%
2"	50.8	0	0	0%	100.00%
1 1/2"	38.1	0	0	0%	100.00%
1"	25.4	0	0	0%	100.00%
3/4"	19.05	0	0	0%	100.00%
1/2"	12.7	0	0	0%	100.00%
3/8"	9.525	0	0	0%	100.00%
N° 4	4.75	0	0	0%	100.00%
<N° 4	4.75	-	0	0%	100.00%
N° 10	2	0.9	0.9	0.45%	99.55%
N° 40	0.425	3	3.9	1.95%	98.05%
N° 200	0.075	56.7	60.6	30.30%	69.70%
< N° 200	<0.075	139.4	200	100.00%	

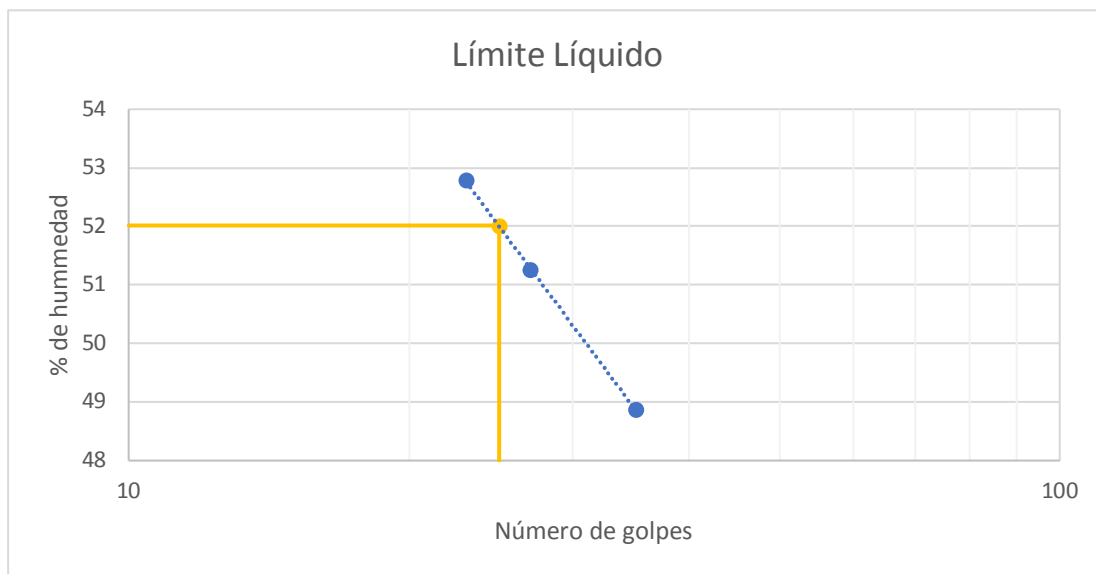


Ensayo Límite Líquido

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
C8	35	72	61.1	38.8	49
A5	27	74.9	64.7	44.8	51
C9	23	77.8	67.4	47.7	53

Ensayo Límite Plástico

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
A4		46.00	49.80	49.10	23%
A8		48.00	51.40	50.80	21%
Promedio humedad		22%			



Límite Líquido	52
Límite Plástico	22
Índice de Plasticidad	30
Recta A con LL	23.36

Clasificación

% Grava	0.00%
% Arena	30.30%
% Finos	69.70%

Clasificación SUCS	CH
	Arcillas de alta plasticidad

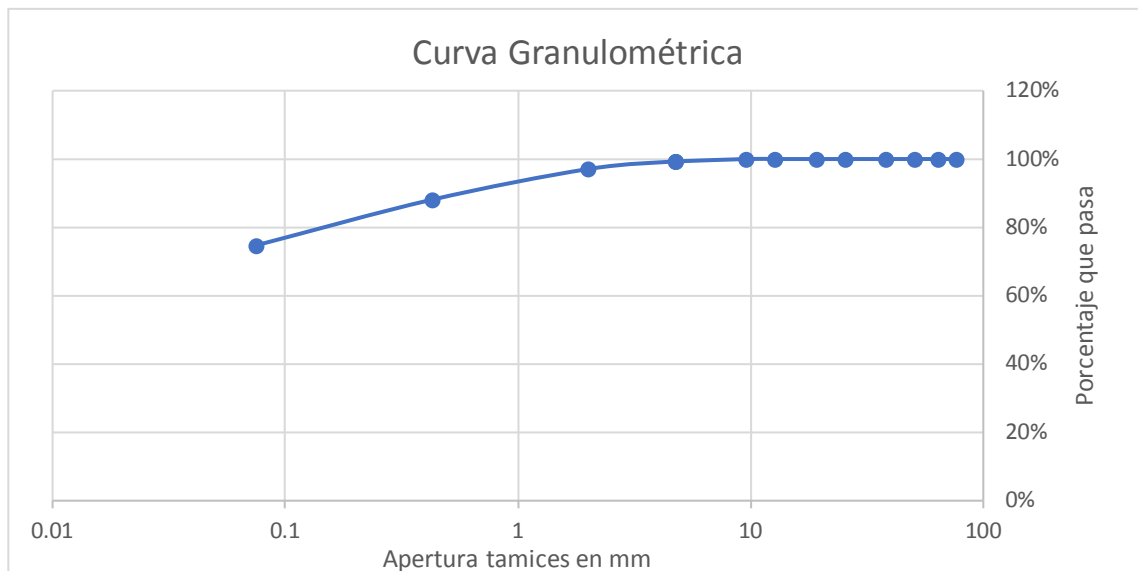
Anexo: A2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Análisis de ensayo granulométrico

Normas: ASTM D422-63
 Procedencia suelo: Megaparque de la Luz
 Profundidad (m): -
 Peso muestra (g): 201.1
 Peso despues lavado (g): 50.8

Tamiz		Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
Pulgadas	mm				
3"	76.2	0	0	0%	100.00%
2 1/2"	63.5	0	0	0%	100.00%
2"	50.8	0	0	0%	100.00%
1 1/2"	38.1	0	0	0%	100.00%
1"	25.4	0	0	0%	100.00%
3/4"	19.05	0	0	0%	100.00%
1/2"	12.7	0	0	0%	100.00%
3/8"	9.525	0	0	0%	100.00%
N° 4	4.75	0	0	0%	99.30%
<N° 4	4.75	1.4	1.4	0.70%	99.30%
N° 10	2	4.5	5.9	2.93%	97.07%
N° 40	0.425	18.1	24	11.93%	88.07%
N° 200	0.075	26.8	50.8	25.26%	74.74%
< N° 200	<0.075	150.3	201.1	100.00%	

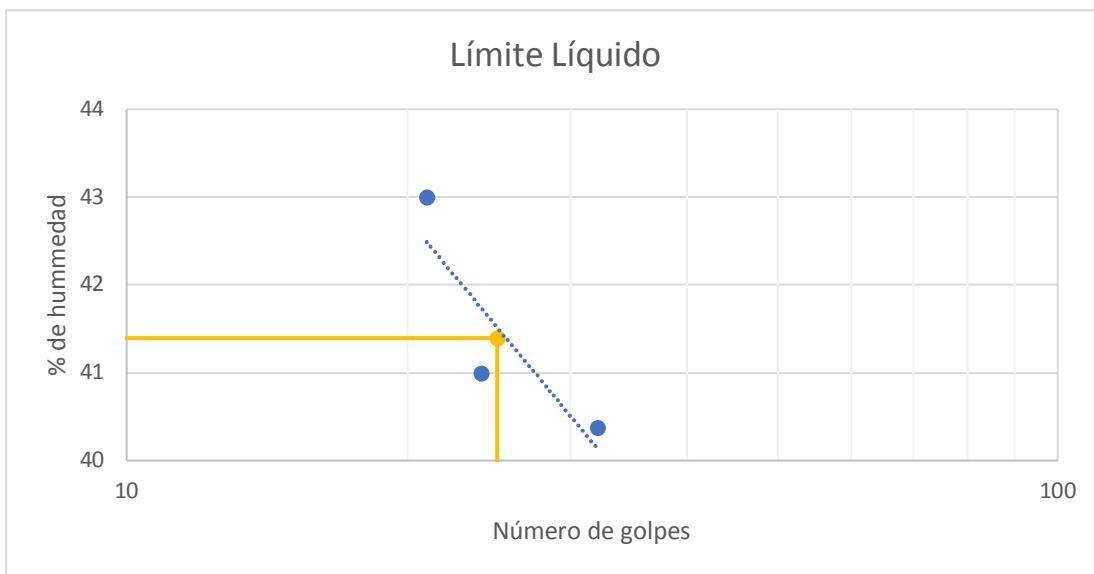


Ensayo Límite Líquido

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
C2	32	48	45.9	40.7	40
C6	24	54	51.5	45.4	41
C9	21	57.3	54.4	47.7	43

Ensayo Límite Plástico

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
A5		47.80	47.20	44.80	25%
C4		43.30	42.80	40.80	25%
Promedio humedad		25%			



Límite Líquido	41
Límite Plástico	25
Índice de Plasticidad	16
Recta A con LL	15.33

Clasificación

% Grava	0.70%
% Arena	24.56%
% Finos	74.74%

Clasificación SUCS	CL
	Arcillas de baja plasticidad

Anexo: A3

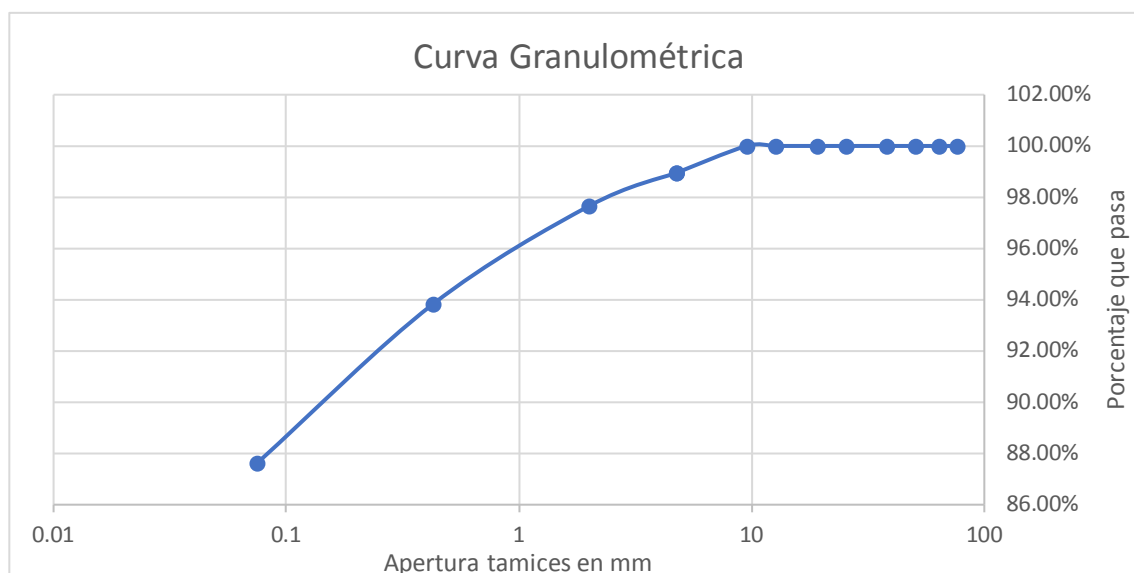
Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Análisis de ensayo granulométrico

Normas: ASTM D422-63

Procedencia suelo Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
 Profundidad (m) 1.0-1.5
 Peso muestra (g) 200.4
 Peso después lavado (g) 24.8

Tamiz		Peso retenido parcial (g)	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Acumulado que pasa
Pulgadas	mm				
3"	76.2	0	0	0%	100.00%
2 1/2"	63.5	0	0	0%	100.00%
2"	50.8	0	0	0%	100.00%
1 1/2"	38.1	0	0	0%	100.00%
1"	25.4	0	0	0%	100.00%
3/4"	19.05	0	0	0%	100.00%
1/2"	12.7	0	0	0%	100.00%
3/8"	9.525	0	0	0%	100.00%
N° 4	4.75	2.1	0	0%	98.95%
<N° 4	4.75	2.1	2.1	1.05%	98.95%
N° 10	2	2.6	4.7	2.35%	97.65%
N° 40	0.425	7.7	12.4	6.19%	93.81%
N° 200	0.075	12.4	24.8	12.38%	87.62%
< N° 200	<0.075	175.6	200.4	100.00%	

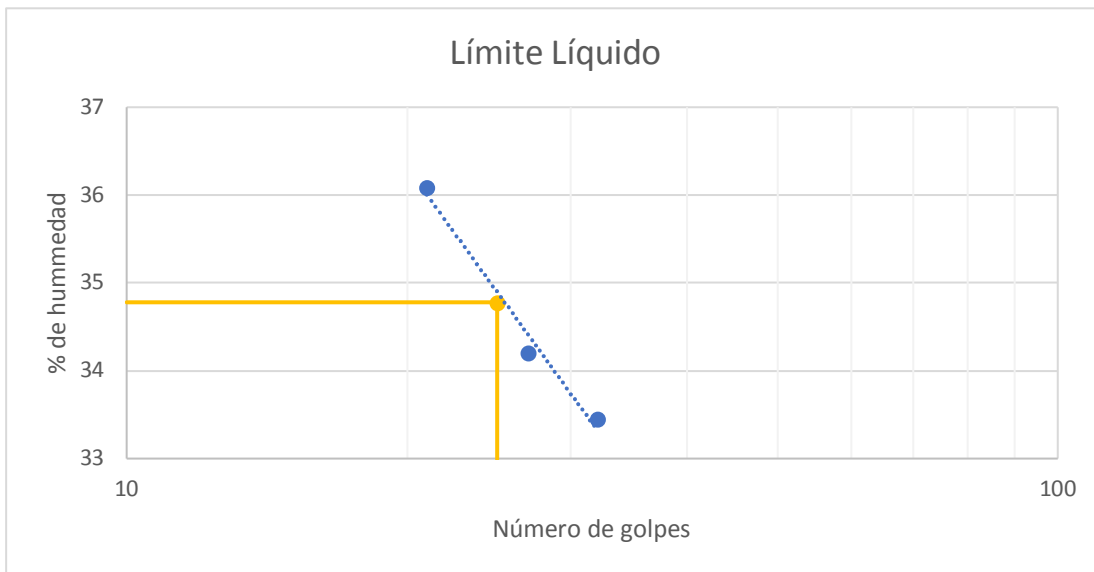


Ensayo Límite Líquido

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
D9	32	81.5	71.9	43.2	33
B8	27	76.5	67.7	42	34
B7	21	73	64.7	41.7	36

Ensayo Límite Plástico

Tara	Num. golpes	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara	Peso tara	% humedad
A3		40.6	40.3	38.3	15%
A1		52.6	52.3	50.3	15%
Promedio humedad		15%			



Límite Líquido	35
Límite Plástico	15
Índice de Plasticidad	20
Recta A con LL	10.95

Clasificación

% Grava	1.05%
% Arena	11.33%
% Finos	87.62%

Clasificación SUCS	CL
	Arcillas de baja plasticidad

Anexo: B1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

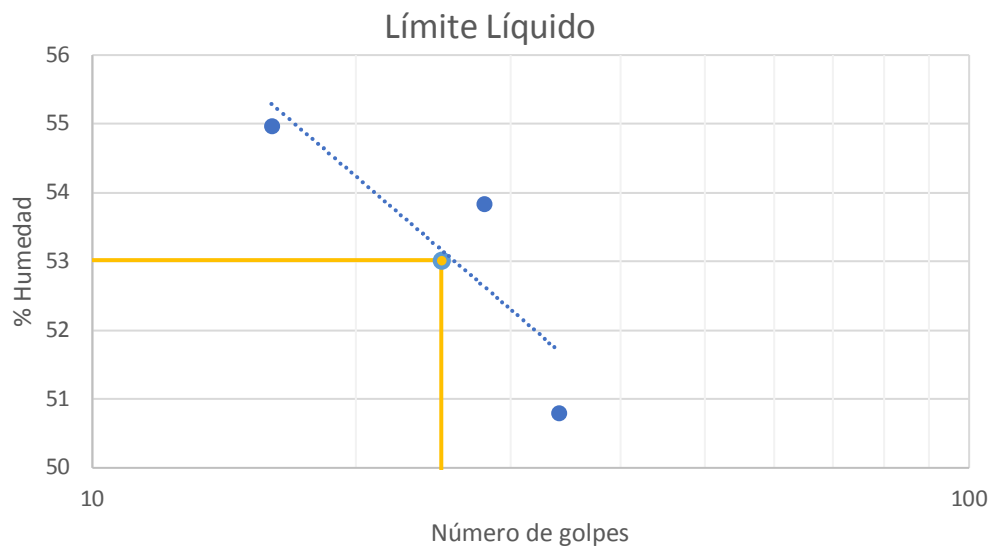
Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas:

ASTM D4318-00
Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C4	34	40.8	69.0	59.5	51
A3	28	38.3	68.3	57.8	54
C3	16	39.9	72.6	61.0	55



Límite Líquido	53
----------------	----

Anexo: B2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

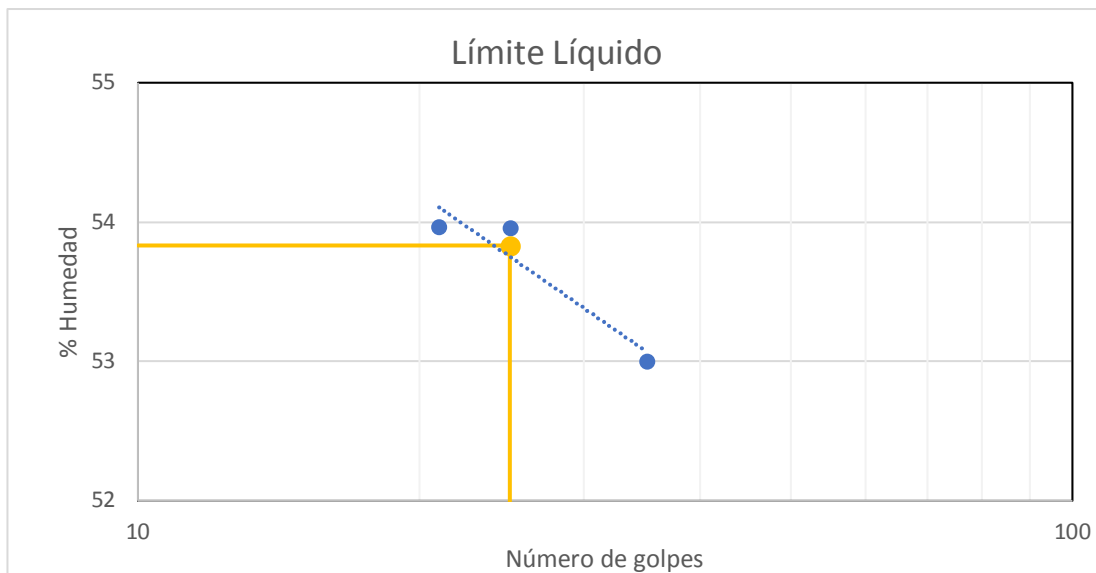
Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas:

ASTM D4318-00
Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C6	35	45.4	76.0	65.4	53
C8	25	38.8	69.9	59.0	54
A5	21	44.8	73.9	63.7	54



Límite Líquido	54
----------------	----

Anexo: B3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

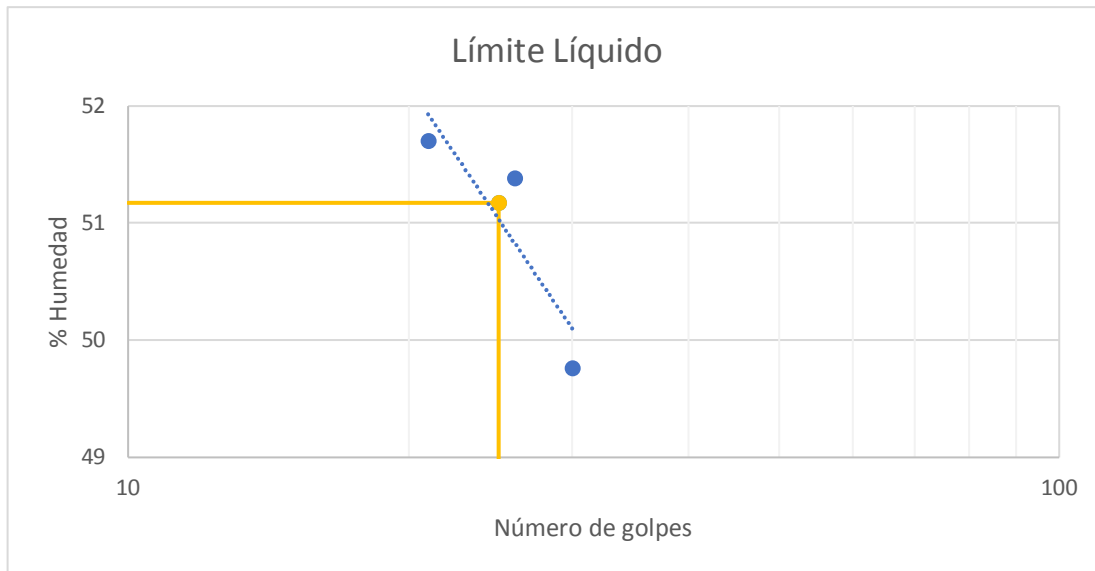
Normas:

ASTM D4318-00

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A6	30	44.7	76.3	65.8	50
C5	26	41.4	74.1	63.0	51
A4	21	46.0	77.1	66.5	52



Límite Líquido	51
----------------	----

Anexo: B4

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

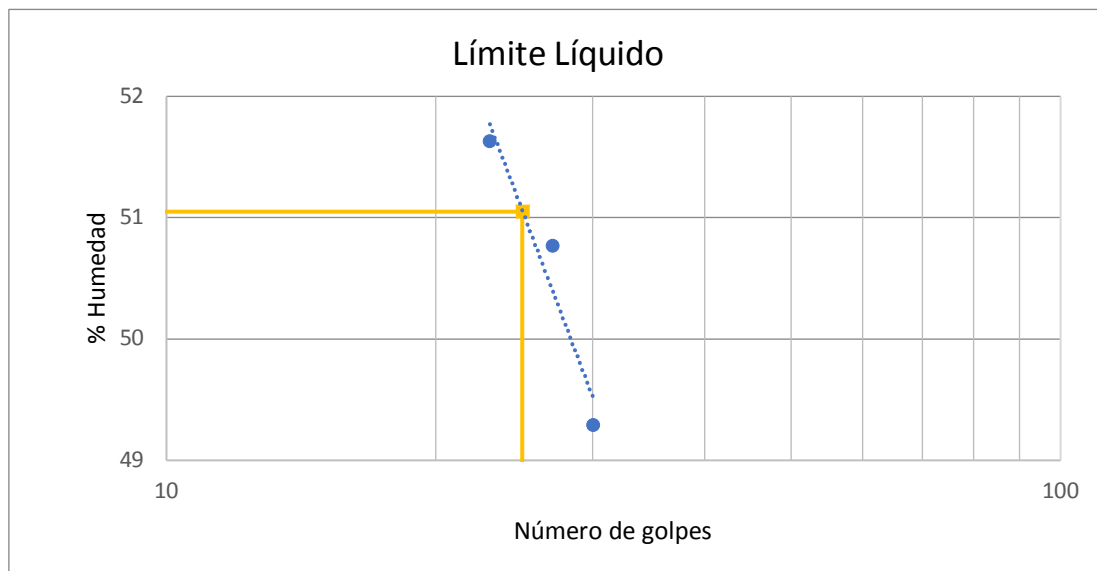
Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas:

ASTM D4318-00
Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A8	30	48.0	79.8	69.3	49
C9	27	47.7	77.1	67.2	51
A1	23	50.3	82.9	71.8	52



Límite Líquido	51
----------------	----

Anexo: B5

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

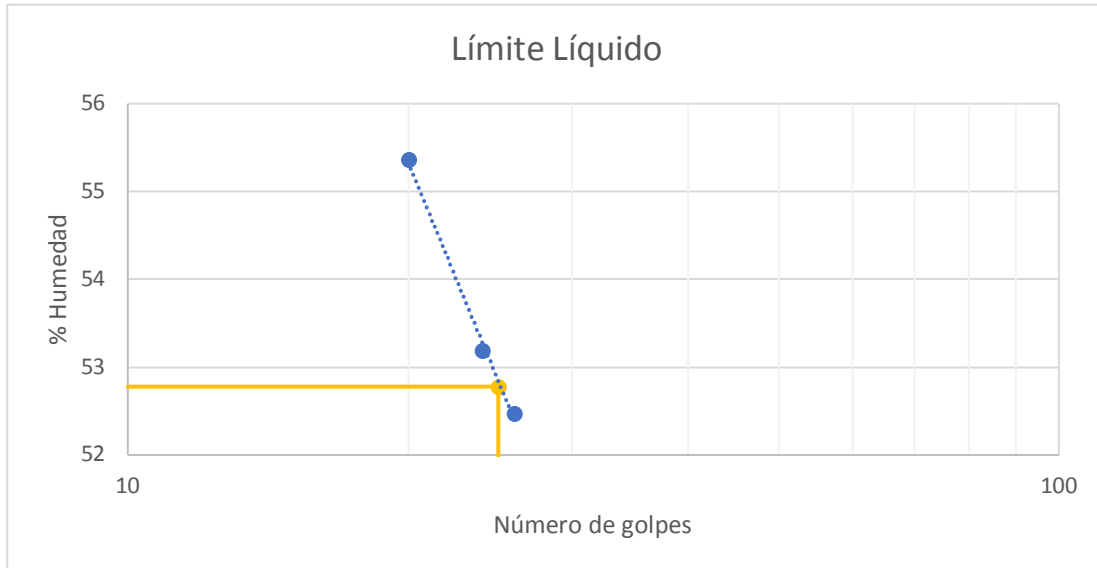
Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas:

ASTM D4318-00
Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A2	26	45.0	75.8	65.2	52
C6	24	45.4	74.2	64.2	53
C4	20	40.8	68.3	58.5	55



Límite Líquido	53
----------------	----

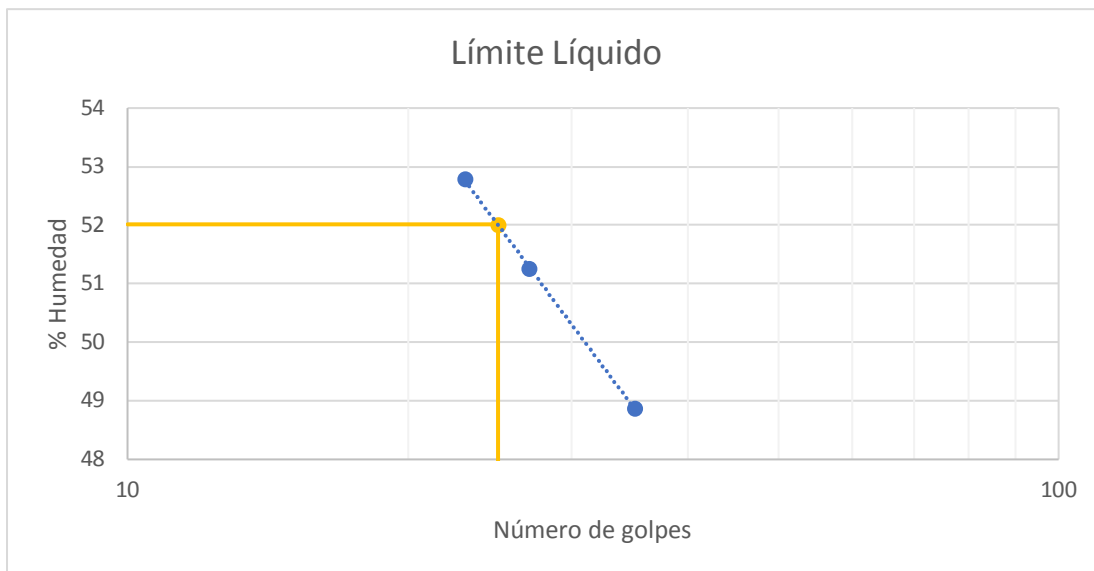
Anexo: B6

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas: ASTM D4318-00
Procedencia suelo: Megaparque Ecológico
Profundidad (m): 1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C8	35	38.8	72.0	61.1	49
A5	27	44.8	74.9	64.7	51
C9	23	47.7	77.8	67.4	53



Límite Líquido	52
----------------	----

Anexo: B7

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

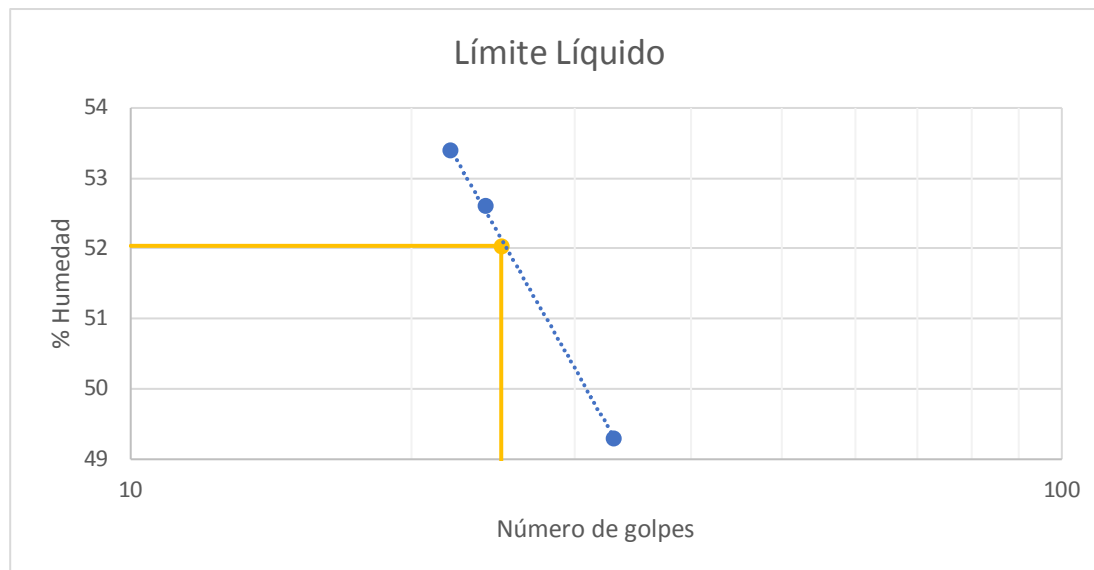
Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas:

ASTM D4318-00
Megaparque Ecológico
1.5-2.0

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A1	33	50.0	82.4	71.7	49
C3	24	39.9	72.1	61.0	53
C5	22	41.4	70.7	60.5	53



Límite Líquido	52
----------------	----

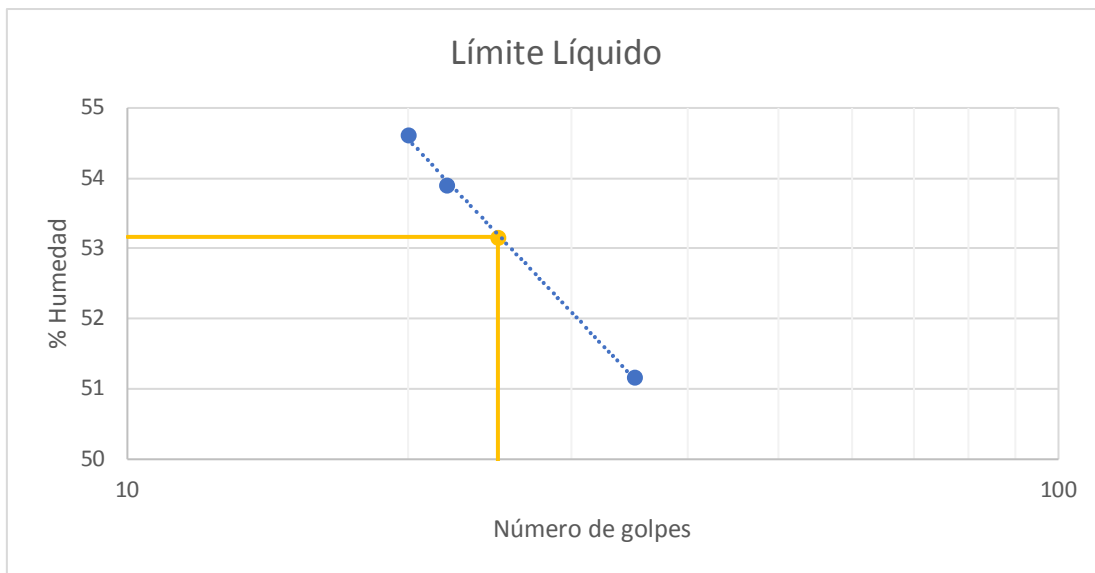
Anexo: B8

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo: Megaparque Ecológico
Profundidad (m): 1.5-2.0
Normas: ASTM D4318-00

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A6	35	44.7	64.2	57.6	51
A4	22	46.0	67.7	60.1	54
A1	20	50.3	68.7	62.2	55



Límite Líquido	53
----------------	----

Anexo: C1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

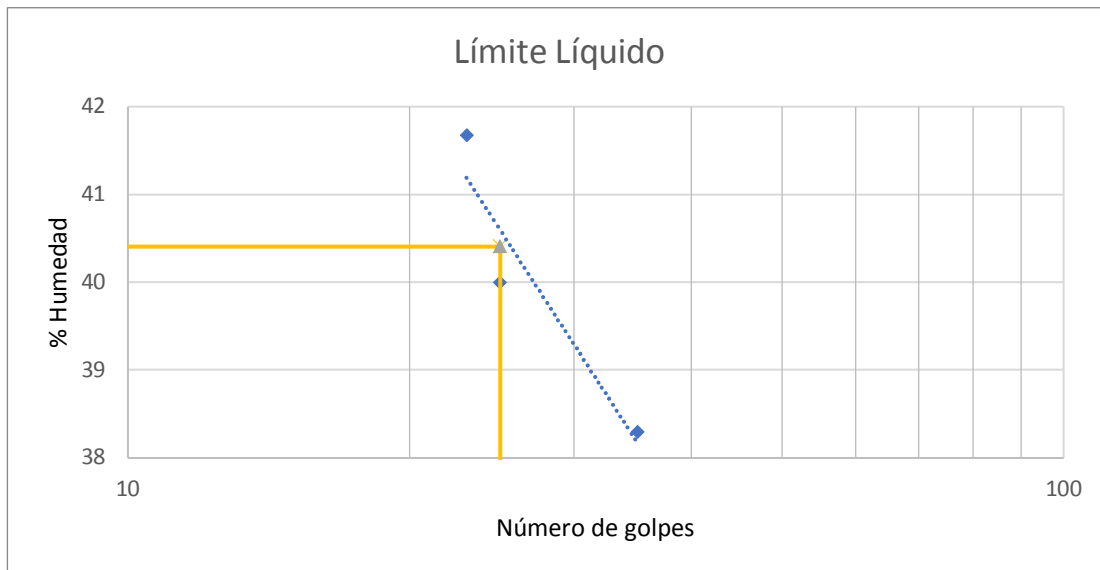
Normas:

ASTM D4318-00

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Megaparque de la Luz
-

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A3	35	38.3	44.8	43.0	38
A5	25	44.8	51.8	49.8	40
A9	23	50.3	60.5	57.5	42



Límite Líquido	40
----------------	----

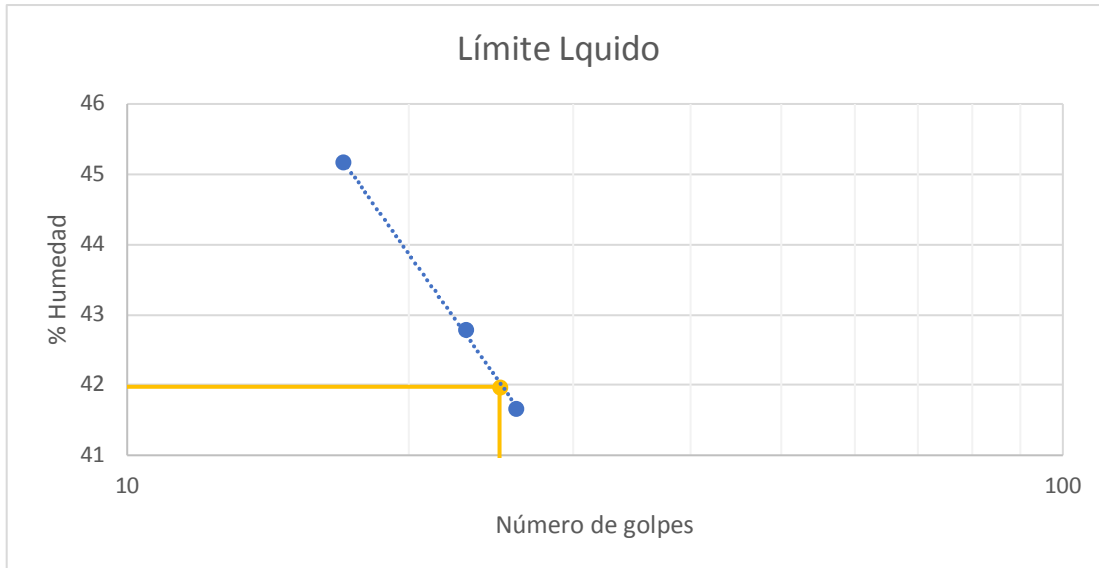
Anexo: C2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas: ASTM D4318-00
Procedencia suelo: Megaparque de la Luz
Profundidad (m): -

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B1	26	42.7	54.8	51.2	42
B4	23	46.5	56.1	53.2	43
B8	17	42.0	52.3	49.1	45



Límite Líquido	42
----------------	----

Anexo: C3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

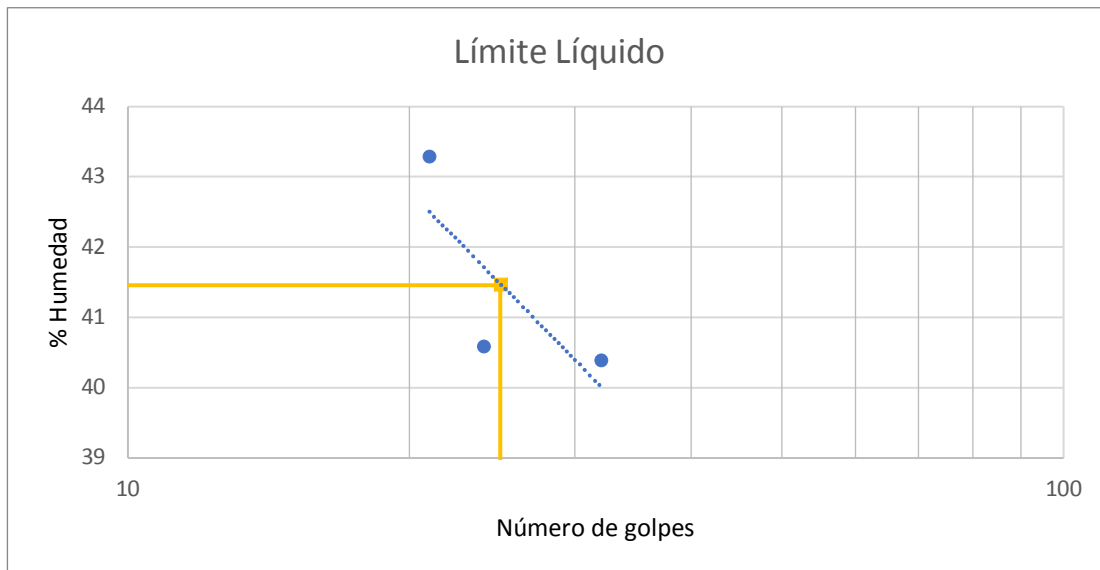
ASTM D4318-00

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Megaparque de la Luz

-

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C2	32	40.7	48.0	45.9	40
C4	24	40.8	50.5	47.7	41
C9	21	47.7	57.3	54.4	43



Límite Líquido	41
----------------	----

Anexo: C4

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

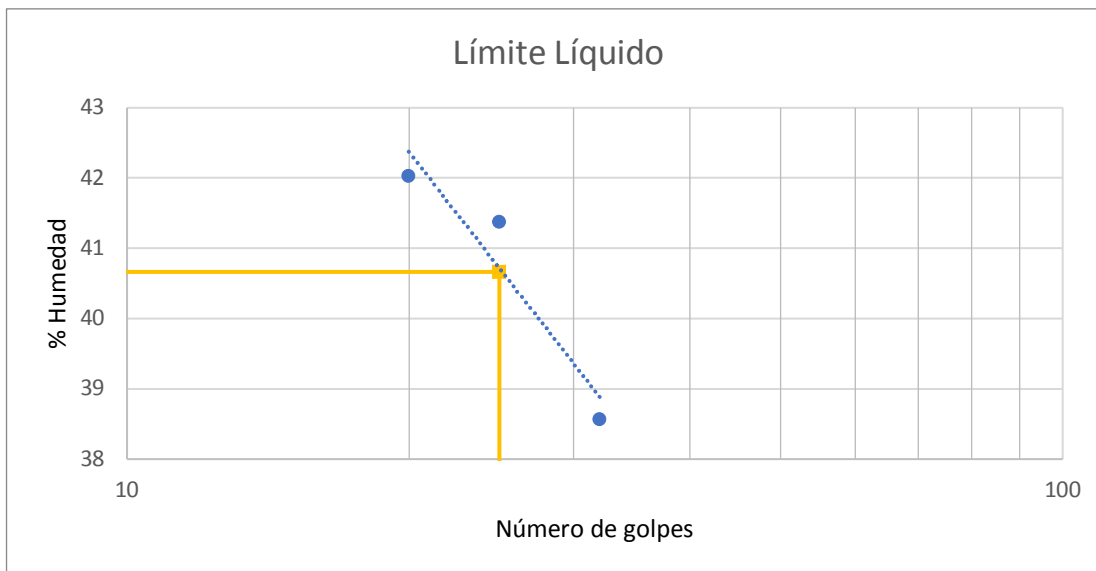
Normas:

ASTM D4318-00

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Megaparque de la Luz
-

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B1	32	42.7	52.4	49.7	39
B5	25	45.7	58.0	54.4	41
B9	20	39.7	49.5	46.6	42



Límite Líquido	41
----------------	----

Anexo: C5

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

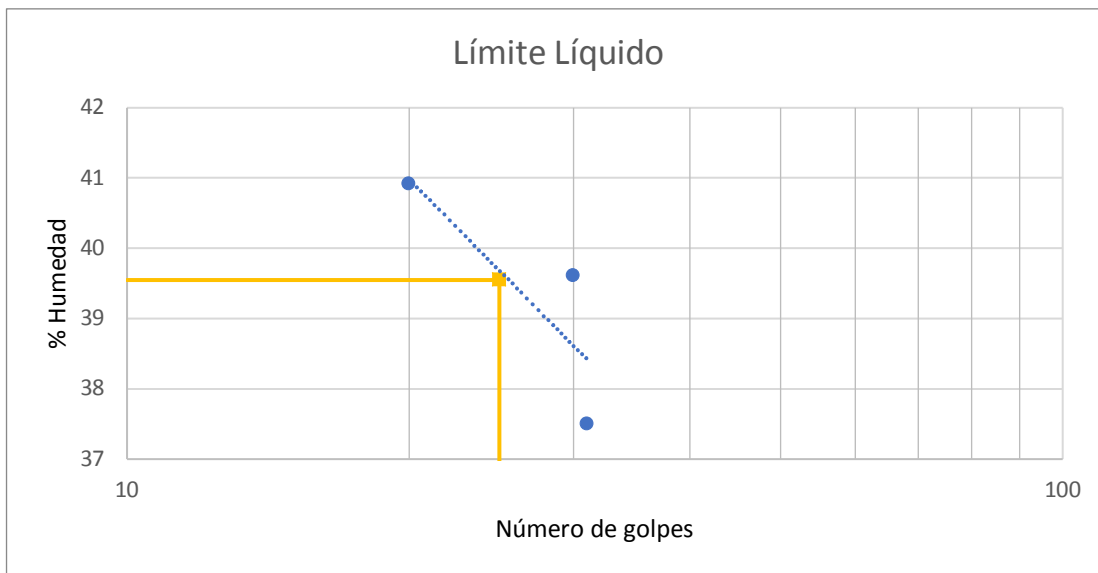
Normas:

ASTM D4318-00

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Megaparque de la Luz
-

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A1	31	50.3	59.9	57.3	38
A4	30	46.0	56.4	53.5	40
A7	20	45.8	55.8	52.9	41



Límite Líquido	40
----------------	----

Anexo: D1

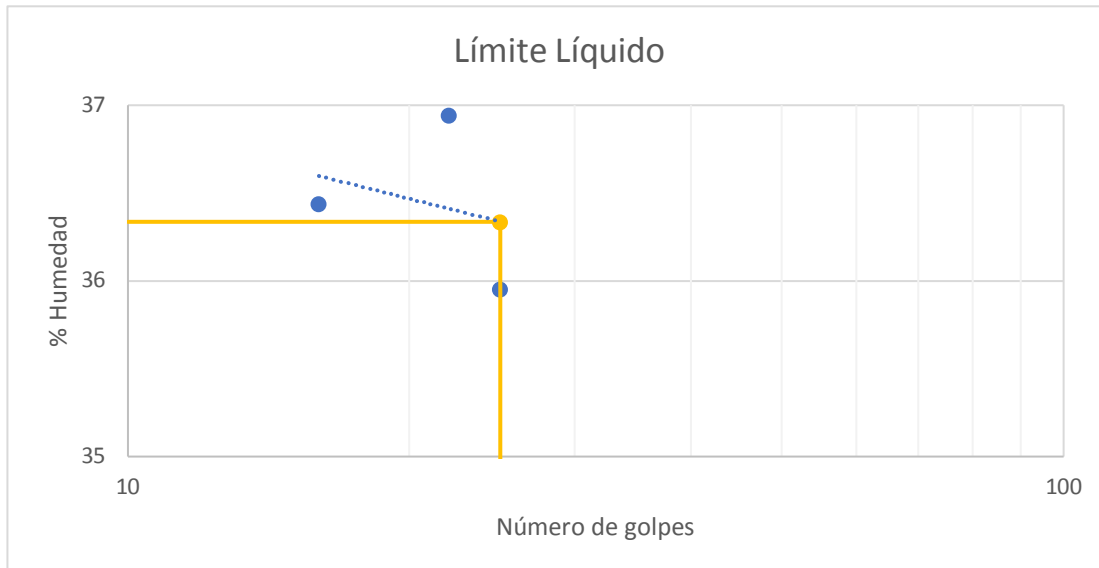
Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo: Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
Profundidad (m): 1.0-1.5

Normas: ASTM D4318-00

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A5	25	44.8	69.0	62.6	36
A7	22	45.8	79.9	70.7	37
A8	16	48.0	78.7	70.5	36



Límite Líquido	36
----------------	----

Anexo: D2

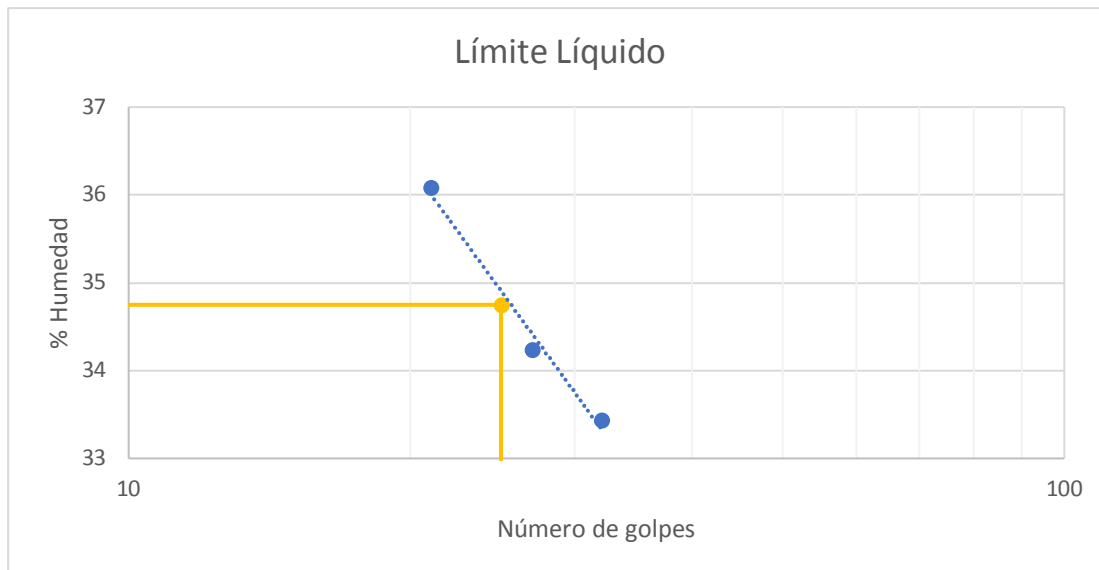
Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo: Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
Profundidad (m): 1.0-1.5

Normas: ASTM D4318-00

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
D9	32	43.2	81.5	71.9	33
B8	27	42.0	76.5	67.7	34
B7	21	41.7	73.0	64.7	36



Límite Líquido	35
----------------	----

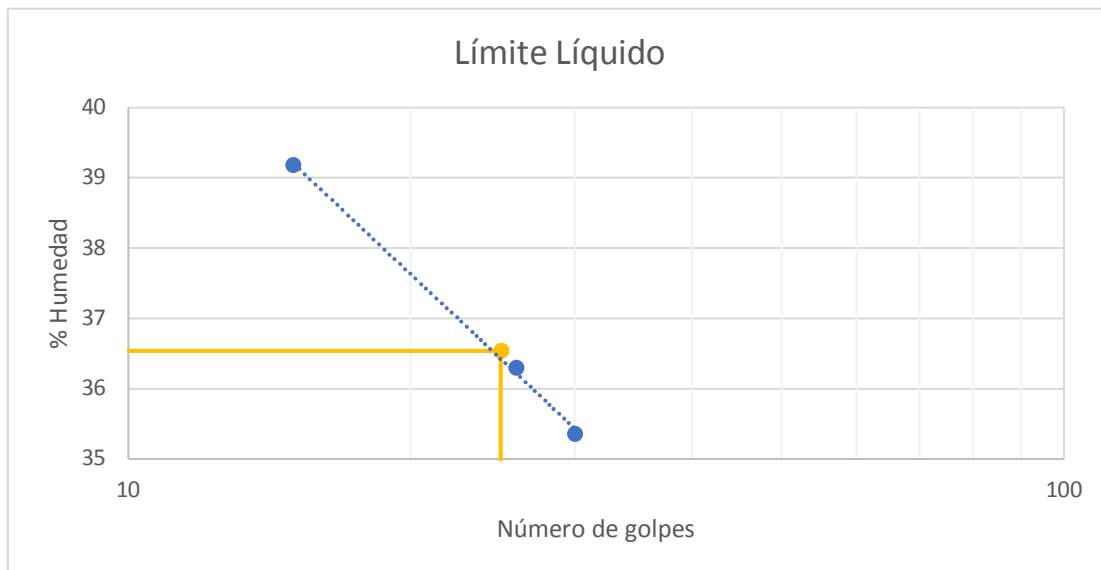
Anexo: D3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo: Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
Profundidad (m): 1.0-1.5
Normas: ASTM D4318-00

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B5	30	45.7	79.0	70.3	35
B6	26	48.9	81.0	72.5	36
B4	15	46.5	80.6	71.0	39



Límite Líquido	37
----------------	----

Anexo: D4

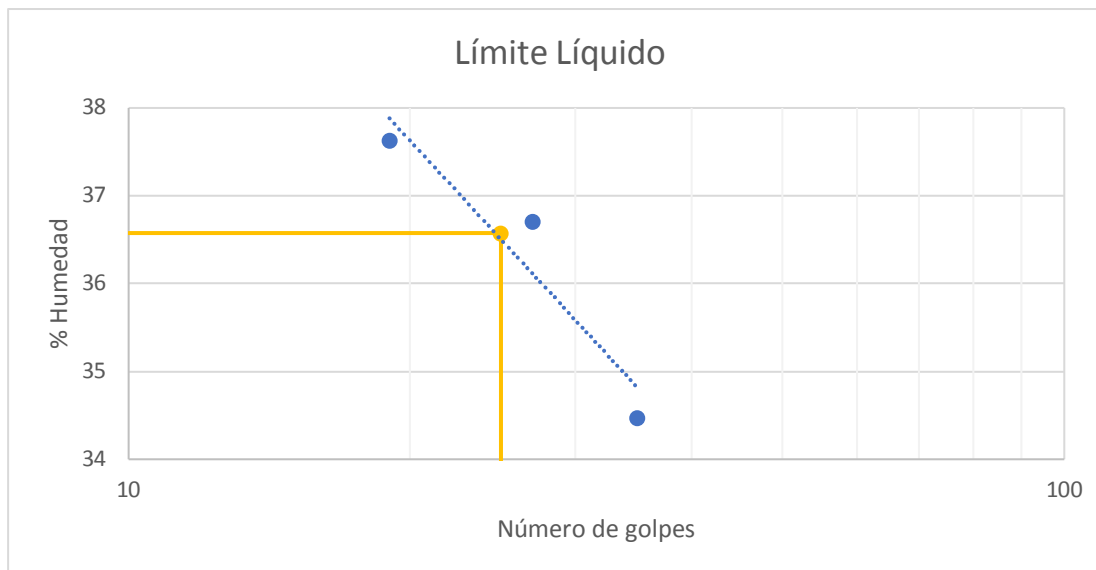
Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo
Profundidad (m)

Normas: ASTM D4318-00
Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
1.0-1.5

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A5	35	44.8	80.3	71.2	34
B4	27	46.5	74.8	67.2	37
B5	19	45.7	73.9	66.2	38



Límite Líquido	37
----------------	----

Anexo: D5

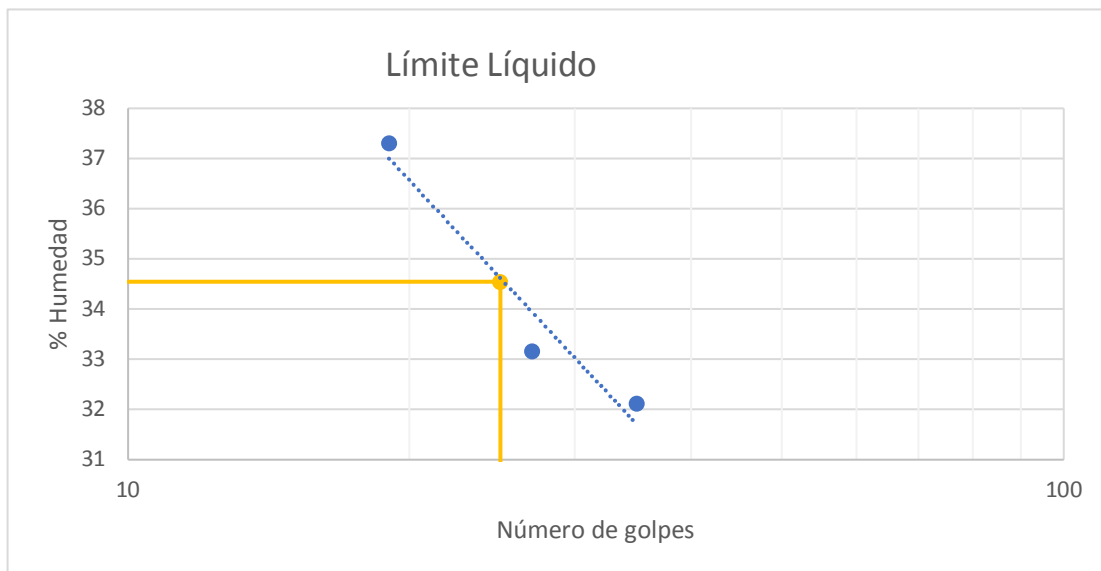
Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Procedencia suelo: Paso elevado Universidad Católica de Cuenca
Profundidad (m): 1.0-1.5

Normas: ASTM D4318-00

Tara	Num. golpes	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
D9	35	43.2	72.8	65.6	32
B6	27	48.9	77.0	70.0	33
A8	19	48.0	73.9	66.9	37



Límite Líquido	35
----------------	----

Anexo: E1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

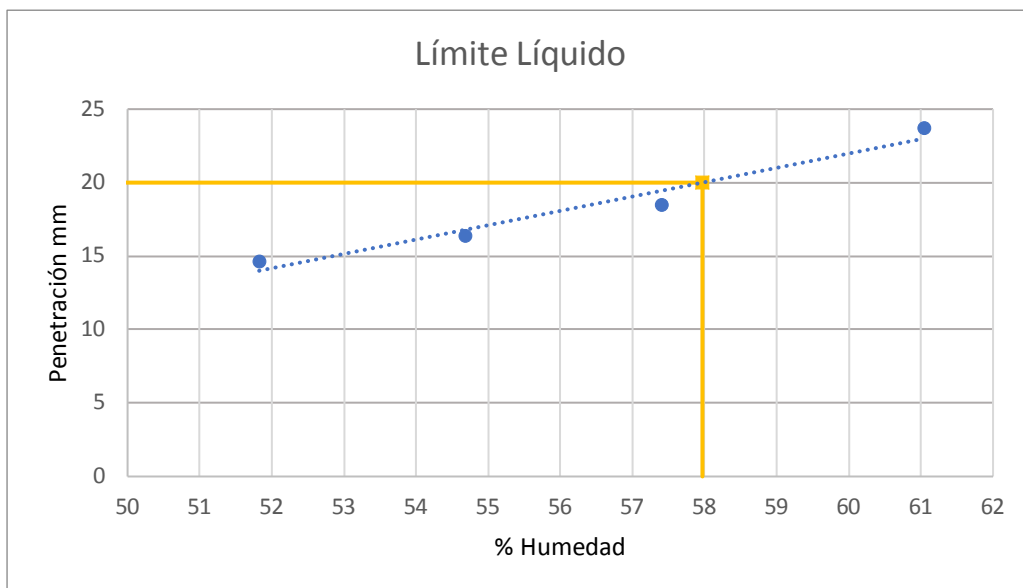
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A2	14.8	14.7	45.0	65.8	58.7	52
	14.5					
C6	16.4	16.4	45.4	65.2	58.2	55
	16.4					
C5	18.1	18.5	41.4	66.9	57.6	57
	18.8					
	18.6					
A7	23.9	23.7	45.8	73.5	63.0	61
	23.5					



Límite Líquido	58
----------------	----

Anexo: E2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

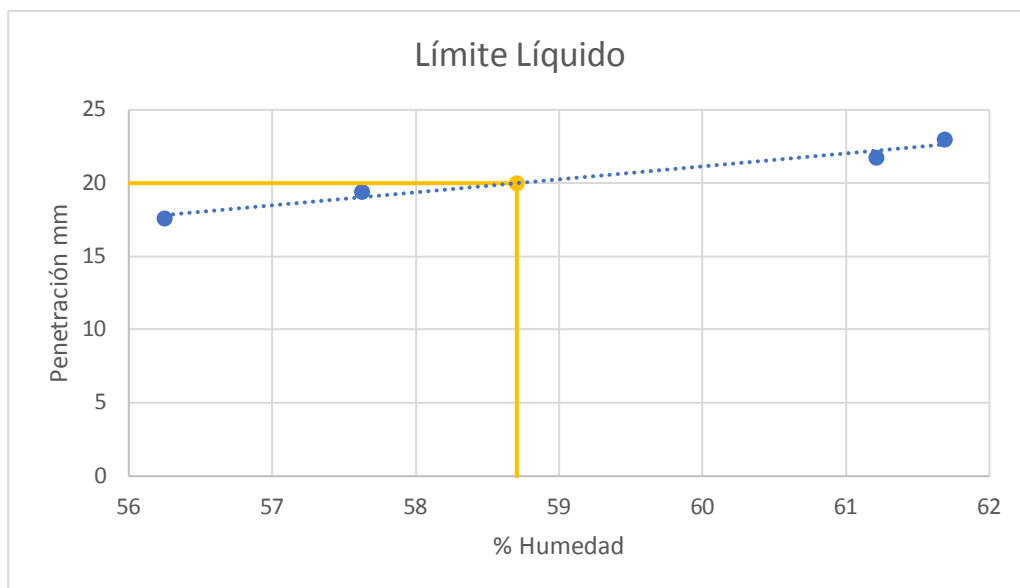
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C3	17.5	17.6	39.9	62.4	54.3	56
	17.7					
C9	19.6	19.4	47.7	75.6	65.4	58
	19.2					
C4	21.4	21.7	40.8	67.4	57.3	61
	22.2					
	21.6					
C8	23.2	23.0	38.8	63.7	54.2	62
	22.8					



Límite Líquido	59
----------------	----

Anexo: E3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

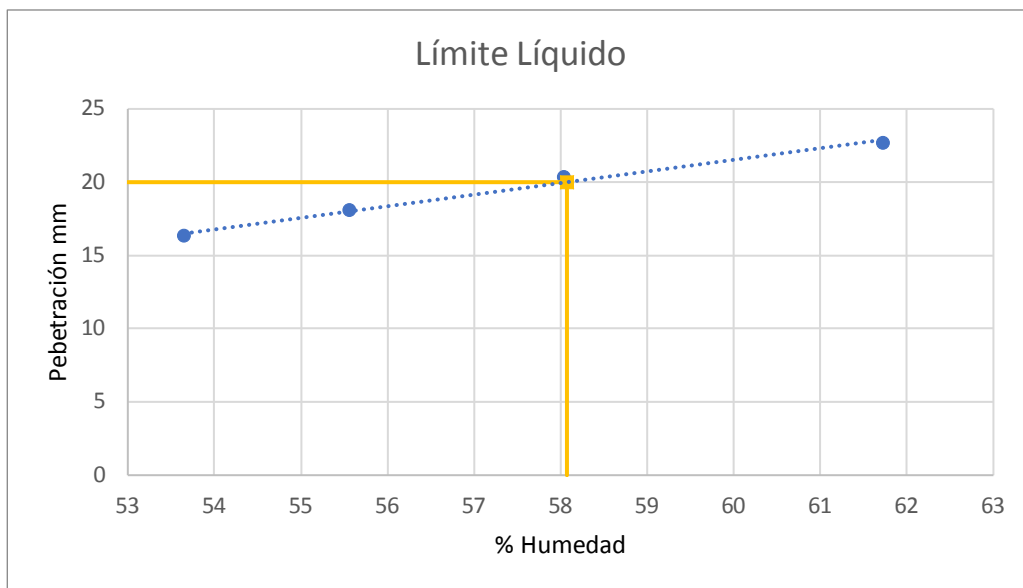
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C2	16	16.3	40.7	63.9	55.8	54
	16.7					
	16.2					
A8	18.1	18.1	48.0	73.2	64.2	56
	18					
A5	20.3	20.3	44.8	75.3	64.1	58
	20.3					
A3	22.6	22.7	38.3	72.1	59.2	62
	22.8					



Límite Líquido	58
----------------	----

Anexo: E4

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

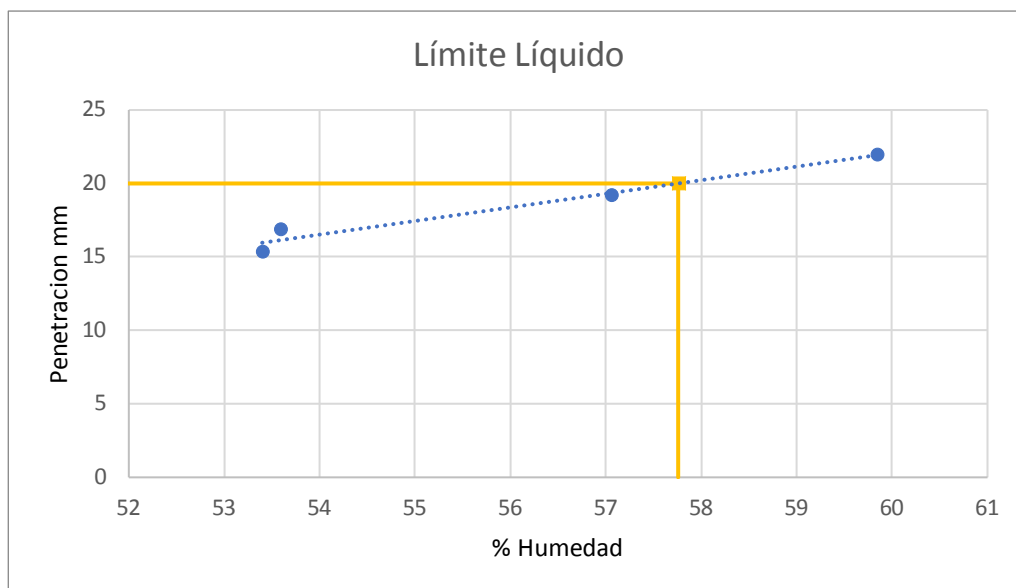
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A7	15.4	15.4	45.8	61.6	56.1	53
	15.3					
A2	16.9	16.9	45.0	68.5	60.3	54
	16.8					
A4	19.3	19.2	46.0	72.7	63.0	57
	19.1					
A6	22.1	22.0	44.7	65.8	57.9	60
	21.9					



Límite Líquido	58
----------------	----

Anexo: E5

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

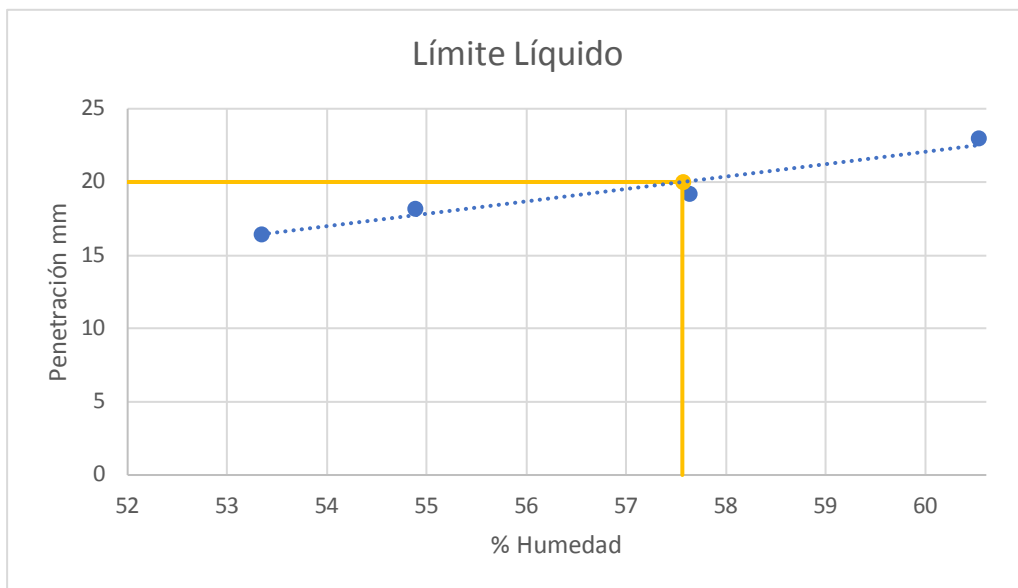
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A3	16.4	16.5	38.3	59.0	51.8	53
	16.5					
A1	18.3	18.2	50.3	75.7	66.7	55
	18					
A5	19.5	19.2	44.8	63.4	56.6	58
	19.5					
	18.5					
A8	22.9	23.0	48.0	72.4	63.2	61
	23					



Límite Líquido	58
----------------	----

Anexo: E6

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

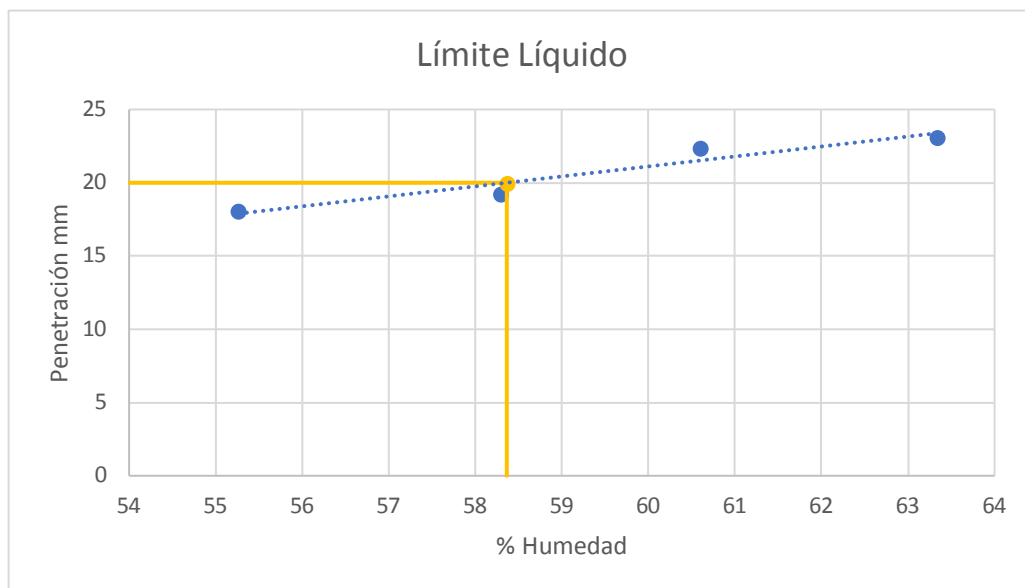
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
E5	18.3	18.1	40.4	58.1	51.8	55
	17.8					
E6	19	19.3	44.1	77.5	65.2	58
	19.5					
B1	22.3	22.4	41.9	63.1	55.1	61
	22.4					
B8	23	23.1	42.7	72.1	60.7	63
	23.2					



Límite Líquido	58
----------------	----

Anexo: E7

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

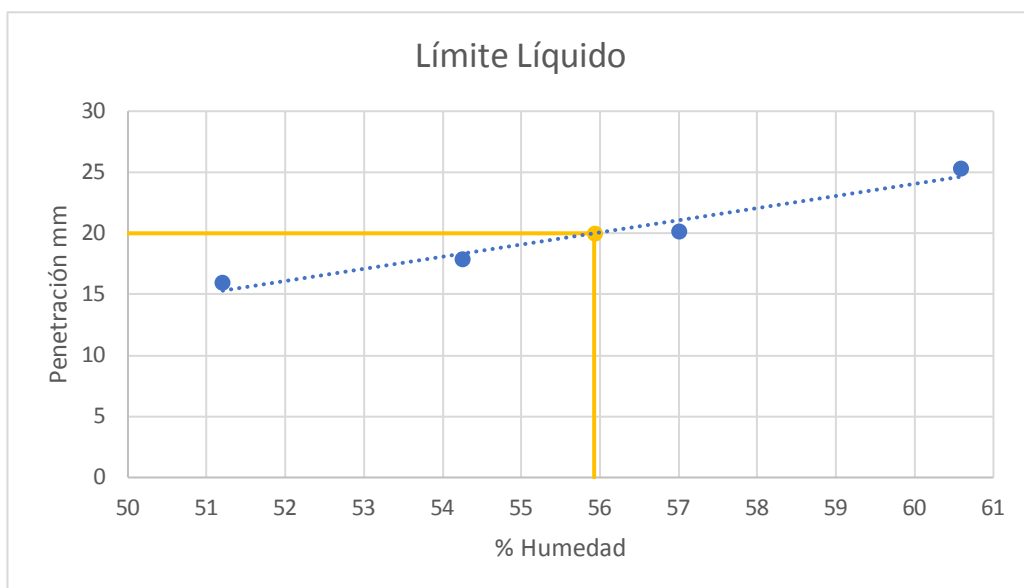
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
E1	16.1	16.0	47.2	72.3	63.8	51
	15.8					
E2	18.1	17.9	51.7	89.8	76.4	54
	17.7					
E3	20.4	20.2	39.5	70.9	59.5	57
	19.9					
E4	25.5	25.4	45.7	78.3	66.0	61
	25.2					



Límite Líquido	56
----------------	----

Anexo: E8

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

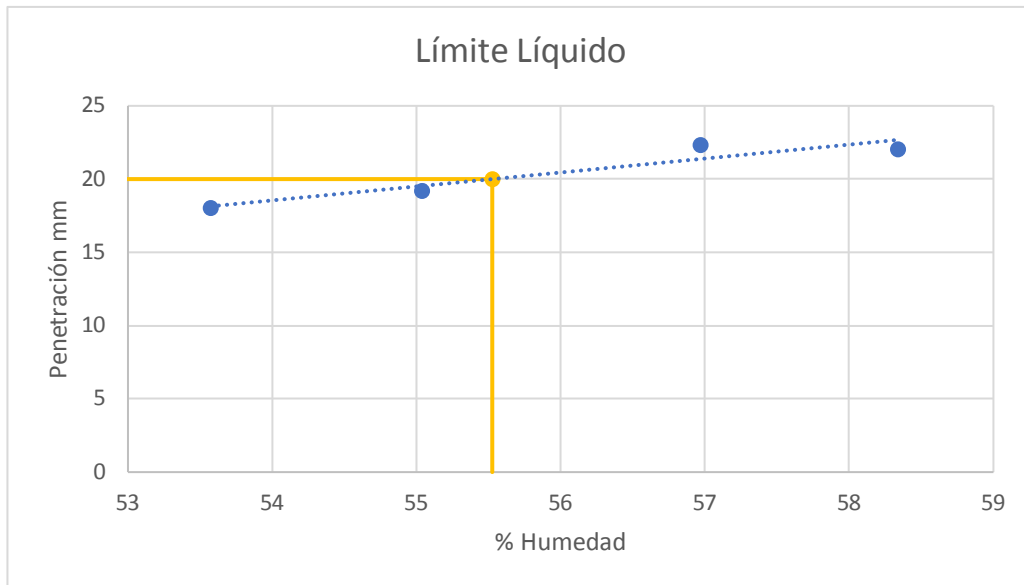
Procedencia suelo

Megaparque Ecológico

Profundidad (m)

1.5-2.0

Tara	Penetración	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad	
E5	18.2	18.1	40.4	57.6	51.6	54
	17.9					
E6	19.1	19.3	44.1	67.2	59.0	55
	19.4					
B1	22.7	22.4	41.9	67.8	58.4	57
	22.1					
	22.3					
B8	22	22.1	42.7	69.3	59.5	58
	22.1					



Límite Líquido	56
----------------	----

Anexo: F1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

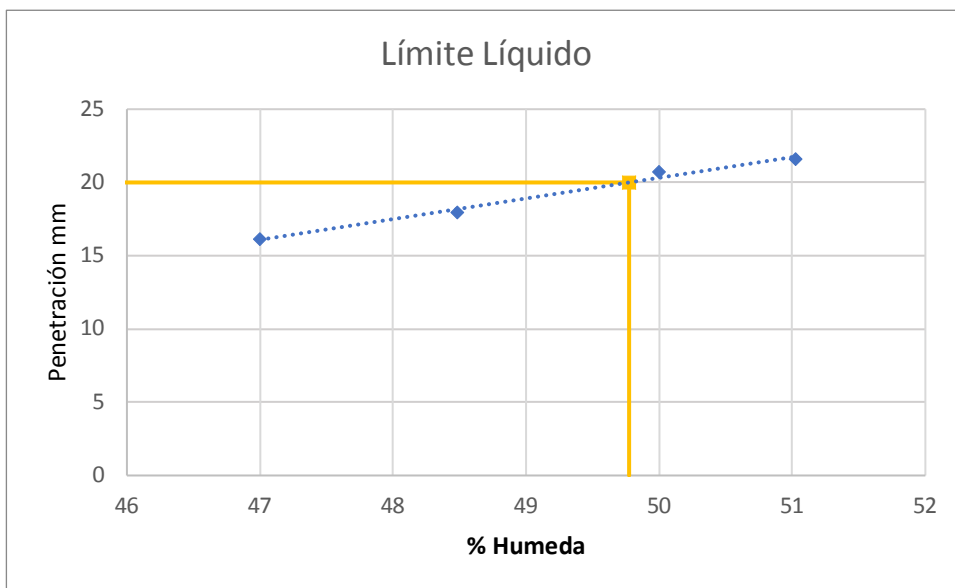
Procedencia suelo

Megaparque de la Luz

Profundidad (m)

-

Tara	Penetración	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
D1	16.1	16.2	45.7	60.4	55.7
	16.2				
D2	17.6	17.9	44.0	58.7	53.9
	18.3				
	17.9				
D3	20.7	20.7	43.7	59.3	54.1
	20.7				
D4	21	21.6	39.1	61.3	53.8
	21.8				
	21.9				



Límite Líquido	50
----------------	----

Anexo: F2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

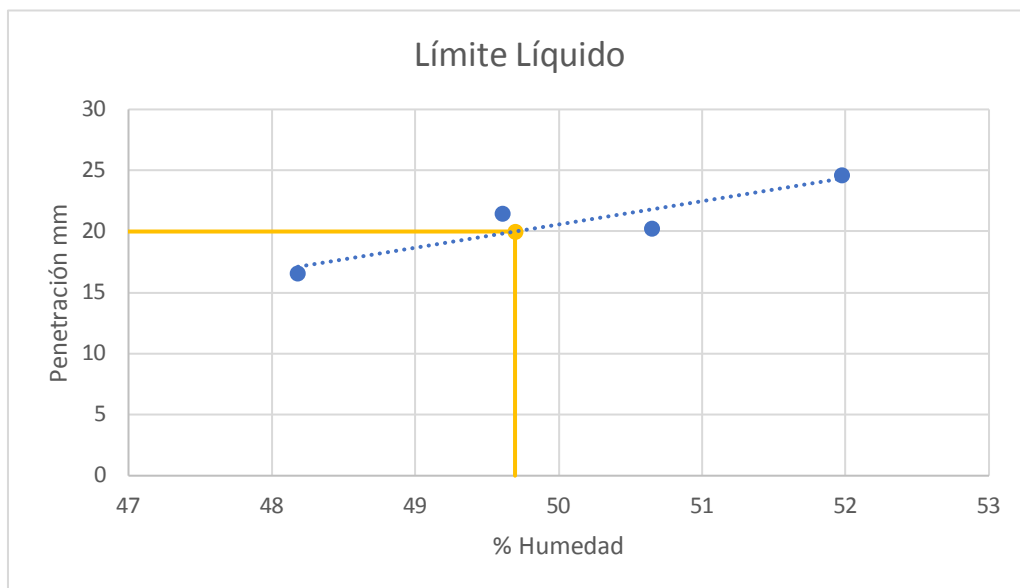
Procedencia suelo

Megaparque de la Luz

Profundidad (m)

-

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
D5	16.3	16.6	40.5	56.8	51.5	48
	16.8					
D6	20.1	20.3	45.7	57.3	53.4	51
	20.5					
D7	21.1	21.5	41.6	60.6	54.3	50
	21.9					
	21.6					
D8	24.1	24.7	53.4	76.5	68.6	52
	25					
	25					



Límite Líquido	50
----------------	----

Anexo: F3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

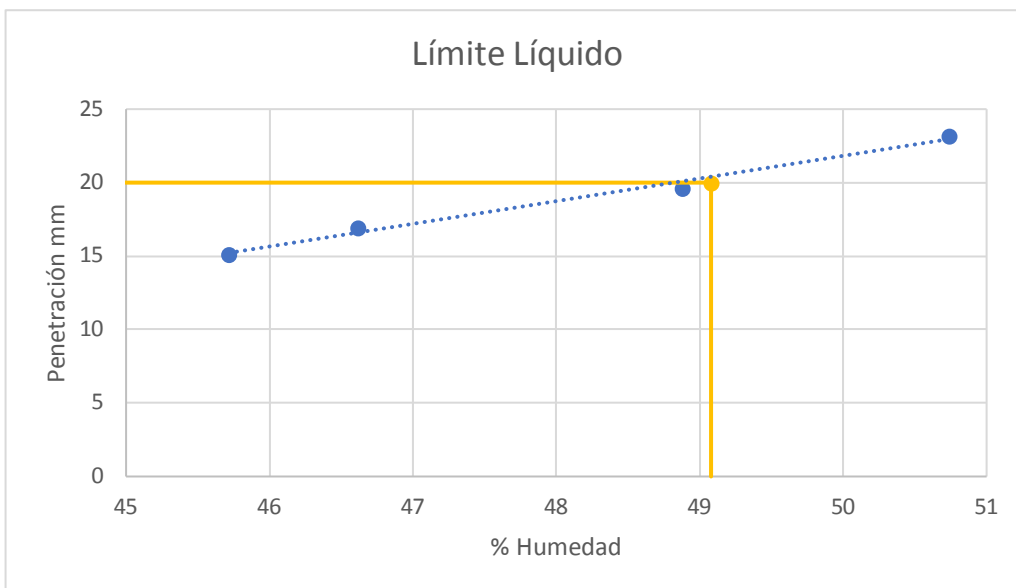
Procedencia suelo

Megaparque de la Luz

Profundidad (m)

-

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B1	14.9	15.1	42.7	52.9	49.7	46
	15.3					
B2	17	17.0	39.8	57.1	51.6	47
	16.9					
B3	19.8	19.6	48.5	68.3	61.8	49
	19.4					
B4	22.1	23.2	46.3	66.8	59.9	51
	22.5					
	25					



Límite Líquido	49
----------------	----

Anexo: F4

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

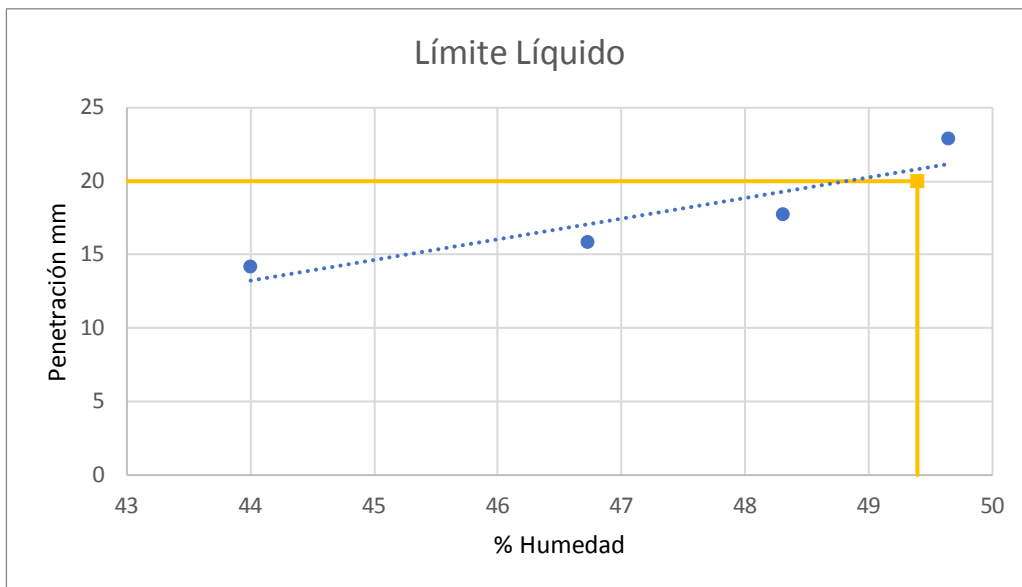
Procedencia suelo

Megaparque de la Luz

Profundidad (m)

-

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A1	14.1	14.2	50.2	68.2	62.7	44
	14.3					
A2	16	15.9	45.0	62.9	57.2	47
	15.8					
A3	17.9	17.8	38.3	55.8	50.1	48
	17.6					
A4	22	22.9	46.0	67.1	60.1	50
	21.7					
	25					



Límite Líquido	49
----------------	----

Anexo: F5

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

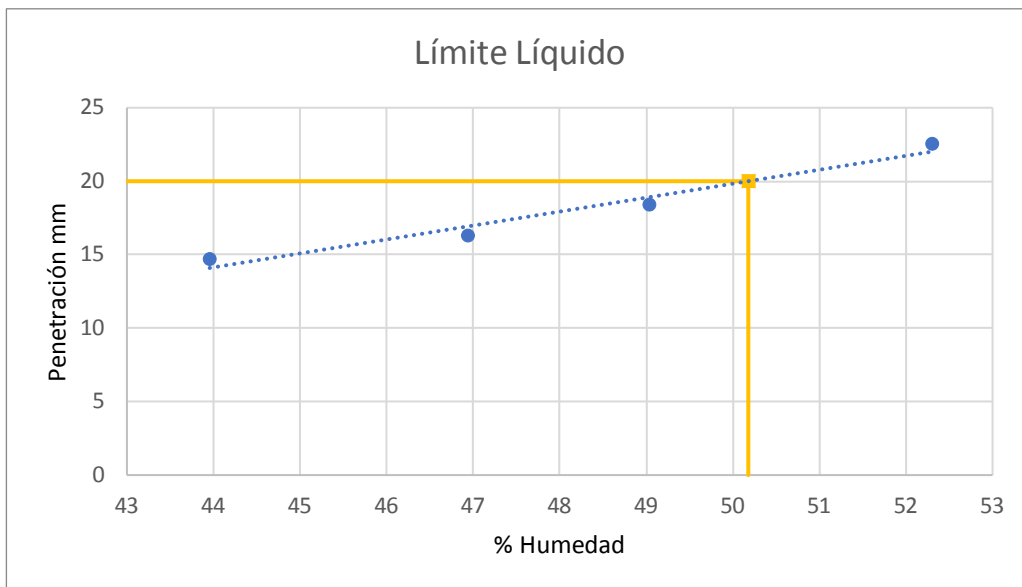
Procedencia suelo

Megaparque de la Luz

Profundidad (m)

-

Tara	Penetración	Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C1	14.5	14.7	41.8	68.0	60.0
	14.9				
C2	16.5	16.3	40.7	62.3	55.4
	16.1				
C3	18.2	18.4	39.9	55.4	50.3
	18.6				
C4	22.5	22.6	40.8	67.3	58.2
	22.6				



Límite Líquido	50
----------------	----

Anexo: G1

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

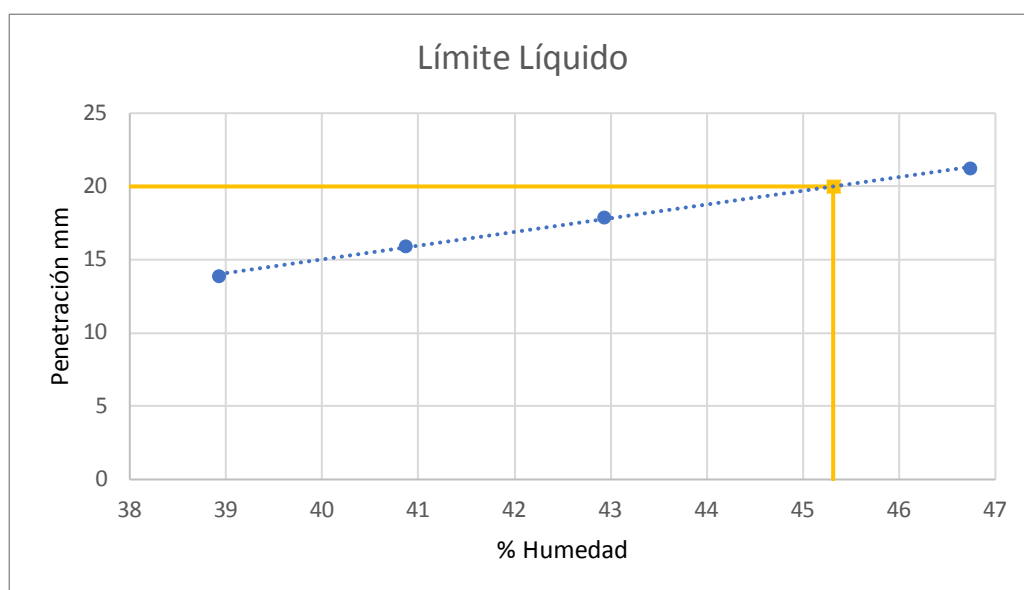
Procedencia suelo

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca

Profundidad (m)

1.0-1.5

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B3	13.8	13.9	48.5	69.2	63.4	39
	14					
A2	16.1	15.9	45.0	74.3	65.8	41
	15.7					
D6	17.9	17.9	45.7	75.0	66.2	43
	17.9					
D2	21.4	21.3	44.0	71.0	62.4	47
	21.1					



Límite Líquido	45
----------------	----

Anexo: G2

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

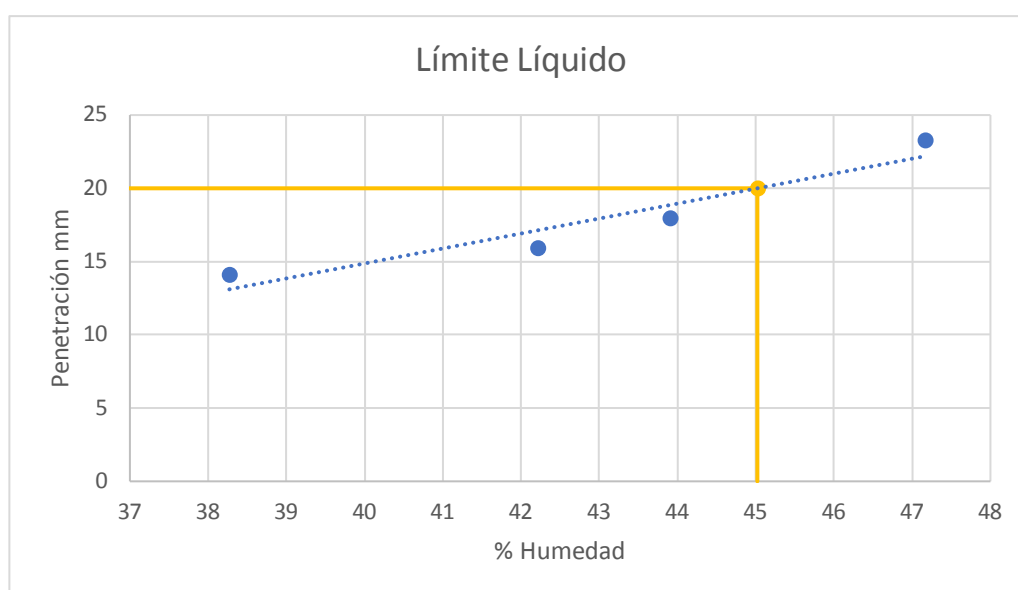
Procedencia suelo

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca

Profundidad (m)

1.0-1.5

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
D6	14.3	14.1	53.4	75.8	69.6	38
	13.9					
C3	15.9	16.0	39.9	65.5	57.9	42
	16					
B1	18.1	18.0	42.7	66.3	59.1	44
	17.8					
C4	23.4	23.3	40.8	64.2	56.7	47
	23.2					



Límite Líquido

45

Anexo: G3

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

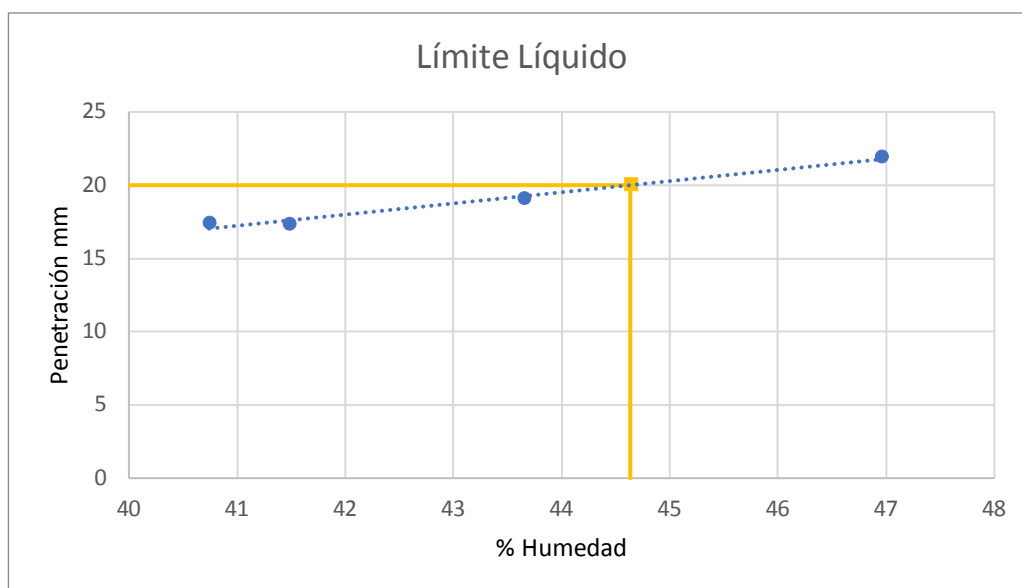
Procedencia suelo

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca

Profundidad (m)

1.0-1.5

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
C6	17.3	17.3	40.7	59.8	54.2	41
	17.3					
D7	17.5	17.4	41.6	68.2	60.5	41
	17.3					
A7	19.2	19.1	45.8	63.9	58.4	44
	18.9					
D4	22	21.9	39.1	56.0	50.6	47
	21.8					



Límite Líquido	45
----------------	----

Anexo: G4

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

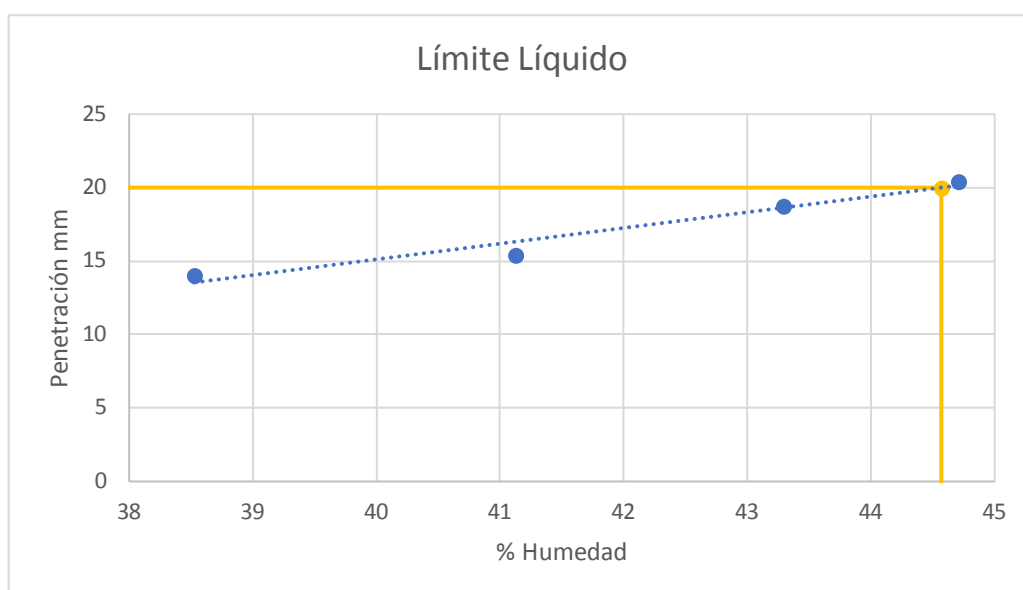
Procedencia suelo

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca

Profundidad (m)

1.0-1.5

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
B5	14	14.1	45.7	62.6	57.9	39
	14.1					
B6	15.4	15.4	48.9	66.4	61.3	41
	15.4					
A1	18.5	18.8	50.3	73.8	66.7	43
	19					
A5	20.6	20.5	44.8	69.4	61.8	45
	20.3					



Límite Líquido	45
----------------	----

Anexo: G5

Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca.

Ensayo de Límite Líquido

Normas:

BS 1377-2:1990

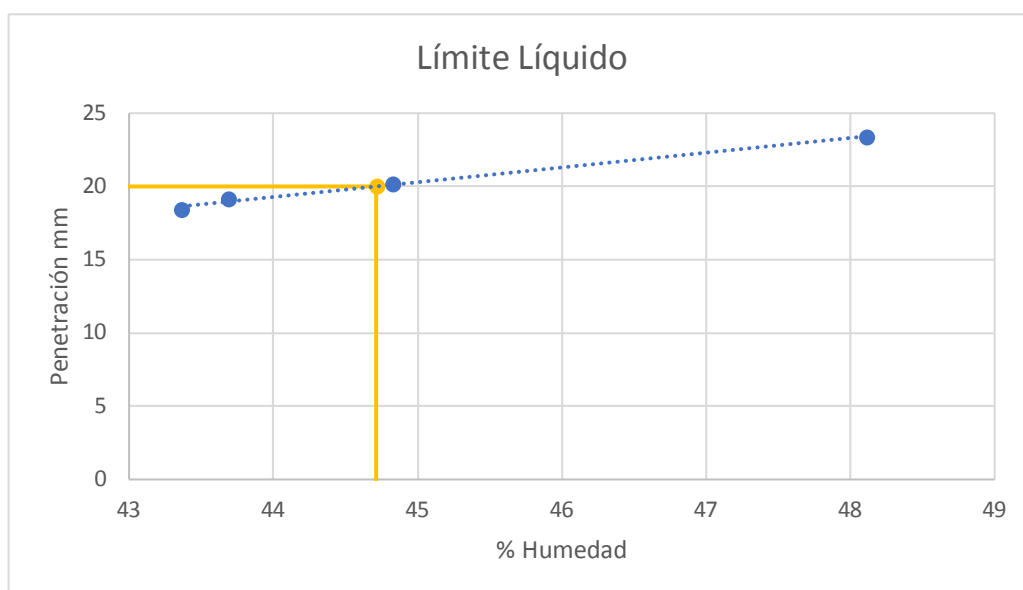
Procedencia suelo

Paso elevado Universidad Católica de Cuenca

Profundidad (m)

1.0-1.5

Tara	Penetración		Peso tara (g)	Peso suelo húmedo + tara (g)	Peso suelo seco + tara (g)	% humedad
A6	18.5	18.5	44.7	60.9	56.0	43
	18.4					
D1	19.2	19.2	45.7	75.3	66.3	44
	19.1					
D9	20	20.2	43.2	72.6	63.5	45
	20.3					
B4	23.3	23.4	46.5	73.9	65.0	48
	23.5					



Límite Líquido	45
----------------	----