



EL SABER DE MIS HIJOS  
HARÁ MI GRANDEZA

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA  
Y METALURGIA

## DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE ATTERBERG PARA MINERALES ARCILLOSOS

Memoria de Prácticas Profesionales  
para obtener el Título de:

**INGENIERO METALÚRGICO**

Presenta

**AMÉRICA ITZEL RUIZ JIMÉNEZ**

Hermosillo, Sonora

Septiembre 2023

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

## VOTOS APROBATORIOS

Hermosillo, Sonora a 08 de septiembre de 2023.

**DR. PAUL ZAVALA RIVERA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO**  
**INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA**

Por medio de la presente, nos permitimos informarle que los miembros del Jurado designado para evaluar su propuesta de Titulación por la Opción de Memoria de Prácticas Profesionales con el Tema **“DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATTERBERG PARA MINERALES ARCILLOSOS”**; presentada por:

**AMÉRICA ITZEL RUIZ JIMÉNEZ**

La han revisado y cada uno de los integrantes da su **VOTO APROBATORIO** ya que cumple con los requisitos parciales para la obtención del Título de:

**INGENIERO METALÚRGICO**

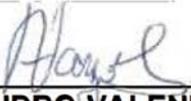
08/ 09/2023  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
**DR. MARTÍN ANTONIO ENCINAS ROMERO**  
**PRESIDENTE**

08/09/2023  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
**DRA. OFELIA DEL CARMEN HERNÁNDEZ NEGRETE**  
**SECRETARÍA**

08/09/2023  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
**DR. ALEJANDRO VALENEZUELA SOTO**  
**VOCAL**

08/09/2023  
Fecha

  
\_\_\_\_\_  
**DR. JESÚS HUMBERTO CORONADO LÓPEZ**  
**SUPLENTE**

## DEDICATORIA

**A mis padres** Isabel y Nydia, que con su amor, paciencia y esfuerzo han hecho de mi la persona que soy ahora. GRACIAS por ser mis mayores consejeros, por motivarme a luchar por mis sueños y alcanzarlos, por apoyarme en todo momento a pesar de los sacrificios que conlleva y enseñarme que ningún problema es tan grande de la mano de Dios. Mi éxito es también de ustedes.

**A mi hermano** Mario, por enseñarme lo que es el amor y el apoyo incondicional. Gracias por ser mi mayor compañero de vida, de aventuras, de aprendizajes y mi cómplice a lo largo de nuestras vidas. Por enseñarme a valorar y amar a pesar de los defectos y las diferencias que podamos tener.

**A mis 4 abuelos** por apoyar a mis padres y a mi desde el día en que nací, por motivarme a ser una mejor persona y no dejarme sola en ningún momento.

**A mi novio** Emiliano, que con su amor y apoyo incondicional me ha ayudado a mantenerme enfocada y a superar cualquier obstáculo que se me presentaba. Gracias por ser mi cómplice durante todo este proceso y por no dejarme caer. Te amo.

**A mis amigos**, por ser un apoyo tan grande durante todos estos años.

**A mi mascota** Negro, por llegar a mi hogar a dar alegría y amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

**A la mina Cobre del Mayo S.A de C.V** y a todo su personal por permitirme realizar mi estancia profesional en sus instalaciones y apoyarme en el desarrollo de este proyecto.

**A la Universidad de Sonora** por brindarme los conocimientos necesarios durante mi desarrollo profesional.

**Al Departamento de Ingeniería y Metalurgia** y a todo el personal docente, quienes me brindaron el conocimiento académico y las herramientas que necesité a lo largo de mi formación académica.

**A mi Tutor de Prácticas Profesionales el Dr. Martín Antonio Encinas Romero** por todo su apoyo y asesoramiento a lo largo del desarrollo del presente proyecto.

**A mi jurado** por impulsarme a mejorar.

A todas las personas que de una u otra forma me apoyaron durante la realización de este proyecto, de corazón, **Gracias**.

## RESUMEN

El encharcamiento de la solución lixiviante en los patios de lixiviación es una problemática actual en la Mina Cobre del Mayo, por ello surge la necesidad de realizar una investigación con el objetivo de conocer los principales factores que influyen en dicho problema, principalmente en minerales con altos contenidos de arcilla.

Inicialmente se planteó la hipótesis de que existen minerales con buenas conductividades que aun así presentan este problema en patios; en base a estos conocimientos se propuso estudiar los Límites de Atterberg y de esta forma conocer las características de las arcillas que contiene el mineral, todo esto con el propósito de crear una correlación entre el índice de plasticidad y la conductividad hidráulica, teniendo como hipótesis de que se crearía cierto rango de valores en el índice de plasticidad en el que se podría predecir cuándo se presentaría el problema de encharcamiento.

Para este proyecto se realizó un muestreo en patios, con el fin de observar cuáles fueron los minerales que presentaron encharcamiento; mediante dicho muestreo se pudo observar, que la hipótesis planteada fue cierta, por lo que se comenzaron a realizar las pruebas de Límite Líquido (LL) y Límite Plástico (LP), una vez obtenidos los resultados de ambas pruebas, se pudo calcular el Índice Plástico (IP) y a su vez intentar crear la correlación entre este último y la conductividad hidráulica.

Finalmente, en los resultados obtenidos se puede observar, que no se logró crear dicha correlación, ya que los resultados del IP fueron muy similares y a pesar de su similitud en valores, no se logró observar ninguna tendencia, que favoreciera en la predicción del encharcamiento, por lo que no se pudo crear el rango de valores que se esperaba. En el caso de los resultados del LL, se puede observar una variación en los valores y el comportamiento del mineral, dependiendo de la forma de preparación de la muestra; para el LP, los valores se mantuvieron similares.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>iv</b>
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....</b>	<b>1</b>
1.1    Presentación de la Empresa Receptora .....	2
1.2    Contexto del Problema .....	2
1.3    Justificación .....	3
1.4    Objetivos.....	3
1.4.1    Objetivo general .....	3
1.4.2    Objetivos específicos.....	3
<b>2 ANTEDECENTES .....</b>	<b>4</b>
2.1    Límites de Atterberg .....	5
2.2    Plasticidad y Límites de Consistencia.....	6
2.2.1    Límite líquido .....	8
2.2.2    Límite plástico .....	10
2.2.3    Carta de plasticidad.....	10
2.3    Clasificación de los Suelos .....	11
2.4    Propiedades de los Minerales de Arcilla.....	12
2.5    Factores que Pueden Influir en los Resultados .....	16
<b>3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>18</b>
3.1    Determinación del Límite Líquido .....	19
3.1.1    Material y equipo de laboratorio .....	19
3.1.2    Calibración del equipo.....	20
3.1.3    Preparación de la muestra vía seca en horno .....	20
3.1.4    Preparación de la muestra vía seca al sol.....	20
3.1.5    Preparación de la muestra vía húmeda.....	21
3.1.6    Procedimiento .....	21
3.2    Determinación del Límite Plástico.....	23
3.2.1    Material de laboratorio.....	23
3.2.2    Procedimiento .....	24

<b>4</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>26</b>
4.1	Resultados de Muestra Vía Seca .....	27
4.2	Resultados de muestra vía húmeda .....	29
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>33</b>
5.1	Conclusiones .....	34
5.2	Recomendaciones .....	34
5.3	Conclusión Personal .....	35
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>36</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Límites de Atterberg [1].....	5
Figura 2. Trayectoria humedad-volumen de un suelo amasado [1] .....	7
Figura 3. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido [1] .....	9
Figura 4. Curva de flujo [1].....	9
Figura 5. Carta de Plasticidad [4].....	11
Figura 6. Estructura molecular de la caolinita [10] .....	13
Figura 7. Estructura molecular de la montmorillonita [11] .....	13
Figura 8. Estructura molecular de la illita [12] .....	14
Figura 9. Material y equipo de laboratorio para la determinación del límite líquido	19
Figura 10. Muestra extendida al sol .....	20
Figura 11. Muestra extendida en cuchara Casagrande.....	22
Figura 12. Muestra en cuchara Casagrande dividida .....	22
Figura 13. Porción de muestra tomada para pesar .....	23
Figura 14. Material de laboratorio para la determinación del límite plástico .....	23
Figura 15. Resultado final del moldeado de la muestra .....	24
Figura 16. Resultados de prueba con muestras vía seca .....	27
Figura 17. Resultados de prueba con muestras tomadas del tajo.....	29
Figura 18. Resultados de la primera prueba con muestras vía húmeda .....	30
Figura 19. Resultados de la segunda prueba con muestra vía húmeda .....	31
Figura 20. Correlación índice de Plasticidad – Conductividad Hidráulica.....	32

## INDICE DE TABLAS

Tabla I	Prefijos de clasificación de suelos [5] .....	11
Tabla II	Sufijos de clasificación de suelos [5] .....	11
Tabla III	Clasificación de los suelos [5].....	12
Tabla IV.	Valores de los límites de Atterberg para minerales de arcilla [1] .....	15
Tabla V.	Resultados de prueba con muestra vía seca .....	27
Tabla VI.	Resultados de prueba con muestras tomadas del tajo .....	28
Tabla VII.	Resultados de la primera prueba con muestra vía húmeda.....	29
Tabla VIII.	Resultados de segunda prueba con muestra vía húmeda.....	31

## **1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**

## **1.1 Presentación de la Empresa Receptora**

Cobre del Mayo S.A de C.V. es una compañía minera mexicana que opera en las cercanías del pueblo de Piedras Verdes, éste pertenece al municipio de Álamos, Sonora, se dedica a la explotación de cobre y es la tercera mina más grande de México medida en producción. Produce cátodos de cobre LME Grado A, y vende ciertos tipos de minerales para concentración. Opera una lixiviación en pilas del mineral, tal como sale de la mina (Run of Mine, ROM, por sus siglas en inglés), otra lixiviación en pilas de mineral triturado y, además, vende mineral triturado de alta ley para flotación, en función de su ley, su mineralización, entre otras características.

## **1.2 Contexto del Problema**

El principal problema que se planteó estudiar durante el presente proyecto de prácticas profesionales, desarrollado en el Laboratorio de Metalurgia de esta empresa minera, está relacionado con el encharcamiento de la solución lixivante en los patios de lixiviación y su vez, analizar la causa por la que algunos minerales con altos contenidos de arcilla no presentaban esta condición de encharcamiento, mientras que, por el contrario, en minerales con bajos contenidos de arcilla si se presentó.

La lixiviación en patios es uno de los principales métodos para la extracción de metales, entre ellos el cobre. Durante las operaciones los patios pueden llegar a presentar problemas, como el encharcamiento, a pesar de ser previamente acondicionados, lo que ocasiona que la solución lixivante no tenga un flujo adecuado, provocando así pérdidas del metal de interés, existen diferentes factores que pueden influir, como el flujo de los goteros o dispersores que se utilizan, al igual que la cantidad de arcilla que contiene el mineral a lixiviar.

Los minerales con altos contenidos de metales, como oro, plata y cobre favorecen su utilización en la industria minera, pero no todos son aptos para el método de lixiviación en patios, los que presenten niveles altos de arcilla tienden a provocar encharcamiento, debido a esto, en la mina Cobre del Mayo fue necesario conocer las características del mineral que es enviado a patios.

El científico Albert Atterberg, propuso cuatro estados de consistencia, y a las fronteras entre cada uno los llamó "límites". Los estados sólido, semisólido, plástico y líquido, los cuales son separados por los límites líquido, plástico y de contracción, conocidos como límites de Atterberg, son una de las principales herramientas que se utilizaron, para conocer el comportamiento y características del mineral, particularmente el límite líquido y plástico, en relación con el índice de plasticidad nos ayudaron a conocer, qué tipo de mineral se envió a patios y su comportamiento, con la intención de crear una correlación con la conductividad hidráulica, y así predecir si se presentaría encharcamiento o no.

### **1.3 Justificación**

Este proyecto se enfoca en la obtención de los límites líquido y plástico, en minerales arcillosos, con el fin de observar su comportamiento, ya que después de diferentes pruebas de conductividad hidráulica, se observó la posibilidad de que el problema de encharcamiento sea debido a la cantidad y/o características de arcillas que se encuentren en el mineral. Este proyecto permitió observar el comportamiento de las arcillas y las condiciones que lo rigen. Asimismo, la intención principal de este proyecto fue crear una correlación entre el índice de plasticidad y la conductividad hidráulica, para lograr predecir en qué casos se presentaría encharcamiento, y de esta manera tratar el mineral de forma tal, que no se presente ningún problema en los patios.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

- Conocer el comportamiento de las arcillas en el mineral enviado a patios de lixiviación, mediante la determinación de los límites de Atterberg.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Obtener los límites líquido y plástico del mineral enviado a patios de lixiviación.
- Crear una correlación entre el índice de plasticidad y la conductividad hidráulica del mineral.

## **2 ANTECEDENTES**

## 2.1 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg están basados en el concepto de que los suelos finos, se pueden encontrar en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan. De esta forma, un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido. La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

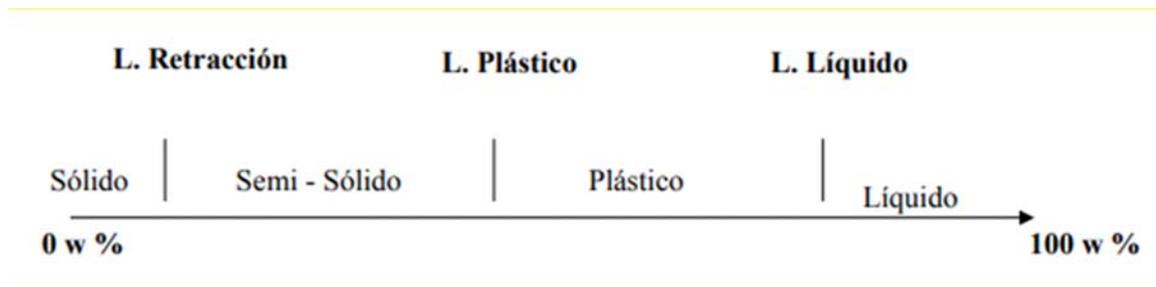


Figura 1. Límites de Atterberg [1]

El contenido de agua en el que se producen los cambios entre estados varía de un suelo a otro, y en mecánica de suelos es de fundamental interés saber en qué rango de humedad se comportan plásticamente los suelos, es decir, acepta la deformación sin romperse (plasticidad). Esta es una propiedad que tienen los suelos hasta cierto límite.

En 1911, el científico sueco Albert Atterberg desarrolló un método para medir estos límites de agua. Los límites de Atterberg son propiedades de los valores de humedad del suelo y se utilizan para identificarlos y clasificarlos.

El límite de Atterberg es actualmente la determinación más habitual en los laboratorios de mecánica de suelos. Su utilidad radica en que con sólo conocer su valor se obtiene una idea bastante clara del tipo de suelo y de sus propiedades, gracias a la experiencia adquirida con miles de mediciones. Por otro lado, son mediciones fáciles y rápidas, por lo que se pueden identificar rápidamente los suelos y seleccionar adecuadamente muestras representativas para estudios más complejos.

Los límites de Atterberg pertenecen, junto al análisis granulométrico, al tipo de ensayos de identificación. Pero, si el análisis granulométrico nos permite conocer la magnitud cuantitativa de la fracción fina, los límites de Atterberg nos indican sus características, completando así el conocimiento del suelo [1].

En la siguiente ecuación, el índice de plasticidad indica la magnitud del intervalo de humedades, en el cual el suelo posee consistencia plástica.

$$\text{Índice de plasticidad} = W_L - W_P \quad (1)$$

Donde:

$W_L$  = Límite líquido

$W_P$  = Límite plástico

## **2.2 Plasticidad y Límites de Consistencia**

Albert Atterberg definió la plasticidad como la capacidad de un suelo para deformarse sin agrietarse, ni producir rebote elástico. De igual manera, observó que los suelos arcillosos son plásticos en condiciones húmedas y muy duros en condiciones secas, los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos firmes cuando están secos, y las arenas están sueltas y secas. También observó que algunas arcillas tienen alta plasticidad y otras tienen baja plasticidad.

Los límites establecidos por Atterberg, para diferenciar los distintos estados de consistencia se determinan a partir de la fracción que pasa por el tamiz N° 40, descartando la porción retenida.

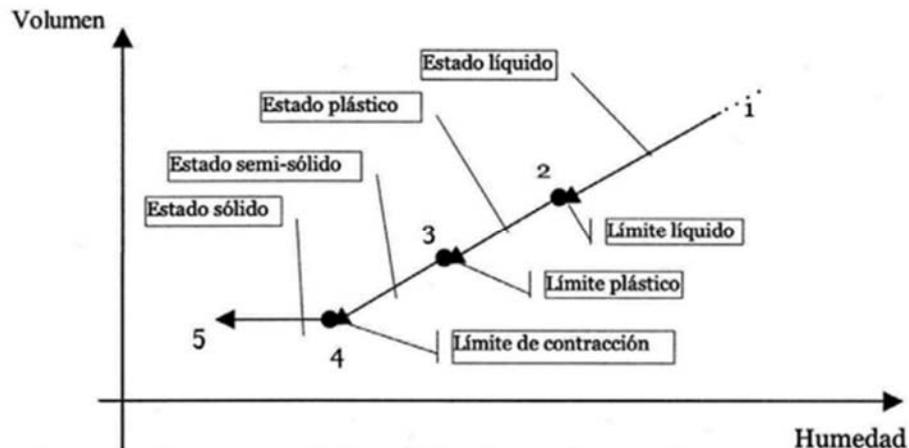


Figura 2. Trayectoria humedad-volumen de un suelo amasado [1]

A la frontera entre el estado sólido y semisólido, se le llama límite de contracción o de retracción y está definida, como la humedad presente al haber añadido agua suficiente para llenar todos los huecos de una pastilla de suelo seca. Se trata de la humedad máxima de un suelo, para la cual una pérdida de humedad no causa disminución de volumen de suelo. A la frontera entre los estados semisólido y plástico, se llama límite plástico, y este se obtiene midiendo el contenido de humedad del suelo, cuando se comienzan a agrietar pequeños cilindros de suelo de 3 mm de diámetro. La frontera entre los estados plástico y líquido, se le llama límite líquido y se determina midiendo la humedad que contiene el suelo, cuando con 25 golpes se cierra una ranura de 13 mm de longitud mediante un aparato normalizado.

Atterberg encontró que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, llamado índice de plasticidad (IP), representaba una medida satisfactoria del grado de plasticidad de un suelo. Después sugirió que, estos dos límites sirvieran de base en la clasificación de los suelos plásticos. De acuerdo a los valores del índice de plasticidad, distinguió los siguientes materiales.

- Suelos desmenuzables ( $IP < 1$ )
- Suelos débilmente plásticos ( $1 < IP < 7$ )
- Suelos medianamente plásticos ( $7 < IP < 15$ )
- Suelos altamente plásticos ( $IP > 15$ )

Todos los límites se expresan en porcentaje de agua contenida sobre suelo seco [1].

### **2.2.1 Límite líquido**

El límite líquido como fue definido por Atterberg, ha estado sujeto a distintas variaciones en su determinación. En 1927 Terzaghi le sugirió a Casagrande que diseñara un dispositivo mecánico que pudiera eliminar a medida de lo posible los errores del operador en la determinación de este.

Casagrande logró desarrollar un dispositivo normalizado, como se muestra en la Norma UNE 103-103-94. El límite líquido, como ya se ha comentado anteriormente, está definido como la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchara normalizada, cuando un surco, realizado mediante un ranurador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra a lo largo del fondo, en una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la mencionada cuchara, desde una altura de 10 mm sobre una base también normalizada, con una cadencia de 2 golpes por segundo. La altura de caída, como las dimensiones del cascador y las dimensiones de la ranura, como el material de la base, etc., son factores de influencia en los resultados obtenidos.

Para comprender el significado del ensaye, mediante el dispositivo desarrollado por Casagrande, se puede decir que, para golpes secos, la resistencia al corte dinámico de los taludes de la ranura se agota, generándose una estructura de flujo que produce el deslizamiento. La fuerza resistente a la deformación puede considerarse como la resistencia al corte de un suelo. La resistencia al corte de todos los suelos en el límite líquido es constante y tiene un valor aproximado de 2.2 kPa.

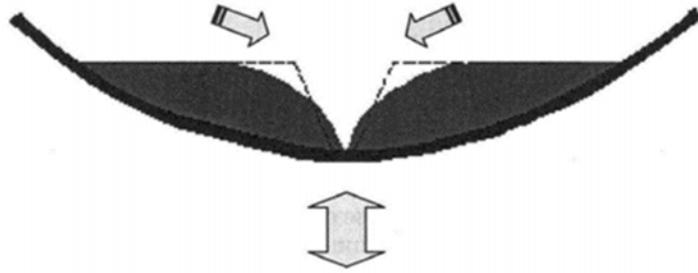


Figura 3. Deslizamiento de un suelo en el límite líquido [1]

Casagrande observó que, el número de golpes necesarios para cerrar la ranura dependía del contenido de agua del suelo y que, cuando una serie de resultados de un suelo se representaba en un gráfico, donde el eje de la humedad era aritmético y el eje del número de golpes era logarítmico, esos resultados formaban una línea recta. Esa curva fue llamada curva de flujo.

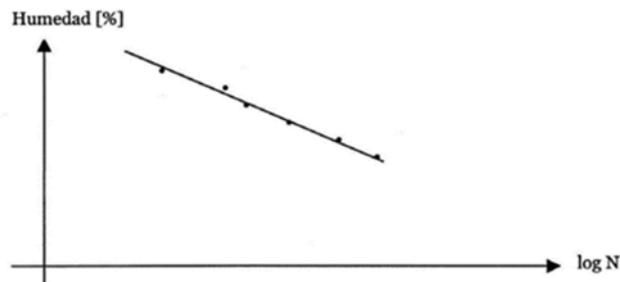


Figura 4. Curva de flujo [1].

Esta curva puede ser representada por la siguiente ecuación:

$$w = -F \cdot \log N + C \quad (2)$$

Donde:

W = Contenido de humedad en porcentaje de suelo seco

F = Constante llamada "índice de flujo"

N = Número de golpes

C = Constante

Para obtener el límite líquido de un suelo, primero se representan los resultados en una doble escala logarítmica, en la que figure en abscisas el número de golpes y en ordenadas la humedad. Una vez dibujados, bastará con trazar una recta de pendiente, que mejor se adapte a los puntos representados, y la humedad del punto de corte con la ordenada correspondiente a los 25 golpes, nos dará el límite líquido. No obstante, con la intención de llegar a un equilibrio en la economía, según la Norma UNE 103-103-94, bastará con obtener una determinación entre 15 y 25 golpes y otra entre 25 y 35 [1].

### **2.2.2 Límite plástico**

Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3 mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1 cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos [2, 7].

### **2.2.3 Carta de plasticidad**

Gráfico en el que se representan los valores del límite líquido y del índice de plasticidad en un campo de coordenadas cartesianas para discriminar las arcillas y los limos de acuerdo con la relación entre dichos valores. Esta carta se utiliza sistemáticamente en la clasificación unificada de los suelos.

Los límites líquido y plástico son determinados por medio de pruebas de laboratorio relativamente simples, que proporcionan información sobre la naturaleza de los suelos cohesivos. Las pruebas son utilizadas ampliamente por ingenieros para correlacionar algunos parámetros físicos del suelo, así como para su identificación. En el año 1932 Casagrande estudió la relación del índice de plasticidad respecto al límite líquido de una amplia variedad de suelos naturales. Con base en los resultados de pruebas, propuso una carta de plasticidad. Una de las características importante de esta carta es la línea A empírica dada por la ecuación  $PI = 0.73(LL -$

20). Esta línea separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos [3, 8]. Por otro lado, está la Línea B que separa las altas plasticidades de las bajas plasticidades a partir del valor de LL = 50%.

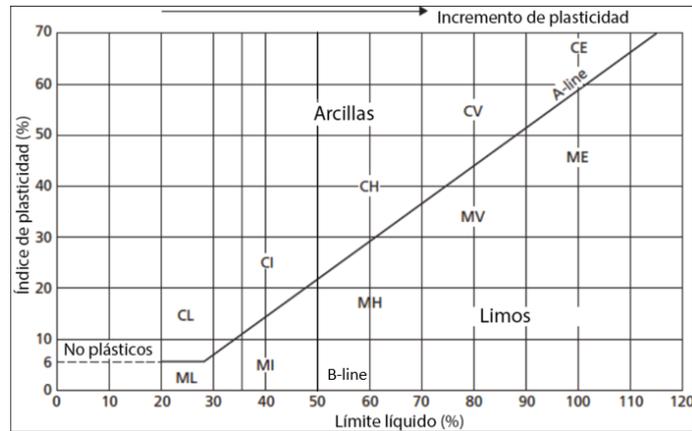


Figura 5. Carta de Plasticidad [4]

### 2.3 Clasificación de los Suelos

El suelo se denomina “fino” cuando más del 50% pasa el Tamiz número 200 (T200). Si esto no ocurre, el material será “granular” y es grava o arena [5].

- Los suelos finos se clasifican de la siguiente manera.

#### Prefijos

Tabla I Prefijos de clasificación de suelos [5]

M	Limo
C	Arcilla
O	Orgánico

#### Sufijos

Tabla II Sufijos de clasificación de suelos [5]

L	Baja plasticidad ( $W_L < 50\%$ )	En la Carta de Plasticidad L y H están separados por la línea B.
H	Alta plasticidad ( $W_L > 50\%$ )	
Se debe reportar este suelo		Suelos por debajo de la línea A.

Esta clasificación está basada solo en los Límites de Atterberg para la fracción que pasa el T40.

Tabla III Clasificación de los suelos [5]

<b>Grupo</b>	<b>Nombres típicos del material</b>
GW	Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino.
GP	Grava mal gradada, mezclas grava-arena, poco o ningún fino.
GM	Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.
GC	Grava arcillosa, mezclas grava-arena arcillosas.
SW	Arena bien gradada.
SP	Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.
SM	Arenas limosas, mezclas arena-limo.
SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.
ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas.
CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa).
OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos (ambiente marino, naturaleza orgánica silíceo), suelos elásticos.
CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.
Pt	Turba (carbón en formación) y otros suelos altamente orgánicos.

## 2.4 Propiedades de los Minerales de Arcilla

Los minerales de arcilla se encasillan en 3 grupos: caolinitas, montmorillonitas e illitas.

Las caolinitas, están formadas por una lámina silícica y otra alumínica, que se superponen indefinidamente. La unión entre todas las retículas es lo suficientemente firme que la penetración de moléculas de agua entre ellas no se logre. De esta forma, las arcillas caoliníticas serán relativamente estables en presencia de agua.

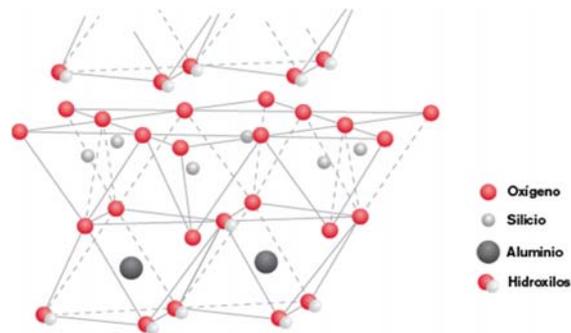


Figura 6. Estructura molecular de la caolinita [10]

Las montmorillonitas, están formadas por una lámina alumínica entre 2 silícicas, superponiéndose indefinidamente. En este caso la unión entre las retículas del mineral es débil, por lo que las moléculas de agua logran introducirse en la estructura con mayor facilidad, a causa de las fuerzas eléctricas generadas por su naturaleza dipolar. Lo anterior produce un incremento en el volumen de los cristales, lo que se traduce macro físicamente, en una expansión. Estas arcillas, especialmente en presencia de agua, presentan fuerte tendencia a la inestabilidad. Las bentonitas son arcillas del grupo montmorillonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas y presentan la expansividad típica del grupo en forma particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico.

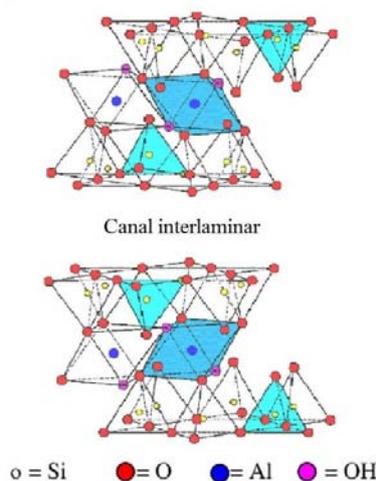


Figura 7. Estructura molecular de la montmorillonita [11]

Las ilitas, están estructuradas análogamente a las montmorillonitas, pero su constitución interna manifiesta tendencia a formar grupos de materia, que reducen el área expuesta al agua por unidad de volumen, por ello, su expansividad es menor que la de las montmorillonitas y en general, las arcillas ílticas se comportan mecánicamente en forma más favorable [6].

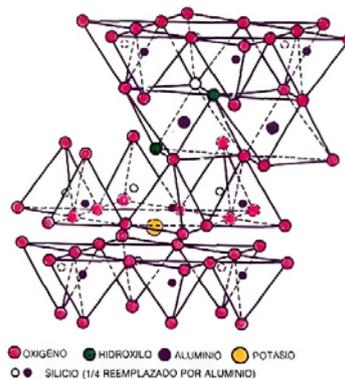


Figura 8. Estructura molecular de la illita [12]

En general, cuantos más minerales arcillosos estén presentes en el suelo, mayor será la plasticidad, compresibilidad y cohesión, pero la permeabilidad y el ángulo de fricción interna disminuyen. El comportamiento de las partículas de arcilla está fuertemente influenciado por las fuerzas superficiales, ya que el área superficial específica ( $S_e$ ) de las partículas muy finas alcanza valores significativos y están involucradas las fuerzas electroestáticas generadas en la superficie. El agua es fuertemente atraída por la superficie de los minerales arcillosos, lo que da lugar a plasticidad.

A continuación, se muestran rangos de valores de los límites de plasticidad para diferentes minerales de arcilla. A partir de estos valores puede afirmarse, acerca de los límites de Atterberg de los minerales arcillosos, que:

1. Tanto el límite líquido como el límite plástico para cualquiera de los minerales arcillosos pueden variar dentro de un amplio rango.

2. Para cualquier mineral de arcilla, el rango de valores de límite líquido es mayor que el rango de valores de límite plástico.
3. La variación en el límite líquido entre los diferentes grupos de arcillas es mucho mayor que la variación en los límites plásticos.
4. El tipo de catión adsorbido tiene mayor influencia en minerales de alta plasticidad que en minerales de baja plasticidad.
5. El incremento de la valencia del catión hace disminuir el valor del límite líquido de las arcillas expansivas, pero tiende a aumentar los valores del límite líquido de los minerales no expansivos.
6. La halosyta hidratada tiene un alto límite plástico poco habitual mientras que tiene un índice de plasticidad bajo.

Tabla IV. Valores de los límites de Atterberg para minerales de arcilla [1]

<b>Mineral</b>	<b>Límite Líquido (%)</b>	<b>Límite Plástico (%)</b>
Montmorillonita	100-900	50-100
Nontronita	37-72	19-27
Illita	60-120	35-60
Caolinita	30-110	25-40
Halosyta hidratada	50-70	47-60
Halosyta deshidratada	35-55	30-45
Atapulgita	160-230	100-120
Clorita	44-47	36-40

De esta forma, se puede observar que existe una amplia variación entre los límites de Atterberg de un mismo mineral arcilloso aún con el mismo catión de cambio. Gran parte de esa diferencia se debe al tamaño de las partículas y a la perfección de los cristales: cuantas más pequeñas son las partículas y cuanto más imperfecta es su cristalización, más plástico es el suelo [1].

Suelos que tengan el mismo valor de límite líquido o índice de plasticidad, pueden tener diferentes características a causa de la cantidad y tipo de minerales arcillosos que contengan.

## **2.5 Factores que Pueden Influir en los Resultados**

Partiendo del ensayo original desarrollado por Atterberg en 1911, donde la técnica del operador influía mucho en los resultados obtenidos, y la mecanización del ensayo por Casagrande en 1932, donde minimizó los errores del operador, las normas de todo el mundo han adoptado la cuchara de Casagrande como metodología para la obtención del límite líquido.

Sin embargo, a pesar de la normativa, se genera un importante número de errores en la ejecución del ensayo: la dificultad de realizar la ranura en ciertos suelos arenosos, la tendencia de los suelos de baja plasticidad a deslizar por la cuchara en lugar de fluir, sensibilidad de pequeñas diferencias en el aparato, la sensibilidad de la técnica del operador en realizar el ensayo, etc. La combinación de todos estos factores hace pensar en los problemas derivados del uso de este método, ya que los ensayos realizados sobre un mismo suelo pueden dar distintos resultados [1].

A continuación, se exponen algunos de los factores que han sido objeto de estudio.

### a) Secado.

Otro de los factores influyentes en los resultados de los ensayos del límite líquido es el secado al que se somete el suelo, previamente al machaqueo y tamizado del mismo en aquellos casos en que el suelo a ensayar se encuentra en tal estado que no es posible individualizar manualmente las partículas. Se ha observado, a raíz de diversos ensayos, que el secado en estufa produce una disminución apreciable del límite líquido en suelos orgánicos y algunos inorgánicos, por lo cual no debe usarse este tipo de secado para suelos orgánicos y en los inorgánicos con alto contenido de limo o arcilla. Incluso el secado al aire produce una variación sensible del límite líquido de este tipo de suelos. En algunos casos estas diferencias pueden dar valores de límite líquido inferiores al 30% de los valores obtenidos sobre suelos en estado natural [1].

b) Ranurador.

En la norma UNE 103-103-94, se hace referencia a un ranurador normalizado, el de Casagrande, con la posibilidad de usar otros dos: uno curvo de ASTM y el otro hueco de Hovanyi. Sin embargo, se ha demostrado en diversas investigaciones que dependiendo del ranurador usado se obtienen distintos resultados. El ranurador de Casagrande es, en general, el que debe usarse, pues con él se obtiene siempre la misma profundidad de surco. Mientras que el acanalador de la ASTM tiene el inconveniente de no controlar la altura de surco [1].

Existen otros factores que pueden afectar los resultados, pero para este proyecto en particular no son de interés.

### **3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

Para este proyecto se realizaron múltiples actividades. i) Previo a las pruebas se realizó un muestreo en los patios de lixiviación, con el objetivo de observar cuáles fueron los minerales que presentaban encharcamiento; ii) una vez identificados, se realizaron las pruebas con mineral curado con ácido sulfúrico al 90%, mismo que es el que se envía a patios de lixiviación, y con el cual se llevaron a cabo las pruebas de conductividad hidráulica.

### 3.1 Determinación del Límite Líquido

#### 3.1.1 Material y equipo de laboratorio

Para la obtención del Límite líquido se utilizó el equipo siguiente:

1. Cuchara Casagrande
2. Ranurador
3. Malla N°40
4. Capsula de porcelana
5. Espátula metálica
6. Balanza
7. Recipientes metálicos capaces de retener humedad
8. Horno



Figura 9. Material y equipo de laboratorio para la determinación del límite líquido

### 3.1.2 Calibración del equipo

Antes de cada prueba la cuchara Casagrande se debe calibrar utilizando el mango del acanalador que tiene esa medida, asegurándose que la altura de caída de la cuchara sea de 1 cm.

### 3.1.3 Preparación de la muestra vía seca en horno

Para este proyecto se probaron 2 diferentes formas de preparar la muestra, inicialmente se hizo vía seca de la siguiente forma:

- La muestra inicial se cuartea, para después tomar una muestra más pequeña representativa.
- Posteriormente la muestra se seca en el horno.
- Una vez seca la muestra se pasa manualmente por la malla N°40 hasta obtener aproximadamente 300 gr de muestra.
- Se separan 250 gr de muestra en una capsula de porcelana, para después agregar suficiente agua hasta saturarla.

### 3.1.4 Preparación de la muestra vía seca al sol

La segunda forma de preparar la muestra que se utilizó fue la siguiente:

- La muestra inicial se cuartea, para después tomar una muestra más pequeña representativa.
- Después la muestra se extiende en un área limpia al sol para que pierda la humedad que tenga (Figura 10).



Figura 10. Muestra extendida al sol

- Una vez seca la muestra se pasa manualmente por la malla N°40 hasta obtener aproximadamente 300 gr de muestra.
- Se separan 250 gr de muestra en una capsula de porcelana, para después agregar suficiente agua hasta saturarla.

### **3.1.5 Preparación de la muestra vía húmeda**

La preparación de la muestra vía húmeda es la siguiente:

- La muestra inicial se cuartea, para después tomar una muestra más pequeña representativa.
- Posteriormente se humedece, para después comenzar a deslamar la muestra por una malla N°40.
- Se deja reposar para que las arcillas y arenas se asienten.
- Después de 30 min. Aproximadamente se filtra la muestra.
- Se vuelve a cuartear y se prepara una muestra de 250 gr aproximadamente, en caso de ser necesario se puede humedecer hasta obtener la consistencia deseada.

### **3.1.6 Procedimiento**

Una vez lista la muestra se debe colocar la cuchara Casagrande en una superficie firme y horizontal previamente calibrada como se explicó anteriormente.

Una vez verificados estos puntos se procede a realizar los ensayos con la muestra de la siguiente forma:

- Se pesa uno de los contenedores de metal que retengan la humedad.
- Se coloca una porción de la muestra preparada en la cuchara Casagrande extendiéndola con la espátula de metal. Se debe evitar que queden burbujas de aire, luego se nivela de forma que quede horizontal con respecto al punto más bajo de la cuchara (Figura 11).



Figura 11. Muestra extendida en cuchara Casagrande

- Con ayuda del ranurador se divide la muestra a la mitad con un movimiento suave de arriba hacia abajo, la línea de división debe quedar bien marcada (Figura 12).



Figura 12. Muestra en cuchara Casagrande dividida

- Posteriormente se enciende la cuchara Casagrande, ésta debe dar 2 golpes por segundo, hasta que las 2 mitades se unan a una longitud de 13 mm. Se debe registrar el número de golpes que fueron necesarios para la unión de las 2 mitades.
- Se debe tomar la porción de la muestra donde se hizo la unión, para después pasarlo al contenedor de metal previamente pesado para ser pesado nuevamente.



Figura 13. Porción de muestra tomada para pesar

- La muestra tomada se lleva al horno y se deja secar hasta que ya no contenga humedad.
- Se pesa una vez más el contenedor con el fin de conocer el porcentaje de humedad que contenía la muestra.
- Se repite el paso hasta obtener 3 resultados que estén en los rangos de 15-20, 20-30, 30-35.

### 3.2 Determinación del Límite Plástico

#### 3.2.1 Material de laboratorio

Para la obtención del límite plástico se utilizó el siguiente material (Figura X):

1. Muestra preparada en vasos de precipitado.
2. Placa de vidrio.
3. Recipientes metálicos capaces de retener humedad.

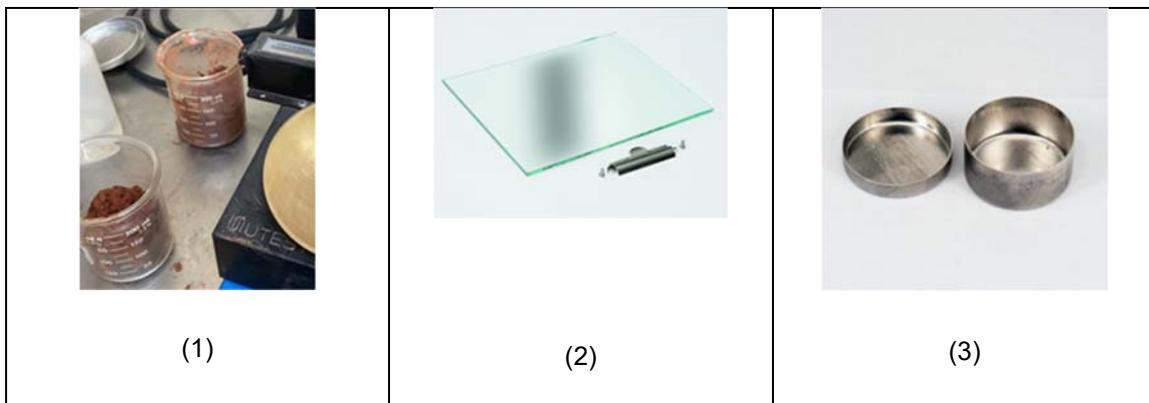


Figura 14. Material de laboratorio para la determinación del límite plástico

### 3.2.2 Procedimiento

Una vez la muestra esté preparada se procede a realizar la prueba de la siguiente manera:

- Se toma una muestra de aproximadamente 20 gr.
- Esta muestra se divide en 3 partes.
- Cada una de las muestras se moldea con los dedos y se hace girar sobre la placa de vidrio, para que pierda humedad, formando un cilindro con un diámetro de aprox. 3 mm.
- Si al alcanzar un diámetro el cilindro no se rompe en 3 secciones significa que aún no llega al límite plástico, en este caso se vuelve a juntar la muestra para volver a realizar los pasos anteriores.
- Al romperse el cilindro en 3 segmentos o presentar agrietamientos significa que llegó a su límite plástico.
- Las 3 muestras se introducen en un contenedor que retenga la humedad para posteriormente meterlo al horno y determinar la humedad que contiene la muestra (Figura 12).



Figura 15. Resultado final del moldeado de la muestra

En el caso de este ensaye, para lograr obtener las medidas de los cilindros se estuvo basando en un cilindro de metal que estaba incluida junto a la placa con las medidas necesarias, por lo que fue menos complicado obtener la muestra con las dimensiones necesarias, aun así se presentaron complicaciones a la hora de realizar la prueba, ya que cuando el material era muy arenoso se dificultaba más realizar estos cilindros, pero cuando la muestra se percibía más arcillosa se dificultaba manipular la muestra por la humedad que contenía, por lo que, para

quitarle un poco de humedad se dejaba la muestra al aire libre por unos minutos hasta alcanzar una consistencia que fuera más manipulable.

## **4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### 4.1 Resultados de Muestra Vía Seca

Los resultados fueron variables dependiendo de la preparación de la muestra que se utilizó, como se mencionó anteriormente las primeras pruebas se realizaron con la preparación de la muestra vía seca, en el caso de los primeros resultados se obtuvieron límites líquidos e índices de plasticidad bajos como se muestra en la Tabla V.

Tabla V. Resultados de prueba con muestra vía seca

Fecha	Identificación	Turno	LL	LP	IP	Conductividades (cm/seg)	Clasificación del suelo
29/08/2022	CV-13	1	29	23	7	0.03	CL-ML
30/08/2022	CV-13	1	29	24	5	0.066	CL-ML
31/08/2022	CV-13	1	37	25	12	0.068	ML-OL
31/08/2022	CV-13	2	26	21	6	0.043	CL-ML
01/09/2022	CV-15	1	27	24	3	0.051784658	ML-OL
01/09/2022	CV-15	2	25	32		0.050576183	
04/09/2022	CV-13	1	29	25	4	0.039441325	ML-OL
04/09/2022	CV-13	2	23	22	1	0.063393434	ML-OL
04/09/2022	CV-15	1	24	19	5	0.043219583	ML-OL
04/09/2022	CV-15	2	24	19	6	0.065330332	CL-ML
05/09/2022	CV-13	1	31	21	10	0.011386374	CL
05/09/2022	CV-13	2	24	19	5	0	ML-OL
05/09/2022	CV-15	1	26	23	3	0.050182115	ML-OL
05/09/2022	CV-15	2	25	18	6	0.052134217	CL-ML
06/09/2022	CV-13	1	29	25	4	0.019444684	ML-OL
06/09/2022	CV-13	2	28	24	4	0.05884947	ML-OL
06/09/2022	CV-15	1	27	23	4	0.030749713	ML-OL
06/09/2022	CV-15	2	27	22	5	0.025776785	CL-ML
09/09/2022	CV-13	2	32	22	10	0.049873508	CL
09/09/2022	CV-15	2	29	24	6	0.057531679	CL

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

IP= Índice de Plasticidad

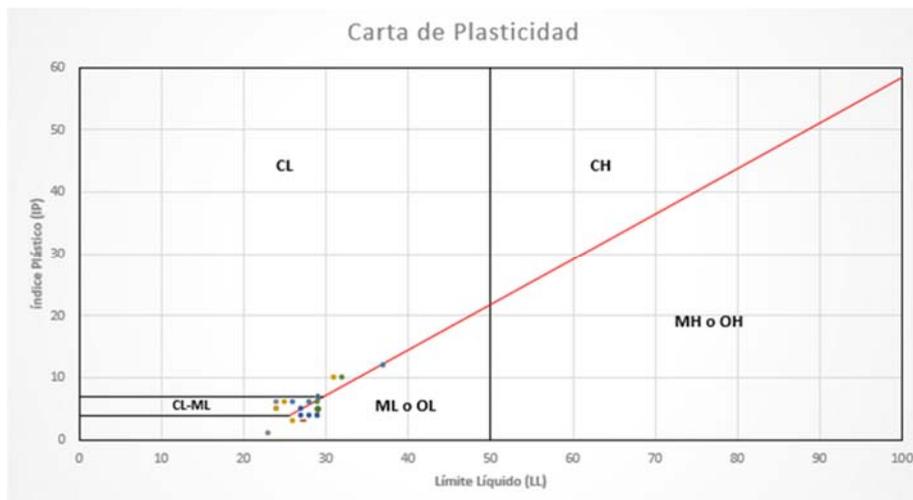


Figura 16. Resultados de prueba con muestras vía seca

Como se puede observar en la Tabla V, los valores del índice de plasticidad se mantuvieron en valores muy bajos, a excepción de algunos; los valores del límite líquido fueron un poco más variables, aun así, se mantuvieron en un rango de 18-32, con un promedio de 23. En el caso de las conductividades, éstos son los resultados obtenidos por muestra, los valores marcados con verde tendrían una alta conductividad, los amarillos media y por último los rojos presentarían baja conductividad, éstos son los rangos según los valores obtenidos que se manejan en la mina Cobre del Mayo, por lo que, en estos resultados se estuvo basando para intentar crear la correlación.

Al igual, es evidente que no es posible apreciar una tendencia en los valores del índice de plasticidad y los valores de la conductividad hidráulica. Se comenzó a observar una notoria acumulación de puntos en la Carta de Plasticidad, siendo limos (orgánicos e inorgánicos) y arcillas inorgánicas con bajas a medias plasticidades los suelos predominantes, estos datos al principio no parecieron malos, ya que era el comienzo de las pruebas, por lo que, se optó por seguir de la misma forma con muestras tomadas directamente del tajo, estos fueron los resultados:

Tabla VI. Resultados de prueba con muestras tomadas del tajo

Fecha	Identificación	LL	LP	IP	Clasificación del suelo
09/08/2022	F3B024	27	25	2	ML-OL
09/08/2022	F3B024 R	28	22	6	ML-OL
09/08/2022	F3B086	29	24	6	ML-OL
09/08/2022	F3B024 - 4h	27	24	3	ML-OL
09/08/2022	F3B024 R - 4h	25	22	1	ML-OL
09/08/2022	F3B086 - 4h	29	21	8	ML-OL

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

IP= Índice de Plasticidad

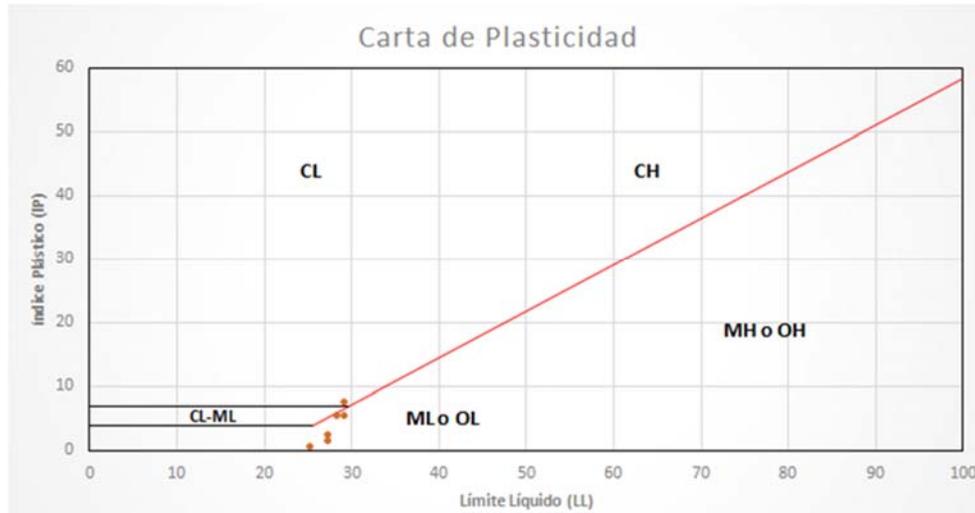


Figura 17. Resultados de prueba con muestras tomadas del tajo

Como se puede observar, tanto en la Tabla VI, como en la Figura 13, los resultados del índice de plasticidad fueron bajos, dando resultados muy similares a las muestras anteriores, por lo que, se comenzó a preparar la muestra vía húmeda, ya que, con los resultados obtenidos hasta este momento, se creía que la muestra podría verse afectada al secarse (ya sea en horno o al aire libre bajo el sol).

#### 4.2 Resultados de muestra vía húmeda

Al realizar las pruebas nuevamente con una preparación de muestra diferente, obtuvimos los siguientes resultados:

Tabla VII. Resultados de la primera prueba con muestra vía húmeda

Fecha	Identificación	Turno	LL	LP	IP	Conductividades (cm/seg)	Clasificación del suelo
19/09/2022	CV-13	1	35	23	11	0.018	CL
19/09/2022	CV-13	2	33	20	12	0.044	CL
19/09/2022	CV-15	1	32	22	10	0.025	CL
19/09/2022	CV-15	2	35	21	14	0.044	CL
02/10/2022	CV-13	1	35	21	14	0.041875562	CL
03/10/2022	CV-13	1	41	22	19	0.051154112	CL
03/10/2022	CV-13	2	39	19	20	0.076955528	CL
04/10/2022	CV-13	1	47	29	19	0.01	ML-OL
04/10/2022	CV-13	2	47	29	21	0.068271831	CL
04/10/2022	CV-15	1	44	28	16	0.001	ML-OL
04/10/2022	CV-15	2	46	29	17	0.001	ML-OL

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

IP= Índice de Plasticidad

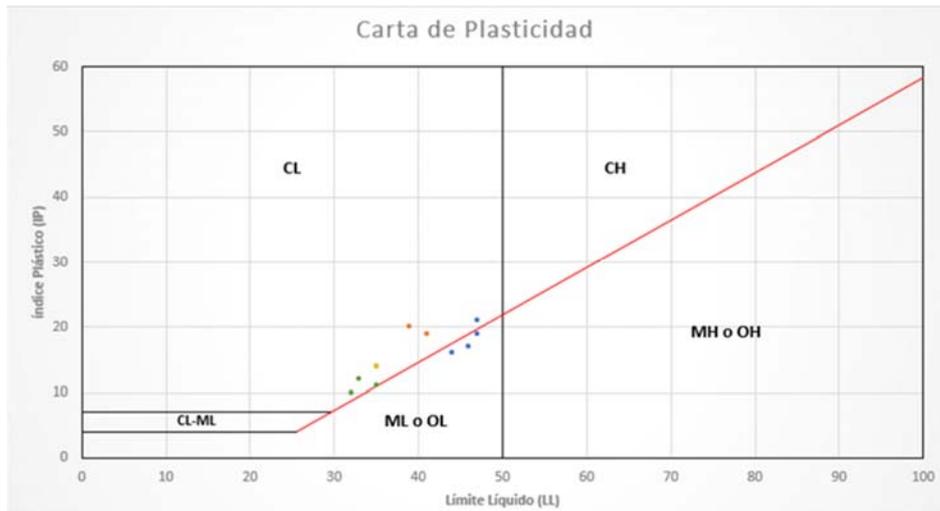


Figura 18. Resultados de la primera prueba con muestras vía húmeda

Como se puede observar en la Tabla VII, los valores tanto del límite líquido como del índice de plasticidad comenzaron a variar, por lo que se lograron valores un poco más altos comparados con los obtenidos en las muestras preparadas vía seca, hasta este momento aún no se podía observar una correlación entre el índice de plasticidad y la conductividad hidráulica.

Al observar que los resultados comenzaron a variar y estar más dispersos por el contrario de las muestras vía seca, que se concentraron en un mismo punto, se siguió con el mismo procedimiento, al preparar la muestra y realizar los ensayos, ya que se percibieron más fiables estos resultados; a pesar de estar más dispersos, en su clasificación, seguían siendo el mismo tipo de suelo que los resultados anteriores, aun así, continuamos con los ensayos obteniendo los siguientes resultados:

Tabla VIII. Resultados de segunda prueba con muestra vía húmeda

Fecha	Identificación	Turno	LL	LP	IP	Conductividades (cm/seg)	Clasificación del suelo
11/10/2022	CV-13	1	51	27	24	0.056510316	CH
11/10/2022	CV-13	2	41	27	14	0.067206912	ML-OL
11/10/2022	CV-15	1	53	21	32	0.030842333	CH
11/10/2022	CV-15	2	41	23	18	0.061991684	CL
16/10/2022	CV-13	1	46	25	21	0.032264082	CL
16/10/2022	CV-13	2	48	26	22	0.065361235	CL
17/10/2022	CV-13	2	44	21	24	0.064704004	CL
17/10/2022	CV-15	2	49	24	25	0.055421805	CL
17/10/2022	CV-15 Rsd	2	42	26	16	0.055421805	CL
19/10/2022	CV-13	1	49	27	22	0.052064868	CL
19/10/2022	CV-13 Rsd	1	47	28	19	0.052064868	ML-OL
22/10/2022	CV-13	2	46	25	21	0.059385989	CL
24/10/2022	CV-13	1	44	23	21	0.040634713	CL
24/10/2022	CV-13 Rsd	1	46	22	24	0.040634713	CL
24/10/2022	CV-15	1	48	22	26	0.046173317	CL
25/10/2022	CV-13	1	45	27	18	0.018129543	ML-OL
25/10/2022	CV-13	1	46	27	19	0.018129543	CL
26/10/2022	CV-13	1	45	23	22	0.01462155	CL
30/10/2022	CV-13	1	45	23	22	0.055684467	CL
30/10/2022	CV-13	2	49	22	27	0.059520524	CL

LL= Límite Líquido

LP= Límite Plástico

IP= Índice de Plasticidad

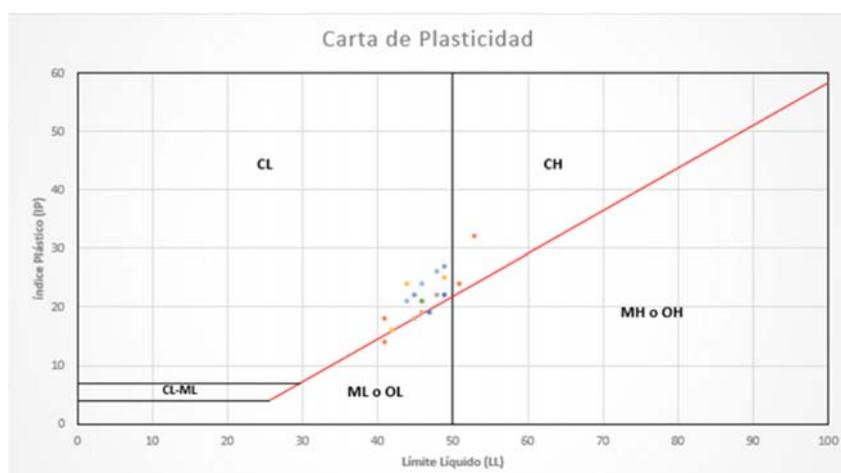


Figura 19. Resultados de la segunda prueba con muestra vía húmeda

En este caso, los valores se mantuvieron similares a los anteriores, en la Figura 15 se pueden observar 2 puntos en particular, cayendo en la clasificación CH, la cual indica ser una arcilla inorgánica de alta plasticidad. Por otro lado, se puede observar en la Tabla VIII, como se intentó observar si los valores del índice de plasticidad comparados con los de la conductividad hidráulica mostraban alguna tendencia, pero esto no fue posible, ya que los valores fueron muy variantes.

Finalmente se intentó observar de forma gráfica la relación que había entre los valores del índice de plasticidad y la conductividad hidráulica, ya que en cuestión de números no logramos observar una tendencia, el resultado se muestra en la Figura 16.

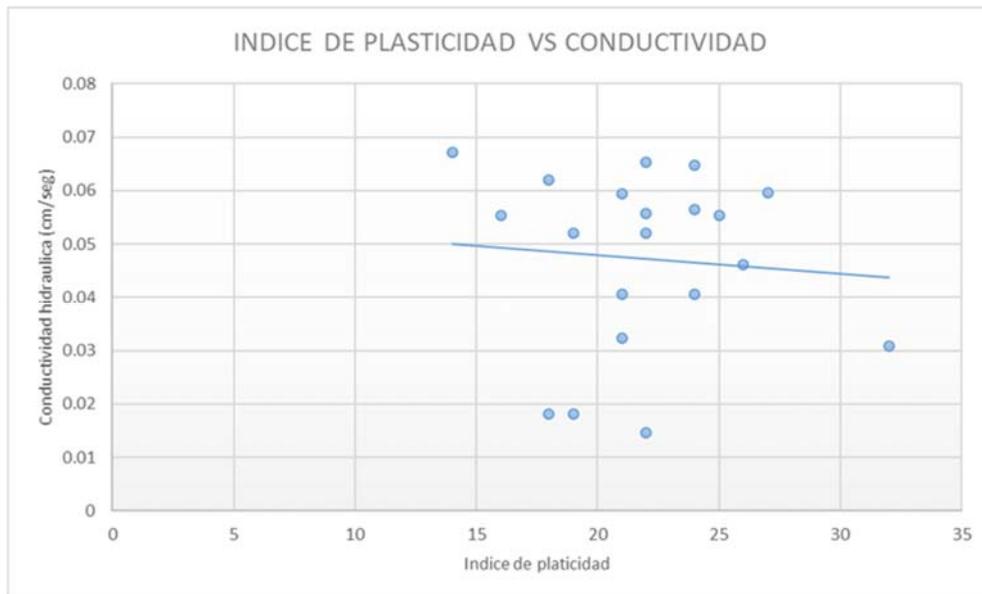


Figura 20. Correlación Índice de Plasticidad – Conductividad Hidráulica

Se puede observar que el gráfico no muestra ningún tipo de correlación entre los valores indicados, ya que, al intentarse crear una línea de tendencia ninguna se pudo adaptar a los puntos, por lo que, se puede concluir que en este caso no existe correlación entre el índice de plasticidad y la conductividad hidráulica.

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **5.1 Conclusiones**

Se pudo observar que el mineral de estudio mostró un comportamiento muy similar a pesar de la variación en la preparación de la muestra, la mayoría de resultados se clasificaron como limos orgánicos e inorgánicos y arcillas inorgánicas, todas con plasticidad de baja a media, esto no permitió crear la correlación con la conductividad hidráulica, pues se tenía la teoría de que entre mayor plasticidad existiera en el mineral, el encharcamiento era más probable, pero como se pudo observar en los resultados mostrados anteriormente, no se presentó ninguna tendencia entre los valores de estos dos factores, ya que hay minerales con límites plásticos altos y una conductividad hidráulica alta; por otra parte, a pesar de que los límites plásticos observados fueron altos, al graficarse con el límite líquido siguieron cayendo en las mismas clasificaciones, dando como resultado plasticidades de bajas a medias como se dijo anteriormente.

## **5.2 Recomendaciones**

Como recomendación para futuras pruebas se puede tomar en cuenta la preparación de las muestras, realizarlas con mayor control en el ambiente, al igual se pueden preparar con mineral que no esté procesado con químicos, en este caso se utilizó un mineral curado con ácido sulfúrico, por lo que es un factor que pudo alterar su comportamiento.

Es posible tomar en cuenta otros factores para analizar con profundidad el comportamiento del mineral en patios de lixiviación, entre los que se encuentran la relación de finos y gruesos, en este estudio, no fue tomado en cuenta, pero puede ser de utilidad para intentar predecir los casos en que se presentaría encharcamiento.

Finalmente, es posible que las características de las arcillas presenten alteraciones al ser tratadas previo a la toma de la muestra con ácido sulfúrico, por lo que se

recomienda hacer una caracterización de las arcillas contenidas en el mineral antes y después del proceso, esto sería de gran utilidad ya que puede ser identificada cualquier alteración química en las arcillas que pudiera presentarse y de esta manera observar si este es un factor que influye en los ensayos tanto de Límite Líquido como de Límite Plástico, o directamente en el problema de encharcamiento.

### **5.3 Conclusión Personal**

Como conclusión personal, puedo exponer que gracias a las diferentes materias que cursé durante la carrera universitaria pude poner en práctica los conocimientos adquiridos, una de las principales materias fue caracterización de minerales y los 2 cursos de análisis de minerales que me fueron impartidos, ya que con ayuda de los conocimientos adquiridos pude clasificar y reconocer el tipo de mineral con el que estuvimos trabajando. Al igual, los conocimientos de materias como hidrometalurgia y laboratorio de metalurgia IV y V fueron fundamentales para lograr entender el proceso que se lleva a cabo en la mina; al igual que conocer más el proceso de lixiviación, para lograr ver el problema de encharcamiento más a detalle. En general puedo decir que, muchas de las materias cursadas fueron puestas en práctica en mi estancia de prácticas profesionales.

Realizar mis prácticas en la mina Cobre del Mayo, me ayudó no solo a poner en práctica los conocimientos que me brindó la Universidad de Sonora, si no que pude adquirir más conocimientos y aprender a trabajar de distintas formas, al igual pude conocer de cerca los procesos que se llevan a cabo, desde la obtención del mineral hasta ver de cerca cómo es que se emplea la lixiviación en patios, los requerimientos técnicos de los patios para que se puedan poner en marcha, al igual que conocer el proceso de purificación y recuperación del metal.

Por otro lado, creo que mi participación en este proyecto fue de provecho para la empresa, ya que, con los procedimientos empleados, con las pruebas y los ensayos hechos, ya se tiene una base sobre la cual seguir trabajando para lograr crear la correlación que se tenía como objetivo, al igual que se pueden tomar las recomendaciones que se sugirieron anteriormente para los y las futuras practicantes que continúen con este proyecto.

## **6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] Santín, P., & Alberto, J. (2005). Influencia de la temperatura en el límite líquido para suelos con diferentes índices de plasticidad. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/2099.1/3282/5/53973-5.pdf>
- [2] Límite plástico. (s. f.). Geotecnia y Mecánica de Suelos. <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/glosario/limite-plastico/>
- [3] Glosarios@servidor-alicante.com. (n.d.-b). Carta de plasticidad de Casagrande (Geotecnia). Glosarios Especializados. <https://glosarios.servidor-alicante.com/geotecnia/carta-de-plasticidad-de-casagrande>
- [4] Carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Fuente-Modificado-de-Craig-y-Knappett\\_fig1\\_343385605](https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Carta-de-plasticidad-de-Casagrande-Fuente-Modificado-de-Craig-y-Knappett_fig1_343385605)
- [5] Duque-Escobar, G., & Escobar P, C. E. (2016). Geomecánica. Geomecánica, Manizales, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/57121/geomecanica.pdf>
- [6] Melero Sandoval, P. C. (2015). Análisis del efecto térmico en la estructura de arcillas de chulucanas por difracción de rayos-x, refinamiento Rietveld y técnicas complementarias. Universidad Nacional Mayor De San Marcos. [https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4658/Melero\\_sp.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/4658/Melero_sp.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [7] Obtención del límite líquido: <https://www.youtube.com/watch?v=HTmOBK03eGU&t=523s>
- [8] Carta de plasticidad: <https://www.youtube.com/watch?v=rMF4dPMDEj4&t=161s>

- [9] Anónimo. (2007). Métodos de Muestreo y Prueba de Materiales. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-07-07.pdf>
- [10] Estructura Caolinita - Naukas. (2014, 9 julio). Naukas. <https://naukas.com/2014/07/11/la-desafortunada-estrategia-de-marketing-de-un-desodorante/estructura-caolinita/>
- [11] Arcilla Montmorillonita - onlinestores.salescheap2023.com. (s. f.). <https://onlinestores.salescheap2023.com/category?name=arcilla%20montmorillonita>
- [12] Análisis próximo de arcillas para cerámica. (2003). Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

