

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

En la ingeniería civil, comprender el comportamiento del suelo es un aspecto esencial para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras. En este contexto, los ensayos in situ, como el SPT (Standard Penetration Test) y el DPSH (Dynamic Probing Super Heavy), se han consolidado como herramientas fundamentales en la caracterización geotécnica del subsuelo.

El ensayo SPT es ampliamente reconocido a nivel internacional por su capacidad para proporcionar datos clave sobre la resistencia del terreno, así como para obtener muestras alteradas que permiten su análisis y clasificación según sistemas estandarizados. Sin embargo, su aplicación conlleva un considerable requerimiento de recursos, tanto en términos de tiempo como de costos operativos, lo que limita su uso en proyectos de gran escala o en estudios preliminares donde se requieren múltiples puntos de muestreo.

Ante estas limitaciones, el ensayo DPSH surge como una alternativa eficiente y económica. Aunque no permite la extracción de muestras, su facilidad de ejecución y rapidez lo convierten en una opción valiosa, especialmente en estudios exploratorios. Además, su menor costo operativo permite ampliar la cobertura de puntos de muestreo, proporcionando una caracterización más extensa y representativa del subsuelo en comparación con métodos más costosos.

Diversos estudios previos han demostrado la existencia de correlaciones estadísticamente significativas entre los resultados del SPT y el DPSH, lo que ha facilitado su aplicación conjunta en varias regiones. Sin embargo, en Bolivia, y en particular en la ciudad de Tarija, aún no se ha validado una correlación específica entre ambos ensayos. Esta falta de una correlación localmente ajustada es una limitación técnica importante, dado que las condiciones geológicas y geotécnicas de la región pueden diferir considerablemente de aquellas consideradas en correlaciones desarrolladas en otros contextos.

## **1.2. Justificación**

La presente investigación tiene como objetivo abordar una necesidad técnica y operativa dentro del ámbito de la geotecnia local, al establecer una correlación estadísticamente confiable entre los resultados obtenidos mediante los ensayos DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) y SPT (Standard Penetration Test) en los suelos arcillosos de la ciudad de Tarija.

Este trabajo responde a una problemática recurrente en los estudios geotécnicos: la dificultad de aplicar de manera exclusiva el ensayo SPT en todas las fases de un proyecto debido a limitaciones presupuestarias, logísticas o de tiempo. En estos casos, el ensayo DPSH se presenta como una alternativa viable, siempre que se cuente con una ecuación de conversión técnica, fundamentada y adaptada a las condiciones geotécnicas locales.

Es relevante destacar que la normativa boliviana vigente en materia de estudios geotécnicos permite la sustitución parcial de los ensayos directos por métodos dinámicos de auscultación, como el DPSH, siempre que se cumplan ciertos criterios técnicos establecidos. En este contexto, la investigación se alinea con esta normativa, proponiendo un modelo de correlación específicamente diseñado para los suelos de la ciudad de Tarija, que permita llevar a cabo dicha sustitución de forma segura, eficiente y acorde con las características particulares del terreno local.

## **1.3. Identificación del problema**

En la ciudad de Tarija, los estudios geotécnicos preliminares dependen en gran medida del ensayo SPT, un método reconocido internacionalmente, pero que conlleva tiempos de ejecución largos y costos elevados. En cambio, el ensayo DPSH se presenta como una alternativa más accesible y económica, lo que lo hace adecuado para ampliar la cobertura de puntos de muestreo. Aunque existen correlaciones desarrolladas en otras regiones, estas no son completamente representativas para los suelos de Tarija. La presente investigación busca establecer una ecuación de correlación que, al ser adaptada a las condiciones geotécnicas locales, permita utilizar el DPSH de forma más confiable y efectiva en los estudios de caracterización del subsuelo de la ciudad.

#### **1.4. Hipótesis**

Se plantea que existe una correlación estadísticamente significativa entre los resultados obtenidos del ensayo DPSH y los del ensayo SPT en los suelos arcillosos de la ciudad de Tarija. Esta correlación permitirá predecir de manera confiable los valores del SPT a partir de los datos generados por el DPSH, utilizando una ecuación de ajuste específica, desarrollada y validada para las condiciones particulares de la región.

#### **1.5. Variables dependientes e independientes**

- **Variable independiente:** Número de golpes del ensayo DPSH
- **Variable dependiente:** Número de golpes del ensayo SPT

#### **1.6. Objetivos**

##### **1.6.1. Objetivo general**

Establecer una correlación entre los resultados del ensayo SPT y del ensayo DPSH en suelos arcillosos de la ciudad de Tarija, mediante el uso de modelos de regresión estadística aplicados a datos obtenidos en campo, con el propósito de generar una ecuación específica geotécnica local.

##### **1.6.2. Objetivos Específicos**

- Obtener datos de los ensayos SPT y DPSH mediante la realización de pruebas en los 30 puntos de muestreo
- Caracterizar las muestras obtenidas de los puntos de muestreo a través de ensayos de laboratorio
- Identificar el tipo de suelo en cada punto de ensayo según la clasificación SUCS
- Determinar si existe una correlación entre los resultados de los ensayos SPT y DPSH.
- Aplicar distintos modelos de regresión a los datos obtenidos
- Analizar el modelo de regresión que mejor se ajuste a los datos obtenidos
- Validar las ecuaciones obtenidas para cada tipo de suelo encontrado

### **1.7. Alcance de la investigación**

El presente estudio se enfoca en desarrollar una correlación estadística confiable entre los valores de golpe obtenidos en los ensayos SPT (Standard Penetration Test) y DPSH (Dynamic Probing Super Heavy), aplicada específicamente a suelos arcillosos de la ciudad de Tarija. Para ello, se incluye la caracterización de los suelos mediante ensayos de laboratorio, la formulación de modelos matemáticos de regresión que describan la relación entre ambos métodos de penetración, y la validación estadística de dichas correlaciones.

La investigación adopta un enfoque de tipo correlacional y se basa en una muestra de 30 puntos distribuidos estratégicamente en distintas zonas de la ciudad, con ensayos realizados hasta una profundidad máxima de 3.5 metros por punto. Adicionalmente, se contemplan análisis diferenciados según el tipo de arcilla (alta, baja plasticidad y arcilla limosa), con el propósito de generar ecuaciones de ajuste más precisas por clasificación de suelo. De este modo, se pretende contribuir con una herramienta técnica localmente calibrada que permita el uso complementario o parcial del DPSH, optimizando recursos en los estudios geotécnicos de la región.

## **CAPÍTULO II**

### **CORRELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE GOLPES DEL SPT Y DEL DPSH EN SUELOS ARCILLOSOS**

#### **2.1. Suelos Arcillosos**

El suelo, en el sentido ingenieril, es un aglomerado de minerales, materia orgánica y sedimentos, relativamente sin cohesión depositado sobre el lecho de roca.

Una vez conocido el concepto general de suelos vamos a centrarnos en esta investigación a el tipo de suelo estudiado en esta investigación que son los suelos arcillosos.

##### **2.1.1. Arcillas**

Las arcillas son en su mayoría partículas en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales. Las arcillas se definen generalmente como partículas menores de 0.002 mm. En algunos casos las partículas de tamaño entre 0.003 y 0.005 mm también. Las partículas se clasifican como arcilla sobre la base de su tamaño, ya que no pueden contener necesariamente minerales de arcilla. Las arcillas se definen como aquellas partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim, 1953, citado por Das, 2013, p.28).

Esto nos quiere decir que el tamaño de las partículas no define que se trate de una arcilla, ya que la característica de las arcillas es la plasticidad.

##### **2.1.2. Propiedades fundamentales de las arcillas**

El tamaño y la constitución son las características más visibles que condicionan las propiedades de las fracciones.

Se demostró que las propiedades químicas, físicas y aun las biológicas, dependen de la fracción arcilla. La arena y el limo poseen muy poca actividad superficial y contribuyen escasamente en el balance de las propiedades del suelo. Esta actividad reducida se debe no solo al tamaño de las partículas sino a su constitución química estructural.

A menor tamaño, mayor es la superficie específica y más intensas son las propiedades. La arcilla es más activa que la arena y el limo; éste, aunque de actividad reducida, tiene más que la arena (Besoain, 1985, p27).

### 2.1.3. Mineralogía de los suelos arcillosos

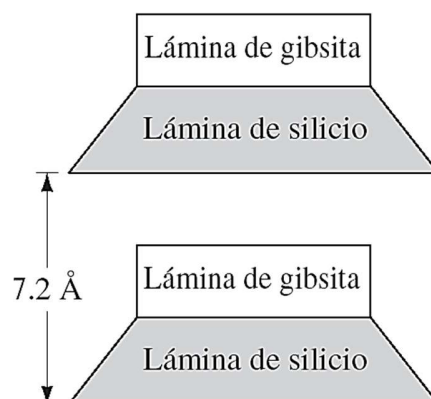
La mineralogía de los suelos arcillosos juega un papel crucial en sus propiedades físicas y mecánicas, lo que tiene un impacto directo en su comportamiento bajo condiciones de carga. Las arcillas están compuestas principalmente por partículas minerales de tamaño muy fino, que suelen ser menores a 2 micrómetros.

Los minerales más comunes en los suelos arcillosos son la caolinita, la ilita y la montmorillonita. Cada uno de estos minerales tiene características específicas que influyen en el comportamiento del suelo:

#### 2.1.3.1. Caolinita

Este mineral consiste de capas repetidas de láminas de silicio-gibsita elementales, como se muestra en la figura. Cada capa es de aproximadamente 7.2 Å de espesor. Las capas se mantienen unidas por enlaces de hidrógeno. La caolinita produce como plaquetas, cada una con una dimensión lateral de 1000 a 20000 Å y un espesor de 100 a 1000 Å. El área de la superficie de las partículas de caolinita por unidad de masa es aproximadamente 15 m<sup>2</sup>/g. El área de superficie por unidad de masa se define como superficie específica.

**Figura 2.1 Diagrama de estructura de la caolinita**

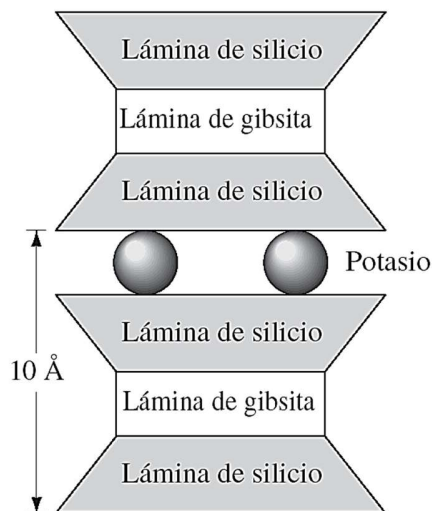


**Fuente:** Das, 2013.

### 2.1.3.2. Iilita

Este mineral consiste de una lámina de gibbsita unida a dos láminas de silicio, una en la parte superior y otra en la parte inferior (figura). A veces se llama arcilla micácea. Las capas de ilita están unidas entre sí por iones de potasio. La carga negativa para equilibrar los iones de potasio proviene de la sustitución de aluminio por alguno de silicio en las láminas tetraédricas. La sustitución de un elemento por otro sin ningún cambio en la forma cristalina se conoce como sustitución isomorfa. Las partículas de ilita tienen generalmente dimensiones laterales que van de 1000 a 5000 Å, y espesores de 50 a 500 Å. La superficie específica de las partículas es de aproximadamente 80 m<sup>2</sup>/g.

**Figura 2.2 Diagrama de estructura de la ilita.**

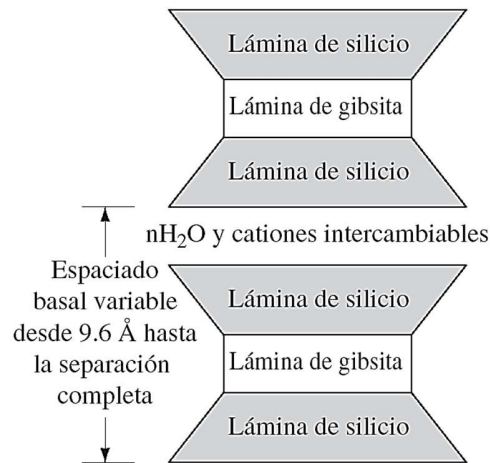


**Fuente:** Das, 2013.

### 2.1.3.3. Montmorillonita

Este mineral tiene una estructura similar a la ilita, es decir, una lámina de gibbsita intercalada entre dos láminas de silicio. En la montmorillonita existe sustitución isomorfa de magnesio y hierro para el aluminio en las láminas octaédricas. Aquí no están presentes los iones de potasio, como en el caso de la ilita, y una gran cantidad de agua es atraída al espacio entre las capas. Las partículas de montmorillonita tienen dimensiones laterales de 1000 a 5000 Å y espesores de 10 a 50 Å. La superficie específica es de aproximadamente 800 m<sup>2</sup>/g (Das, 2013, p.29).

**Figura 2.3 Diagrama de estructura de la montmorillonita.**



**Fuente:** Das, 2013.

#### **2.1.4. Capacidad de absorción de agua en suelos arcillosos**

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el absorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas absorbido, denominado absorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de absorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua en arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso (García Romero & Suárez Barrios, 2002, p.9).

De este modo quiere decir que su capacidad de absorción en algunos tipos de arcilla es tal que el peso de agua absorbida supera a su peso propio de la arcilla en estado seco.

#### **2.2. Caracterización del suelo**

El proceso de caracterización en este proyecto abarcó tanto ensayos de laboratorio como pruebas de campo. En el laboratorio, se determinaron propiedades índices como el

contenido de humedad, la granulometría para obtener la distribución de tamaños de partícula y los límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) para evaluar la consistencia y plasticidad del suelo.

### **2.2.1. Contenido de humedad**

El contenido de agua de un suelo o contenido de humedad es la relación entre el agua contenida en el mismo y el peso de su fase sólida, y se expresa en forma de porcentaje.

Este puede variar entre 0 e  $\infty$  dependiendo de las condiciones de humedad del sitio donde se localice el suelo (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005, p.54).

La cantidad de agua se obtiene mediante la diferencia de peso entre el suelo en estado natural y el suelo secado en horno. La relación que expresa la humedad de un suelo es la siguiente:

$$w\% = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Donde:

$W_w$ = Peso del agua en la muestra

$W_s$ = Peso del suelo seco

#### **2.2.1.1. Método de secado al horno**

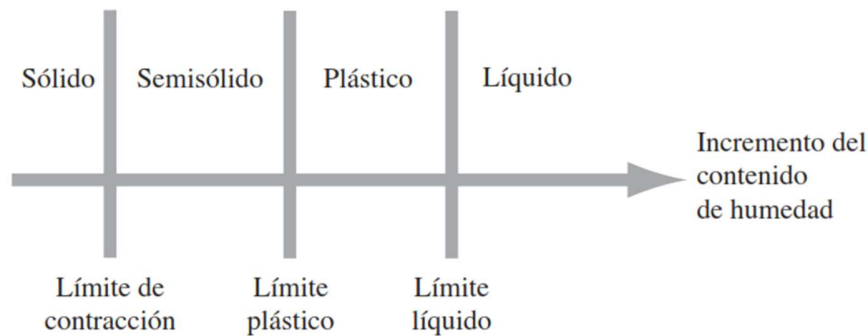
Este es el método más preciso para obtener el grado de humedad en porcentaje, y consiste en introducir en el horno eléctrico una muestra representativa del suelo en un recipiente de aluminio previamente pesado, el tiempo en el horno es de 24 hrs, para luego retirarlo del horno y proceder a su pesado nuevamente.

### **2.2.2. Límites de Atterberg**

Cuando los minerales de arcilla están presentes en el suelo de grano fino el suelo se puede remover en presencia de algo de humedad sin que se desmorone. Esta naturaleza cohesiva se debe al agua absorbida que rodea a las partículas de arcilla. En 1900, un científico sueco llamado Albert Mauritz Atterberg desarrollo un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con diferentes contenidos de humedad. Con un contenido de humedad muy bajo, el suelo se comporta más como un sólido quebradizo. Cuando el

contenido de humedad es muy alto, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido. Por lo tanto, sobre una base arbitraria, dependiendo del contenido de humedad, la naturaleza del comportamiento del suelo puede ser dividido en cuatro estados básicos: sólido, semisólido, plástico y líquido, como muestra la figura.

**Figura 2.4 Límites Atterberg**



**Fuente:** Das, 2013.

El contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el que se lleva a cabo la transición del estado sólido al estado semisólido se define como el límite de contracción. El contenido de humedad en el punto de transición del estado semisólido al estado plástico es el límite plástico, y del estado plástico al estado líquido es el límite líquido. Estos límites son también conocidos como límites Atterberg (Das, 2013, p.64).

Por lo tanto, la consistencia describe la dureza o suavidad del suelo en diferentes estados de humedad, y está directamente relacionada con la plasticidad. La consistencia de un suelo arcilloso puede variar desde muy blando cuando está saturado, hasta muy duro cuando está seco. Para la realización de esta investigación en los límites de Atterberg se utilizaron las normas ASTM-D 4318 y BS-1377, ambas normas están validadas en la norma boliviana de estudios geotécnicos.

- **Límite Líquido (LL):** Es el contenido de agua a partir del cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado líquido. En este punto, el suelo pierde su resistencia al corte y se comporta más como un líquido que como un sólido.
- **Límite Plástico (LP):** Es el contenido de agua a partir del cual el suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico, donde se puede moldear sin desmoronarse.

- **Índice de plasticidad (IP):** El índice de plasticidad se expresa con el porcentaje del peso en seco de la muestra del suelo, e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico.

### 2.2.3. Determinación de consistencia de los suelos

Para el proyecto se usó dos métodos para la obtención de este límite: método cuchara de Casagrande y cono de penetración, estos ensayos están bajo la norma ASTM D-4318 y BS-1377 respectivamente. Ambos ensayos están aprobados por la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos.

#### 2.2.3.1. Ensayo bajo la norma ASTM D-4318

El análisis de plasticidad, según la norma ASTM D-4318, es un procedimiento estándar utilizado en la mecánica de suelos para determinar los límites de Atterberg (límite líquido, límite plástico y límite de contracción) y, a partir de estos, el índice de plasticidad de un suelo. Estos valores ayudan a clasificar el suelo y predecir su comportamiento, especialmente en suelos arcillosos donde la plasticidad influye en la estabilidad y resistencia.

**Figura 2.5 Aparato de Casagrande**



**Fuente:** Utest

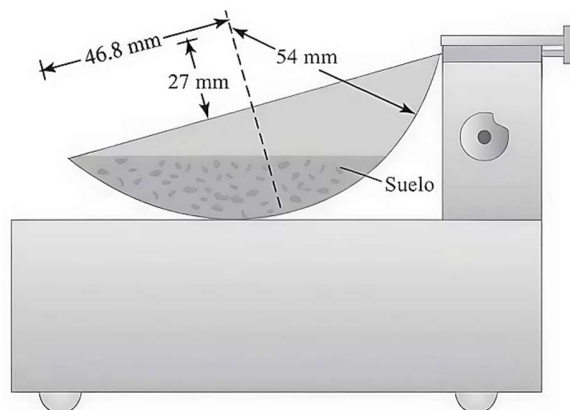
#### 2.2.3.1.1 Determinación del límite plástico (LP)

Este ensayo consiste en medir el contenido de humedad para el cual un cilindro de suelo no es posible modelar, dicho cilindro tiene un diámetro aproximado de 3 mm. Para esto se realiza una mezcla de suelo y agua, la cual se amasa con los dedos en una superficie de vidrio, hasta conseguir el cilindro. Al llegar al diámetro, se desarma el cilindro y se repite el procedimiento, hasta lograr de nuevo el cilindro de 3 mm. Esto se realiza hasta que ya no se pueda formar el cilindro de la dimensión deseada. Con este contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad). Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico.

#### 2.2.3.1.2 Determinación del límite líquido (LL)

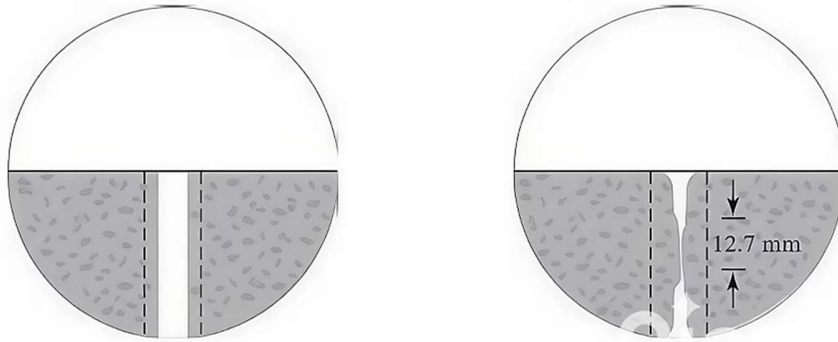
El límite líquido (LL) se determina utilizando un aparato especial conocido como "Casagrande". Este aparato consiste en una taza metálica que se eleva y deja caer repetidamente desde una altura estandarizada. El procedimiento comienza colocando una muestra de suelo en la cuchara y formando una ranura en el centro. Luego, se deja caer la taza mediante el mecanismo de manivela, y el número de golpes que se requieren para cerrar la ranura se registra. El límite líquido se determina en función del contenido de agua a partir del cual el suelo necesita 25 golpes para cerrar la ranura en la muestra.

**Figura 2.6 Dispositivo de límite líquido**



**Fuente:** Das, 2013

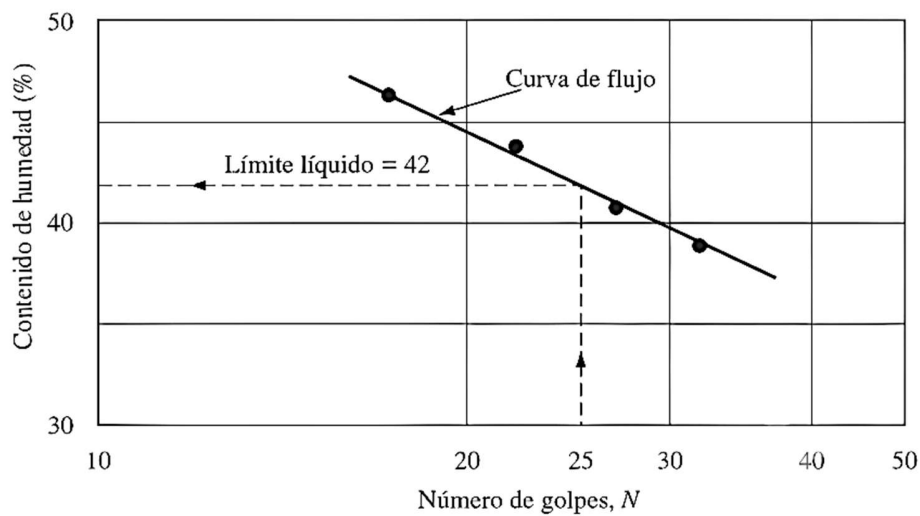
**Figura 2.7 Porción de suelo antes y después de la prueba.**



**Fuente:** Das, 2013

Se traza una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, como se muestra en la figura, y se interpola para la humedad correspondiente a 25 golpes.

**Figura 2.8 Curva flujo para la determinación del límite líquido de una arcilla.**



**Fuente:** Das, 2013.

### 2.2.3.2. Ensayo bajo la norma BS-1377

La norma BS 1377 permite determinar los límites de consistencia del suelo, también conocidos como límites de Atterberg, empleando el método del cono de penetración como alternativa al método de Casagrande. Este procedimiento es particularmente útil en la ingeniería geotécnica, ya que permite una medición precisa y uniforme del límite líquido

(LL) mediante el uso de un cono estandarizado, eliminando las variaciones que pueden surgir en el método de golpes.

#### 2.2.3.2.1 Límite líquido (LL) con el cono de penetración

Para determinar el límite líquido utilizando el cono de penetración, se usa un cono metálico con un ángulo de 30 grados y un peso conocido, generalmente de 80 gramos. En este método, una muestra de suelo bien amasada y humedecida se coloca en un recipiente. El cono se posiciona de forma que su punta toca la superficie del suelo, y luego se deja caer libremente en la muestra.

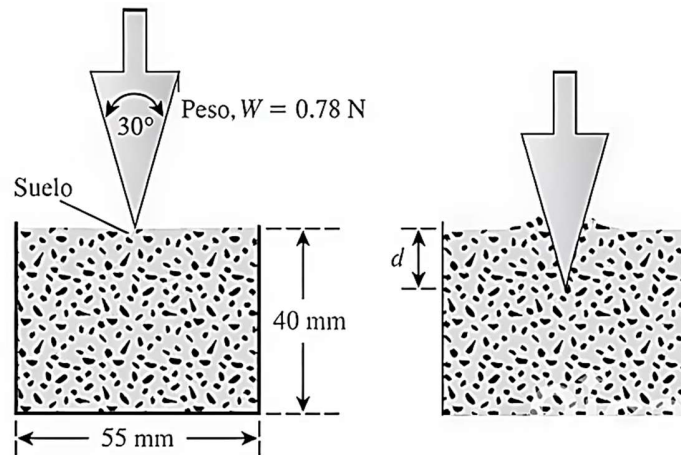
**Figura 2.9** Penetrómetro de cono



**Fuente:** Elaboración propia.

El límite líquido se define como el contenido de agua a partir del cual el cono penetra exactamente 20 mm en la muestra de suelo en un lapso breve, debido al efecto de la gravedad. Este valor de penetración indica que el suelo ha alcanzado el estado en el que pasa de ser plástico a comportarse como un líquido.

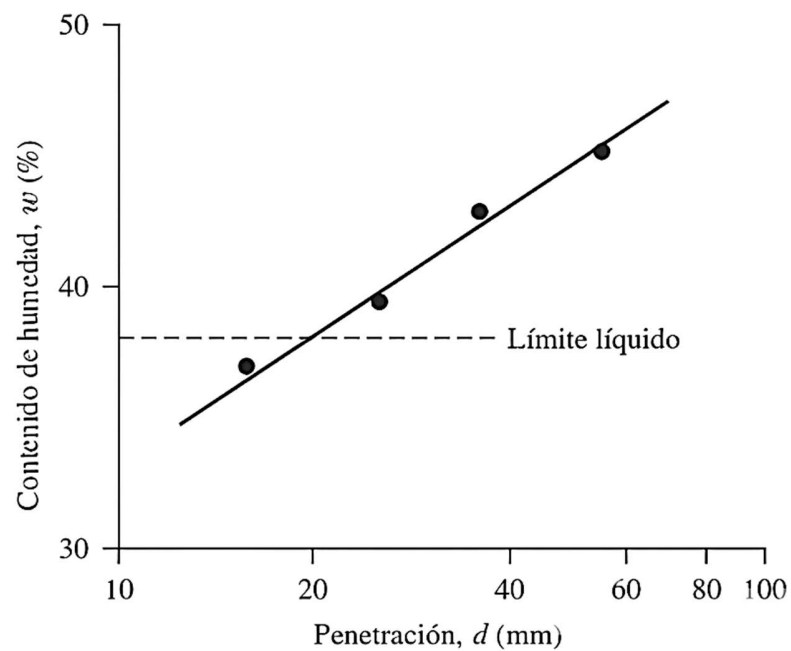
**Figura 2.10** Prueba de penetración de cono.



**Fuente:** Das, 2013.

Se traza una gráfica con la penetración del cono en coordenadas logarítmicas, como se muestra en la figura, y se interpola para la humedad correspondiente a 25 golpes.

**Figura 2.11** Gráfica de contenido de humedad en función de la penetración de cono



**Fuente:** Das, 2013

#### **2.2.4. Granulometría**

Su finalidad, es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante sistemas como en el caso de este proyecto S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente.

El método de lavado en seco es una técnica empleada en geotecnia para caracterizar y analizar suelos finos, como limos y arcillas, separando las partículas muy pequeñas que quedan adheridas a los granos de mayor tamaño. Este método permite realizar un análisis granulométrico más preciso en suelos donde los finos suelen adherirse a partículas más grandes, lo cual afecta la clasificación y análisis del suelo si no se separan adecuadamente.

##### **2.2.4.1. El sistema de Clasificación S.U.C.S.**

El sistema unificado de clasificación del suelo (S.U.C.S.) se basa en el sistema de clasificación desarrollado por Casagrande durante la segunda guerra mundial. Con algunas modificaciones fue aprobado conjuntamente por varias agencias de gobierno de los EE.UU. en 1952. Refinamientos adicionales fueron hechas y la que se usa en el proyecto es la Norma ASTM D 2487-66.

Se utiliza en los EE.UU. y en gran parte del mundo incluyendo Bolivia para trabajos geotécnicos que no sean los caminos y carreteras.

Los suelos de un sistema unificado se designan por un símbolo de dos letras: el primero considera que el principal componente de la tierra, y la segunda describe informaciones de la curva granulométrica o características de plasticidad.

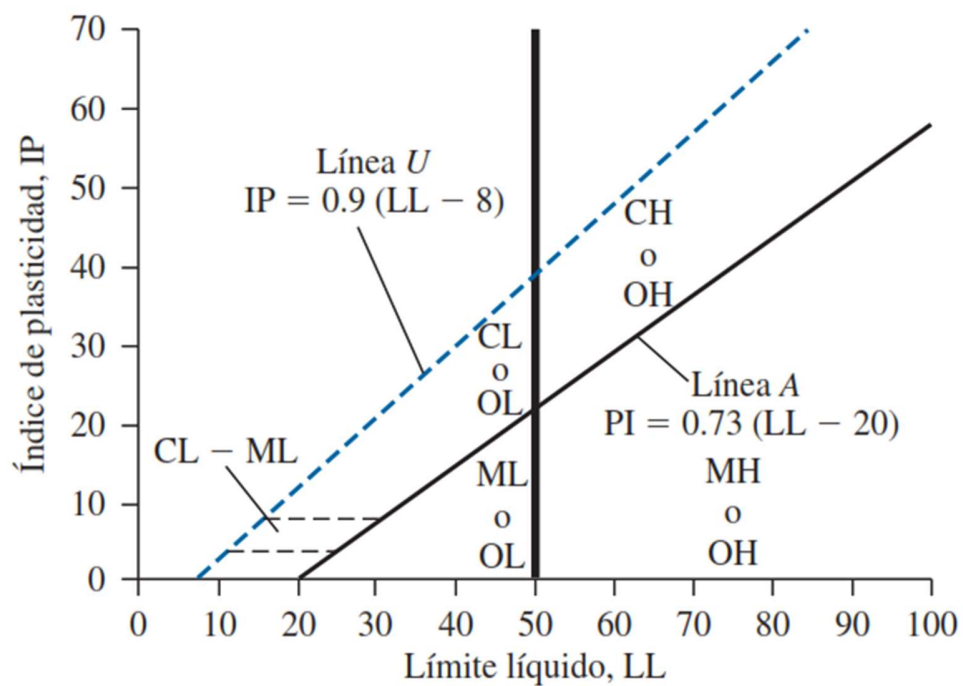
En el caso de nuestro proyecto nos interesan suelos que contienen arcillas, como se muestra en la siguiente tabla donde muestra la simbología que se utiliza, así como también su carta de plasticidad.

**Tabla 2.1** Simbología de suelos finos

| Símbolo | Descripción                                                        |
|---------|--------------------------------------------------------------------|
| M       | Limo inorgánico o arena muy fina.                                  |
| C       | Arcilla.                                                           |
| O       | Limos, arcillas y mezclas con alto contenido de material orgánico. |
| L       | Baja a mediana compresibilidad. ( $LL < 50\%$ )                    |
| H       | Alta compresibilidad. ( $LL > 50\%$ )                              |

**Fuente:** Guía de laboratorio de suelos I

**Figura 2.12** Gráfica de plasticidad



**Fuente:** Das, 2011

### 2.3. Exploración de suelos

Las técnicas de exploración de campo se diferencian, entre ellas, por su capacidad de extraer muestras y/u obtener parámetros del suelo; aquellas que, por diseño del equipo, no permiten la recuperación de muestras, pero sí facilitan la obtención de parámetros del

suelo, son denominadas auscultaciones. De las técnicas que extraen muestras, algunas tienen como único objetivo el de obtener muestra para la realización de ensayos de laboratorio.

Los ensayos de campo implican la obtención de parámetros del suelo se clasifican según el método de penetración utilizado en el terreno, dividiéndose en métodos dinámicos y estáticos. En el caso de la investigación de este proyecto los métodos de penetración son dinámicos tanto del SPT como DPSH.

### **2.3.1. Normas que los regulan**

En esta investigación los ensayos in situ que se realizaron fueron el ensayo SPT y DPSH, en Bolivia no existe una norma específica para estos ensayos pero la norma boliviana de estudios geotécnicos se basa en normas de referencia ya establecidas en otros países.

- En el caso del ensayo de penetración estándar (SPT) la norma de referencia es la ASTM D1586
- Para el ensayo de penetración super pesada (DPSH) la norma de referencia es la UNE-EN ISO 22476-2

### **2.4. Ensayo SPT**

El ensayo de penetración estándar (SPT), desarrollado por Terzaghi a finales de los años 20, es el ensayo in situ más popular y económico con la finalidad de estimar el grado de densificación de los suelos es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se requiere realizar un reconocimiento geotécnico. Constituye el ensayo o prueba más utilizada en la realización de sondeos, y se realiza en el fondo de la perforación, Cassan Maurice en su libro describe el origen del ensayo SPT de la siguiente manera:

En realidad, se trata de la generalización de la astucia de un viejo jefe sondista de la Société Raymond – Pile, quien hacia 1925 propuso a Terzaghi contar el número de golpes necesarios para hincar un pie, él toma muestras que tenía costumbre de utilizar. Después de haber acumulado un gran número de resultados, Terzaghi no quiso nunca que se modificara él toma muestras que había sido utilizado en esa época, y erigió en modo

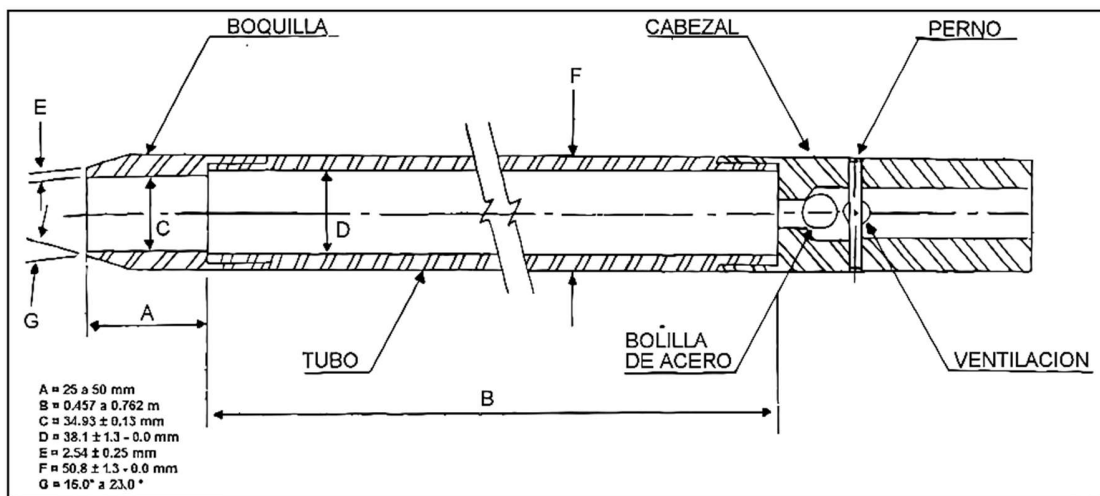
operatorio lo que no era más que una costumbre de obra. Es así como nació el Standard Penetration Test (SPT) (Cassan, 1982, p.157).

Se estima que el 85% a 90% de los diseños de las cimentaciones convencionales de Norte y Sur de América se basan en los valores de N medidos en el SPT.

#### 2.4.1. Elementos del ensayo

- Maza de 63,5 kg.
- Altura de caída 76 cm.
- Saca muestra (cuchara Terzaghi).
- Mecanismo de liberación de la maza.
- Barras de sondeo.
- Cabezal de golpeo.

**Figura 2.13** Cuchara saca muestra para SPT

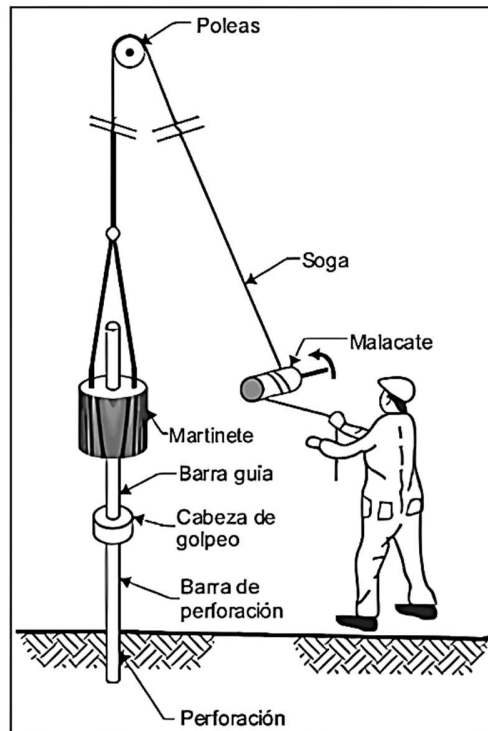


|                                        |
|----------------------------------------|
| $A = 25 \text{ a } 50 \text{ mm}$      |
| $B = 0.457 \text{ a } 0.762 \text{ m}$ |
| $C = 34.93 \pm 0.13 \text{ mm}$        |
| $D = 38.1 \pm 1.3 - 0.0 \text{ mm}$    |
| $E = 2.54 \pm 0.25 \text{ mm}$         |
| $F = 50.8 \pm 1.3 - 0.0 \text{ mm}$    |
| $G = 16.0^\circ \text{ a } 23.0^\circ$ |

**Fuente:** ASTM D1586

En la siguiente imagen se muestra una esquematización general del ensayo SPT de manera manual

**Figura 2.14** Esquema ensayo SPT manual



**Fuente:** López Menardi, 2003

Se prefieren los martillos automáticos y de disparo para obtener una energía constante durante la prueba, en el caso de esta investigación se usó el equipo automático que se muestra en la siguiente imagen

**Figura 2.15** Penetrómetro automático



**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023

#### **2.4.2. Descripción del ensayo**

Una vez en la perforación del sondeo se ha alcanzado la profundidad a la que se ha de realizar la prueba, sin avanzar la entubación y limpio el fondo del sondeo, se descende el sacamuestras SPT unido al varillaje hasta apoyar suavemente en el fondo. Realizada esta operación, se eleva rápidamente la masa con una frecuencia constante, dejándola caer libremente sobre un cabezal donde se coloca en la parte superior del varillaje

- Se contabiliza y se anota el número de golpes necesarios para hincar la cuchara los primeros 15 cm  $N_{0-15}$ .
- Posteriormente se realiza la prueba en sí, introduciendo otros 30 cm
- Anotando el número de golpes requerido para la hincada en cada intervalo de 15 cm de penetración. ( $N_{15-30}$  y  $N_{30-45}$ )

El resultado del ensayo es el golpeo SPT o resistencia a la penetración estándar

$$N_{SPT} = N_{15-30} + N_{30-45}$$

Si el número de golpes necesario para profundizar en cualquiera de estos intervalos de 15 cm, es superior a 50, el resultado del ensayo deja de ser la suma anteriormente indicada, para convertirse en rechazo (R), debiéndose anotar también la longitud hincada en el tramo en el que se han alcanzado los 50 golpes. El ensayo SPT en este punto se considera finalizado cuando se alcanza este valor.

Es muy importante asegurarse la debida limpieza de la perforación hasta llegar a la cota deseada, tanto el fondo como las paredes, retirando los restos de perforación y luego instalando el sacamuestras de dimensiones definidas por norma.

Este ensayo, como se ha mencionado, permitirá conocer la capacidad y en los suelos plásticos permite adquirir una idea aproximada de la resistencia a la compresión simple. Los resultados obtenidos en la prueba plantean que los resultados del número de golpes se puedan relacionar con las propiedades de los suelos.

Una vez el muestreador haya sido extraído de la perforación, se debe abrir el mismo y se comienza con la descripción de la muestra obtenida, en tanto su color, composición, estratificación y condición.

Luego, se deben adjuntar las muestras en recipientes separados, sellados y etiquetados. Se debe garantizar la no modificación del contenido de humedad de la misma, así como tampoco someterlas a cambios bruscos de temperatura.

#### **2.4.3. Procedimiento del ensayo**

- Limpieza del terreno donde se realizará el ensayo.
- Nivelación del equipo.
- Perforación hasta la profundidad a la que se desea hacer la prueba.
- Ya habiendo llegado a la cota deseada se introduce la cuchara Terzaghi.
- Se marca en las barras 3 intervalos de 15cm.
- Aquí comienza el ensayo propiamente dicho, dejando caer el martillo del equipo sobre el cabezal.

- Se anotan el número de golpes cada 15 cm, en 3 intervalos, sumando un total de 45 cm de perforación, terminando así el ensayo.
- Si se diera el caso, el ensayo se detiene cuando se supera los 50 golpes en algún intervalo de 15 cm, o también si no sigue avanzando después de 10 golpes, dando como resultado rechazo.

#### **2.4.4. Aplicación**

Este ensayo tiene como principal utilidad la caracterización de suelos en las que se hace muy difícil obtener muestras inalteradas para los ensayos en el laboratorio. El valor de los golpes obtenidos en un ensayo de penetración es un dato indicativo de la consistencia que posee un terreno susceptible de su utilización para la caracterización o diseño geotécnico.

Para poder aplicar el número de golpes SPT para obtener parámetros de resistencia del suelo se debe obtener primero el valor  $N_{60}$  que vendría a ser el número de golpes obtenidos por el ensayo SPT corregido.

##### **2.4.4.1. Numero de golpes SPT corregido**

En geotecnia, el número de golpes  $N$  obtenido mediante el Standard Penetration Test (SPT) representa la resistencia relativa del suelo ante la penetración de un muestreador estándar. Sin embargo, este valor está influenciado por varios factores operativos y de campo, como el tipo de martillo, el método de hincado, el equipo utilizado y la eficiencia del sistema.

Para estandarizar y comparar resultados entre distintas condiciones de ensayo, se utiliza un valor corregido denominado  $N_{60}$ , que representa el número de golpes del SPT ajustado a una eficiencia de energía del 60%, según lo recomendado por la norma ASTM D1586 y por múltiples autores en la literatura geotécnica.

##### **2.4.4.2. Importancia geotécnica del $N_{60}$**

El valor de  $N_{60}$  tiene múltiples aplicaciones en ingeniería geotécnica, ya que es el dato base para correlacionar propiedades físicas y mecánicas del suelo mediante fórmulas empíricas reconocidas internacionalmente. Algunas aplicaciones más comunes incluyen:

- Estimación de la capacidad portante del suelo

- Evaluación del asentamiento en cimentaciones
- Estimación de la densidad relativa en suelos granulares
- Estimación del módulo de elasticidad, rigidez o compresibilidad

Además, su uso facilita el diseño estructural de obras civiles, desde viviendas hasta puentes, ya que se considera un parámetro de entrada confiable en la mayoría de los softwares y métodos empíricos.

Su fórmula es la siguiente:

$$N_{60} = C_B \times C_S \times C_R \times \frac{E R_f \times N_{SPT}}{60}$$

Donde:

$ER_f$  = eficiencia del martillo

$C_B$  = Corrección por diámetro del orificio

$C_R$  = Corrección por largo de barra

$C_S$  = Corrección por muestreador

$N_{SPT}$  = Valor SPT medido

#### **2.4.5. Ventajas del ensayo SPT**

- Funciona en muchos tipos de suelos: El SPT es un ensayo sumamente versátil que puede ejecutarse en una gran variedad de suelos, desde arcillas blandas hasta arenas compactas y gravas finas. Aunque no es óptimo en suelos muy blandos o con grava gruesa, su amplio rango de aplicabilidad lo ha convertido en un método de referencia para estudios geotécnicos en todo el mundo. Esta característica permite usar un solo método de ensayo como base para múltiples condiciones de terreno.
- Disponible en todo el mundo: Dado que es un método estandarizado desde hace décadas (ASTM D1586), el equipo, los procedimientos y los valores de referencia del SPT están disponibles y entendidos globalmente. Esto facilita su uso tanto en proyectos locales como internacionales, y permite comparar resultados con

estudios previos de distintas regiones. Además, es ampliamente aceptado por ingenieros, normativas y software de diseño.

- Sencillo de realizar: A pesar de requerir perforación, el ensayo SPT se basa en un principio mecánico simple: contar los golpes necesarios para hincar un muestreador en el suelo. Esto hace que sea fácil de aprender, ejecutar y registrar en campo. El equipo es relativamente robusto y no requiere sistemas electrónicos complejos, lo cual reduce el riesgo de fallos por tecnología o condiciones adversas.

#### **2.4.6. Desventajas del ensayo SPT**

- Muestra alterada: El muestreador de tubo partido del SPT no conserva intacta la estructura original del suelo. Por eso, no es adecuado para pruebas de laboratorio que requieran muestras inalteradas, como compresión triaxial no drenada o consolidación. La muestra extraída sirve únicamente para clasificación visual y textural, por lo tanto, su valor es más cualitativo que cuantitativo.
- Valor crudo y empírico para análisis: El número de golpes del SPT, aunque útil, es un valor que depende de muchas variables externas, como la eficiencia del equipo, el operario, la profundidad y el tipo de suelo. Además, no es un parámetro físico directo (como resistencia al corte o módulo elástico), por lo que necesita ser correlacionado mediante fórmulas empíricas para obtener propiedades del suelo. Esta falta de precisión directa puede limitar su uso si no se complementa con otras pruebas o correcciones (como la transformación a  $N_{60}$ ).

#### **2.4.7. Situación del ensayo SPT en Bolivia**

En cuanto a la normativa, Bolivia no cuenta con una norma específica nacional que regule exclusivamente el (SPT). Sin embargo, la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos, insta a seguir estándares internacionales reconocidos, como los de ASTM D1586 para la realización y la interpretación de los ensayos SPT en el país.

Los ingenieros geotécnicos y las empresas de consultoría en Bolivia suelen emplear el SPT como parte de sus estudios geotécnicos para proyectos de construcción de las obras civiles. La información obtenida a través del SPT proporciona datos cruciales sobre la calidad del suelo y su comportamiento bajo carga, permitiendo tomar decisiones informadas en el diseño y la construcción de obras civiles en el país.

El ensayo SPT es una herramienta fundamental en la exploración geotécnica por su simplicidad, alcance global y adaptabilidad a diversos tipos de suelo. Sin embargo, sus resultados deben interpretarse con cautela, ya que proporcionan datos indirectos que requieren correcciones y no permiten obtener muestras inalteradas. Su utilidad está en su correcta aplicación, comprensión de sus límites y combinación con otros métodos complementarios.

## **2.5. Ensayo DPSH**

El ensayo de penetración dinámica súper pesada (DPSH, por sus siglas en inglés) es una técnica ampliamente utilizada en la investigación de suelos. Su principal objetivo es medir la resistencia al golpe de un suelo mediante la penetración de una varilla cónica estándar impulsado por energía controlada. Este ensayo ha ganado popularidad debido a su practicidad y costo reducido, especialmente en terrenos donde otras pruebas son difíciles de realizar.

### **2.5.1. Orígenes y desarrollo**

El desarrollo de los ensayos de penetración dinámica tiene sus raíces en el avance de las técnicas de exploración geotécnica desde mediados del siglo XX. Originalmente, se utilizaron para caracterizar suelos no cohesivos como arenas y gravas. A lo largo del tiempo, se fueron mejorando los equipos y procedimientos para garantizar una mayor precisión en la evaluación de suelos más diversos, incluyendo aquellos con capas cohesivas.

En Europa, los ensayos de penetración dinámica, como el DPSH, comenzaron a ser estandarizados y regulados bajo normas como la UNE-EN ISO 22476-2, promoviendo su uso como método complementario o alternativo al Standard Penetration Test (SPT). La idea detrás de estas pruebas dinámicas es correlacionar sus resultados con parámetros geotécnicos clave, como la resistencia a la penetración o la capacidad portante de los suelos, con una metodología más rápida y menos costosa que el SPT

#### **2.5.1.1. Usos iniciales y evolución**

Uno de los primeros usos documentados del DPSH fue en proyectos de infraestructura en Europa y África, donde las condiciones del terreno hacían que el SPT fuera poco práctico.

Durante los años 80 y 90, investigadores como Cearn y McKenzie trabajaron en correlaciones entre DPSH y SPT para suelos arenosos y gravosos, lo que permitió ampliar las aplicaciones del DPSH en diseño de cimientos y estudios de estabilidad

Hoy en día, el DPSH se utiliza no solo como una herramienta de exploración económica y eficiente, sino también como base para la creación de modelos estadísticos y correlaciones con otras pruebas geotécnicas. Estos avances han transformado al DPSH en un recurso clave para proyectos donde la precisión y el costo son factores críticos.

El ensayo DPSH es una prueba de penetración dinámica en la que se usa un equipo más ligero y rápido que el SPT. En lugar de una cuchara Terzaghi, se utiliza una punta maciza para registrar la resistencia del suelo a la penetración. Este ensayo se lo usa en una manera de sustitución al ensayo SPT, con la diferencia que con el número de golpes del DPSH no podemos estimar parámetros de resistencia, por lo que estos golpes son llevados a una correlación para el SPT.

#### **2.5.2. Elementos del ensayo**

- Maza de 63,5 kg.
- Altura de caída 76 cm.
- Punta cónica.
- Mecanismo de liberación de la maza.
- Barras de sondeo.
- Cabezal de golpeo.

Existen dos tipos de puntaza recuperable y la puntaza desechable

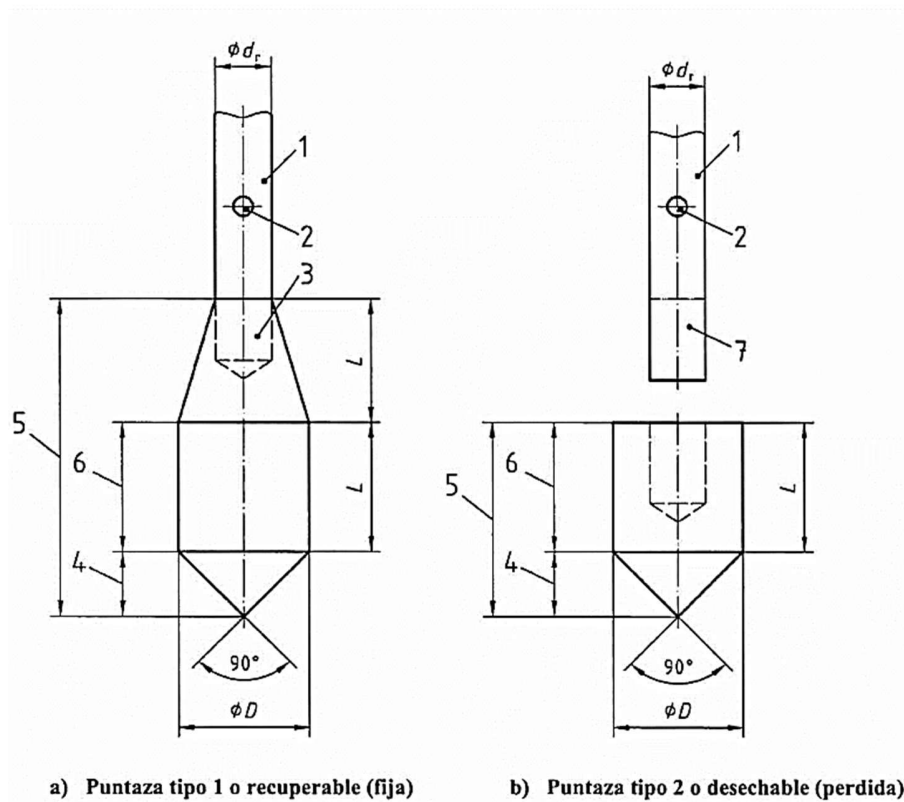
##### **Puntaza recuperable**

Como su nombre lo indica la puntaza una vez puesta en el varillaje no se pierde al realizar el ensayo.

##### **Puntaza desechable**

Esta puntaza tiene como característica que se pierde luego de realizado el ensayo.

**Figura 2.16** Características de la punta cónica DPSH



**Fuente:** Norma UNE EN ISO 22476-2

#### Leyenda

1. Barra de hincia de prolongación
2. Agujero de inyección (opcional)
3. Montaje a rosca
4. Punta del cono
5. Puntaza
6. Camisa cilíndrica
7. Montaje de penetración

*L* Longitud de la camisa cilíndrica

*D* Diámetro de la base

*d* Diámetro de la barra

**Figura 2.17** Punta cónica maciza DPSH



**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023

### **2.5.3. Procedimiento del ensayo**

Los ensayos de penetración dinámica se realizan, en general, desde la superficie del terreno.

- Limpieza del terreno donde se realizará el ensayo.
- Nivelación del equipo.
- Se coloca una barra desde el inicio con su punta cónica.
- Una vez la barra este colocada en el equipo, se marca toda la barra en intervalos de 20 cm.
- Se anotan el número de golpes cada 20 cm, en 5 intervalos, sumando un total de 100 cm de perforación, terminando así el ensayo.
- Si se diera el caso, el ensayo se detiene cuando se supera los 50 golpes en algún intervalo de 20 cm, o también si no sigue avanzando después de 10 golpes, dando como resultado rechazo.

### **2.5.4. Campo de aplicación**

El ensayo de penetración dinámica súper pesada (DPSH) es una herramienta geotécnica versátil, económica y de ejecución rápida que se utiliza para evaluar la resistencia dinámica del terreno. Aunque no sustituye completamente a los métodos de exploración

directa como el SPT, su capacidad para registrar la resistencia relativa del suelo sin necesidad de perforación lo convierte en un método muy útil en diversas situaciones técnicas y logísticas.

Entre sus principales campos de aplicación, se destacan los siguientes:

#### **2.5.4.1. Investigación de la homogeneidad del terreno**

El DPSH permite obtener un perfil continuo del número de golpes con la profundidad, lo que lo hace ideal para detectar variaciones de resistencia dentro de un mismo estrato o identificar capas anómalas que podrían afectar el comportamiento de la cimentación o la estabilidad de la obra.

#### **2.5.4.2. Verificación de la posición y espesor de capas conocidas de los estratos**

En terrenos donde ya se tiene información previa sobre el perfil estratigráfico (ya sea por calicatas, sondeos o estudios anteriores como el SPT), el DPSH puede utilizarse para confirmar la profundidad a la que comienza una capa resistente o blanda, y también para verificar su espesor. Esto es especialmente útil en proyectos donde se desea confirmar si una capa arcillosa ha sido removida o si una capa granular sigue presente en toda el área del proyecto.

#### **2.5.5. Ventajas del ensayo DPSH**

- Proporciona un registro continuo: Esto lo convierte en un método ideal para detectar cambios estratigráficos en el subsuelo.
- Mayor rapidez que el SPT: Al no requerir perforación previa, el DPSH se ejecuta de forma más rápida que el SPT. Esto lo hace especialmente útil cuando se deben cubrir grandes áreas o realizar campañas exploratorias preliminares. Su eficiencia permite optimizar tiempos sin dejar de obtener información útil sobre el suelo.

#### **2.5.6. Desventajas del ensayo DPSH**

- No permite la recuperación de muestras: Una de las principales limitaciones del DPSH es que no extrae muestras de suelo, lo que impide realizar análisis visuales, ensayos de laboratorio o clasificaciones texturales con material real. Esto restringe

su uso cuando se necesita conocer la plasticidad, humedad natural, estructura o color del suelo.

#### **2.5.7. Situación del ensayo DPSH en Bolivia**

En Bolivia, el uso del Dynamic Penetration Super Heavy (DPSH) es menos común en comparación con el Standard Penetration Test (SPT) en ingeniería geotécnica. Utilizada como ensayo de sustitución al SPT, el ensayo está normado por la norma UNE-EN ISO 22476-2, dicha norma está validada por la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos, que nos dice que podemos usar el ensayo en un porcentaje de sustitución en función al SPT.

El ensayo DPSH representa una opción eficaz, económica y ágil para la auscultación geotécnica del subsuelo, especialmente en etapas preliminares. Su capacidad de registrar variaciones de resistencia en forma continua y sin perforación lo convierte en una herramienta valiosa.

#### **2.6. Correlaciones entre el ensayo SPT y el ensayo DPSH**

Las correlaciones entre el ensayo SPT y el ensayo DPSH tienen un papel cada vez más protagónico en la ingeniería geotécnica moderna. Si bien en muchos casos se las menciona como una alternativa para optimizar tiempo y reducir costos, su verdadero valor va más allá: permiten incrementar la densidad de información sobre el subsuelo, favoreciendo un conocimiento más detallado y representativo del terreno.

##### **2.6.1. Antecedentes internacionales dentro de la región de Latinoamérica**

El desarrollo de correlaciones específicas entre DPSH y SPT no es un tema nuevo en Latinoamérica. Varios estudios recientes han trabajado en esta línea, demostrando que la relación entre ambos ensayos debe ser ajustada a las condiciones particulares del suelo en cada región. A continuación, se mencionan algunos antecedentes clave:

Argentina (Córdoba): En esta región se desarrollaron correlaciones en suelos loésicos, observando que la relación DPSH–SPT varía notablemente según la compacidad y el grado de humedad del terreno. La aplicación de modelos polinómicos permitió generar ecuaciones con ajustes aceptables para suelos de baja cohesión.

Colombia: En este país se han desarrollado correlaciones específicas para suelos arcillosos en distintas ciudades, como en Bogotá y Medellín. Uno de los aportes más relevantes fue la identificación de ecuaciones que permiten transformar los golpes DPSH en SPT bajo condiciones controladas, respetando los límites de profundidad y energía.

Chile: En el estudio de Aravena y Jaramillo (2014), se abordó la equivalencia entre el DPSH y el SPT en suelos finos. A través del análisis estadístico de múltiples puntos de muestreo, los autores lograron validar regresiones con niveles de ajuste aceptables, confirmando que la correlación puede aplicarse bajo criterios específicos de clasificación de suelos y profundidad.

Estos trabajos respaldan la idea de que las correlaciones deben ser construidas con base en datos locales, ya que los factores geológicos, climáticos y geotécnicos influyen significativamente en el comportamiento de los suelos frente a los ensayos de penetración.

## **2.7. Análisis estadístico aplicado a la correlación entre ensayos SPT y DPSH**

En el presente apartado se recopila información estadística donde se abordan modelos de regresión propuestos, sus respectivos coeficientes de determinación, así como la validez estadística de los resultados.

### **2.7.1. Correlación**

La correlación mide la fuerza y la dirección de la relación entre dos variables, en este caso, entre X (DPSH) e Y (SPT). Este análisis es clave para determinar si X puede ser un buen predictor de Y.

#### **2.7.1.1. Coeficiente de correlación**

Frecuentemente denominado correlación. Una medida estadística ampliamente utilizada que mide el grado de relación lineal entre dos variables aleatorias. El coeficiente de correlación debe situarse en la banda de  $-1$  a  $+1$ . El coeficiente de correlación se calcula dividiendo la covarianza de las dos variables aleatorias por el producto de las desviaciones típicas individuales de las dos variables aleatorias.

Mide la interdependencia o grado de asociación entre dos variables. Se define como la relación por cociente entre covarianza de las dos variables y el producto de sus

desviaciones típicas. Su valor puede oscilar entre 0 y 1 y 0 y -1, según que la correlación sea positiva o negativa. Un coeficiente de correlación igual a cero significancia ausencia de correlación

### 2.7.2. Coeficiente de correlación de Pearson

Definición es una prueba estadística para analizar la relación entre dos variables medidas en un nivel por intervalos o de razón

Se simboliza r:

Hipótesis a probar correlacional, del tipo de “a mayor X, mayor Y”, “a mayor X, menor Y”, “altos valores en X están asociados con altos valores en Y”, “altos valores en X en X se asocian con bajos valores de Y”. La hipótesis de investigación señala que la correlación es significativa. La prueba en si no considera a una como independiente y a otra como dependiente, ya que no evalúa la casualidad. La noción de causa-efecto (independiente-dependiente) es posible establecerla teóricamente, pero la prueba no asume dicha causalidad

El coeficiente de correlación de Pearson se calcula a partir de puntuaciones obtenidas en una muestra en dos variables. Se relacionan las dos variables la interpretación el coeficiente r de Pearson puede variar de -1 a +1 donde:

**Figura 2.18** Valores del coeficiente del coeficiente de Pearson

| Valor del coeficiente r | Significado                                       |
|-------------------------|---------------------------------------------------|
| -0.90                   | Correlación negativa muy fuerte.                  |
| -0.75                   | Correlación negativa considerable.                |
| -0.50                   | Correlación negativa media.                       |
| -0.25                   | Correlación negativa débil.                       |
| -0.10                   | Correlación negativa muy débil.                   |
| 0.00                    | No existe correlación alguna entre las variables. |
| +0.10                   | Correlación positiva muy débil.                   |
| +0.25                   | Correlación positiva débil.                       |
| +0.50                   | Correlación positiva media.                       |
| +0.75                   | Correlación positiva considerable.                |
| +0.90                   | Correlación positiva muy fuerte.                  |
| +1.00                   | Correlación positiva perfecta.                    |

**Fuente:** Hernández, R (2014) metodología de investigación México McGraw-hill

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) se usa para medir esta relación:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Donde:

$r = 1$  indica correlación positiva perfecta

$r = -1$  indica correlación negativa

$r = 0$  indica que no hay correlación lineal

Un  $r$  alto y positivo indicará que, al aumentar  $X$ , también aumenta  $Y$ , lo cual es un buen indicio de que  $X$  puede ser usado para estimar  $Y$ .

### **2.7.3. Modelos de regresión**

La regresión lineal es una técnica de análisis de datos que predice el valor de datos desconocidos mediante el uso de otro valor de datos relacionado y conocido. Modela matemáticamente la variable desconocida o dependiente y la variable conocida o independiente como una ecuación lineal.

#### **2.7.3.1. Regresión Lineal Simple**

La regresión lineal simple permite modelar la relación entre la variable independiente  $X$  y la dependiente  $Y$  mediante una línea recta. La ecuación general de la regresión lineal es:

$$y = a + b * x$$

Donde:

$a$  es el intercepto, el valor de  $Y$  cuando  $X$  es 0.

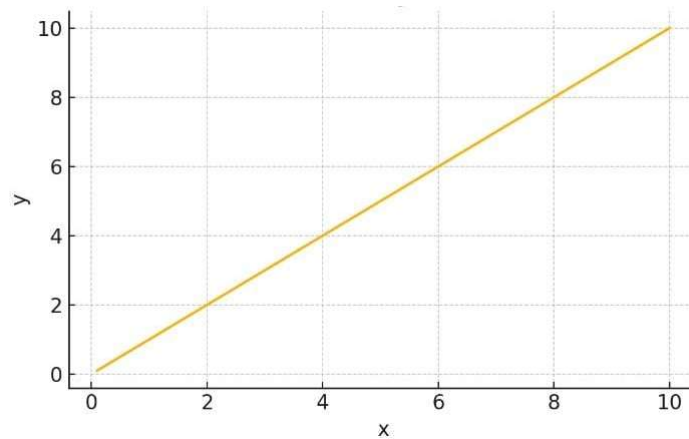
$b$  es la pendiente, que representa el cambio en  $Y$  por cada unidad de cambio en  $X$ .

Para calcular  $a$  y  $b$ , se usan las fórmulas de mínimos cuadrados:

$$b = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sum(x - \bar{x})^2}$$

$$a = \bar{y} - b * \bar{x}$$

**Figura 2.19** Modelo regresión lineal



**Fuente:** Walpole, 2012

#### 2.7.3.2. Métodos No Lineales

La regresión no lineal genera una ecuación para describir la relación no lineal entre una variable de respuesta continua y una o más variable predictores y predice nuevas observaciones.

Utilice la regresión no lineal en lugar de la regresión de mínimos cuadrados ordinarios cuando no pueda modelar adecuadamente la relación con parámetros lineales.

Los parámetros son lineales cuando cada término del modelo es aditivo y contiene solo un parámetro que multiplica el termino

Utilizaremos Regresión no lineal cuando no pueda modelar adecuadamente la relación entre una variable de respuesta continua y una o más variables predictoras con la regresión ordinaria de mínimos cuadrados. Utilice un modelo de regresión no lineal cuando pueda especificar una función no lineal para describir la relación.

Si la relación entre X e Y no es lineal, se pueden emplear métodos de regresión no lineal. Algunos modelos no lineales comunes incluyen:

### 2.7.3.3. Modelo cuadrático

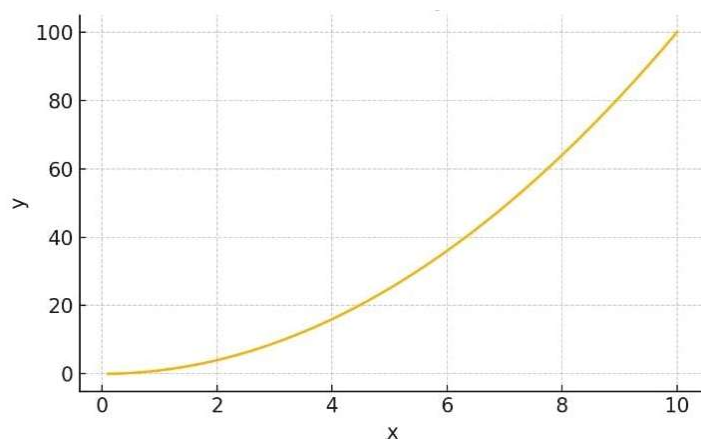
El modelo de regresión cuadrática es una alternativa cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado, o cuando el fenómeno en estudio tiene un comportamiento que puede considerarse como parabólico.

Este modelo también es conocido como parabólico, y es el caso más simple de modelos de regresión polinomiales, siendo su grado igual a 2.

$$y = a + b * x + c * x^2$$

Utilizado cuando los datos siguen una tendencia curvada.

**Figura 2.20** Modelo de regresión cuadrático



**Fuente:** Walpole, 2012

### 2.7.3.4. Modelo exponencial

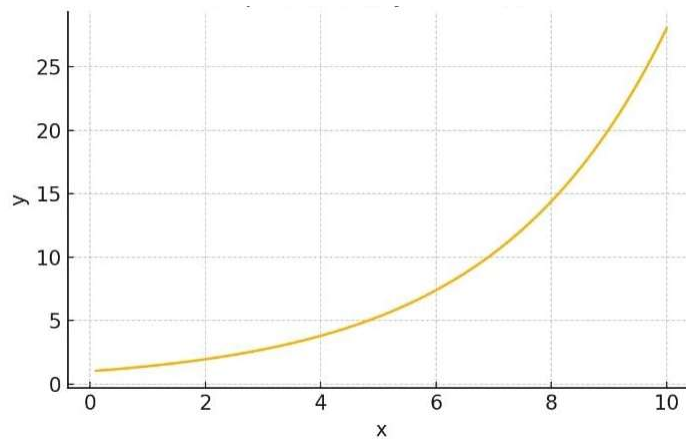
Es un modelo que se basa en el logaritmo natural

Se aplica en situación en que el aumento de los valores es muy acelerado y cualquier cambio en los parámetros se hace que la respuesta se aumente mucho

$$y = a * e^{(b*x)}$$

Este modelo se emplea cuando los valores de Y crecen o decrecen exponencialmente con respecto a X.

**Figura 2.21** Modelo de regresión exponencial



**Fuente:** Walpole, 2012

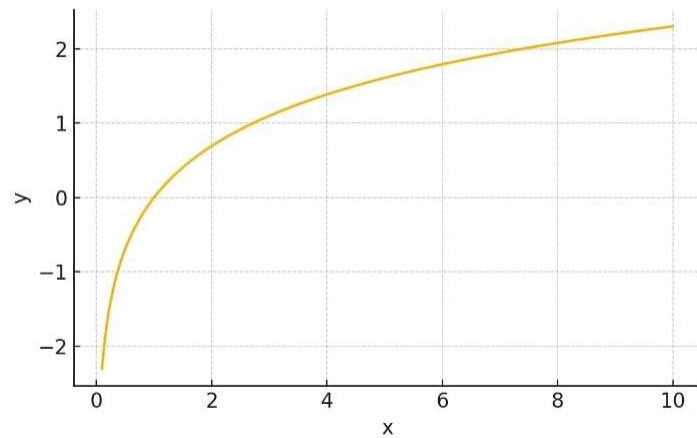
#### 2.7.3.5. Modelo logarítmico

Este modelo de regresión es una alternativa cuando el modelo lineal no logra un coeficiente de determinación apropiado, o cuando el fenómeno en estudio tiene un comportamiento que puede considerarse potencial o logarítmico. La forma más simple de tratar de establecer la tendencia es a través de un diagrama de dispersión o nube de puntos, tal como la siguiente:

$$y = a + b * \ln(x)$$

Apropiado cuando la relación se estabiliza a altos valores de X.

**Figura 2.22** Modelo de regresión logarítmico



**Fuente:** Walpole, 2012

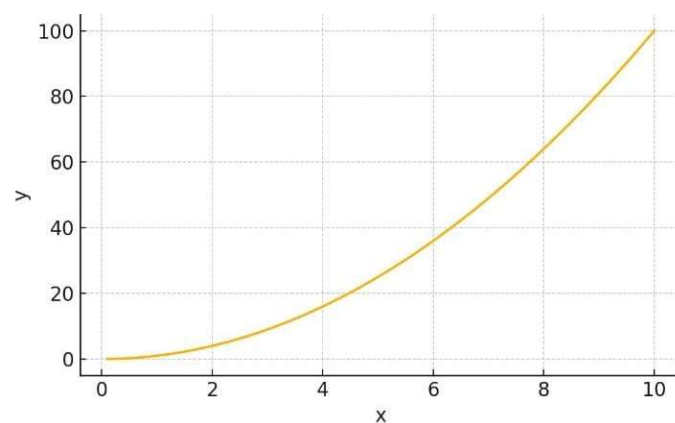
#### 2.7.3.6. Modelo de potencia

Una regresión exponencial es el proceso de encontrar la ecuación de la función exponencial que se ajuste mejor a un conjunto de datos. Como un resultado, obtenemos una ecuación de la forma

$$y = a * x^b$$

Usado si la relación entre X e Y sigue una forma potencial.

**Figura 2.23** Modelo de regresión potencial



**Fuente:** Walpole, 2012

#### 2.7.4. Coeficiente de Determinación

El coeficiente de determinación  $R^2$  mide qué tan bien se ajusta el modelo a los datos. Se define como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{observado}} - y_{\text{predicho}})^2}{\sum (y_{\text{observado}} - \bar{y})^2}$$

Un valor de  $R^2$  cercano a 1 significa que el modelo explica bien la variabilidad de Y en función de X. Un  $R^2$  bajo indica que el modelo no se ajusta correctamente.

El  $R^2$  proporciona una medida de cuanto se ajustan los valores observados a los valores predichos por el modelo de regresión.

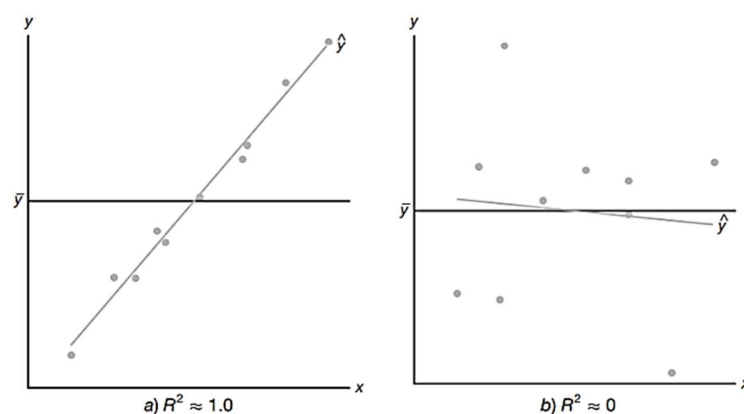
El  $R^2$  varía entre 0 y 1, y su interpretación general es la siguiente

$R^2$  cercano a 0 indica que el modelo no puede explicar la variabilidad de la variable dependiente en absoluto. Los valores predichos por el modelo no se ajustan bien a los valores observados.

$R^2$  cercano a 1 indica que el modelo explica una gran parte de la variabilidad de la variable dependiente. Los valores predichos por el modelo se ajustan muy bien a los valores observados.

Estas se exponen a continuación

**Figura 2.24** Grafica que ilustra un ajuste muy bueno y otro deficiente



**Fuente:** Walpole, 2012

### 2.7.5. Prueba de F para la validación de los modelos

El estadístico F es un test que se utiliza para evaluar la capacidad explicativa que tiene un grupo de variables independientes sobre la variación de la variable dependiente.

Como también para evaluar dos grupos de una población asumiendo varianzas iguales para la prueba.

El problema que se plantea en la investigación y el porqué se utiliza esta prueba es para saber si existe alguna variación entre los datos obtenidos en campo del SPT y los resultados que se obtienen con la ecuación generada por la correlación.

$$F_{prueba} = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$$

Los grados de libertad están dados por el número de datos menos 1 es decir (n-1), así llegamos a la siguiente tabla para hallar el valor del F crítico

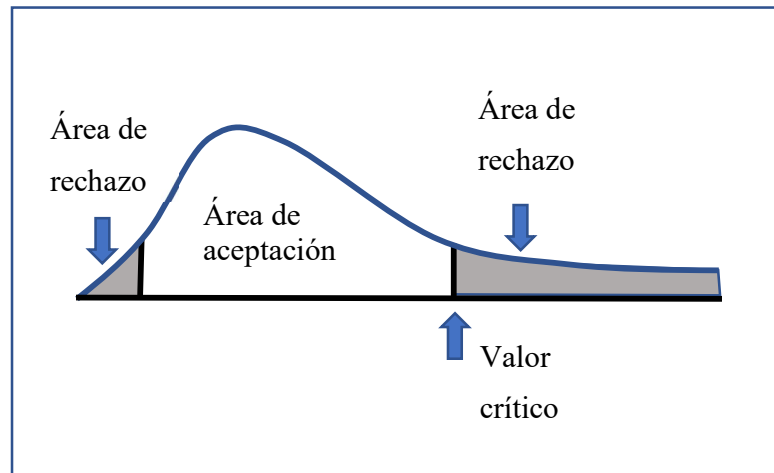
**Figura 2.25** Tabla para encontrar el valor F crítico

|                                       |    | Grados de libertad para el numerador |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------|----|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                       |    | 1                                    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 12   | 15   |
| Grado de libertad para el denominador | 1  | 161                                  | 200  | 216  | 225  | 230  | 234  | 237  | 239  | 241  | 242  | 244  | 246  |
|                                       | 2  | 18.5                                 | 19.0 | 19.2 | 19.2 | 19.3 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 | 19.4 |
|                                       | 3  | 10.1                                 | 9.55 | 9.28 | 9.12 | 9.01 | 8.93 | 8.39 | 8.85 | 8.91 | 8.79 | 8.74 | 8.70 |
|                                       | 4  | 7.71                                 | 6.94 | 6.59 | 6.39 | 6.16 | 6.16 | 6.09 | 6.04 | 6.00 | 5.96 | 6.91 | 8.86 |
|                                       | 5  | 6.61                                 | 5.79 | 5.41 | 5.19 | 6.05 | 4.95 | 4.88 | 4.77 | 4.54 | 4.64 | 4.68 | 4.66 |
|                                       | 6  | 5.99                                 | 5.14 | 4.76 | 4.59 | 4.39 | 3.97 | 3.31 | 3.15 | 3.08 | 3.09 | 3.08 | 3.31 |
|                                       | 7  | 5.59                                 | 4.74 | 4.35 | 4.12 | 3.97 | 3.79 | 3.73 | 3.73 | 3.68 | 3.65 | 3.57 | 3.18 |
|                                       | 8  | 5.32                                 | 4.46 | 4.07 | 3.84 | 3.69 | 3.58 | 3.50 | 3.44 | 3.31 | 3.18 | 3.08 | 3.08 |
|                                       | 9  | 5.12                                 | 4.26 | 3.35 | 3.33 | 3.38 | 3.27 | 3.28 | 3.08 | 2.08 | 2.08 | 2.97 | 2.21 |
|                                       | 10 | 4.96                                 | 4.10 | 3.71 | 3.48 | 3.33 | 3.08 | 3.14 | 3.08 | 2.08 | 2.08 | 2.22 | 2.27 |
|                                       | 11 | 4.84                                 | 3.78 | 4.75 | 4.65 | 4.60 | 2.90 | 3.01 | 2.95 | 2.72 | 2.60 | 2.72 | 2.60 |
|                                       | 12 | 4.75                                 | 3.81 | 4.35 | 4.31 | 3.31 | 2.09 | 2.91 | 2.99 | 2.54 | 2.55 | 2.50 | 2.55 |
|                                       | 13 | 4.67                                 | 3.81 | 4.01 | 3.20 | 3.09 | 2.02 | 2.99 | 2.08 | 2.31 | 2.38 | 2.48 | 2.48 |
|                                       | 14 | 4.60                                 | 3.74 | 3.31 | 3.18 | 3.08 | 2.85 | 2.78 | 2.08 | 2.08 | 2.28 | 2.25 | 2.25 |
|                                       | 15 | 4.54                                 | 3.60 | 3.20 | 3.08 | 2.87 | 2.48 | 2.45 | 2.47 | 2.46 | 2.45 | 2.43 | 2.27 |
|                                       | 16 | 4.49                                 | 3.58 | 3.25 | 2.74 | 2.74 | 2.64 | 2.16 | 2.54 | 2.48 | 2.45 | 2.43 | 2.27 |
|                                       | 17 | 4.45                                 | 3.56 | 3.20 | 2.61 | 2.60 | 2.02 | 2.61 | 2.55 | 2.43 | 2.45 | 2.43 | 2.33 |
|                                       | 18 | 4.41                                 | 3.55 | 3.18 | 2.36 | 2.59 | 2.08 | 2.54 | 2.08 | 2.44 | 2.28 | 2.31 | 2.31 |
|                                       | 19 | 4.45                                 | 3.41 | 3.08 | 2.31 | 2.48 | 2.36 | 2.51 | 2.48 | 2.34 | 2.23 | 2.38 | 2.22 |
|                                       | 20 | 4.35                                 | 3.45 | 3.41 | 2.27 | 2.48 | 2.31 | 2.27 | 2.45 | 2.31 | 2.21 | 2.27 | 2.27 |

**Fuente:** Hernández, R (2014) metodología de investigación México McGraw-hill

Comparar el valor F resultante con el valor crítico y determinar si la hipótesis nula se rechaza

**Figura 2.26** Diagrama de prueba F



**Fuente:** Universidad de San Pedro Sula

Como se observa en el diagrama la prueba F es satisfactoria cuando esta dentro del area de aceptacion.

#### **2.7.5.1. Hipotesis**

Se determina la hipótesis operacional para evaluar nuestros resultados de las pruebas.

##### **2.7.5.1.1 Hipotesis nula**

Esta hipótesis nos dice que no existe diferencia significativa en la variación de los resultados de las pruebas, en el caso de la investigación que no existe variación entre los resultados obtenidos en campo con los resultados utilizando la ecuación encontrada.

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

##### **2.7.5.1.2 Hipótesis alterna**

Esta hipótesis nos dice que existe diferencia significativa en la variación de los resultados de las pruebas

$$H_a: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

#### **2.7.5.2. El nivel de significancia**

El nivel de significancia, también conocido como alfa ( $\alpha$ ), es un valor que indica la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera. En otras palabras, es el nivel de riesgo que el investigador está dispuesto a aceptar de cometer un error tipo I, es decir, de concluir que existe un efecto o relación cuando en realidad no existe

Establecer el nivel de significación en 0.05 es solo una convención, basada en el argumento de Ronald Aylmer Fisher, un estadístico/matemático y biólogo británico quien dijo que «una de cada veinte ( $1/20=0.05$ ) oportunidades representa un suceso muestral inusual».

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1. Unidades de estudio y decisión muestral

En este apartado se define el marco metodológico que guió la selección de los puntos de muestreo y la estrategia de recolección de datos para los ensayos SPT y DPSH.

##### 3.1.1. Unidades de estudio

Una recolección de datos en campo de los ensayos de SPT y DPSH, caracterizando la muestra de suelo extraída a cada metro de estudio.

##### 3.1.2. Población

Todos los ensayos en campo y laboratorio que corresponden al SPT y DPSH.

##### 3.1.3. Muestra

Selección de 30 puntos de muestreo en suelos arcillosos en ciudad de Tarija, distribuidos en diferentes áreas y a una profundidad de hasta 3,5 metros.

**Tabla 3.1** Muestra de ensayos realizados

| Ensayos de campo                         | Ensayos de laboratorio |
|------------------------------------------|------------------------|
| Penetración estándar (SPT)               | Contenido de humedad   |
| Penetración dinámica super pesada (DPSH) | Granulometría          |
|                                          | Limites Atterberg      |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 3.2. Características del área de estudio

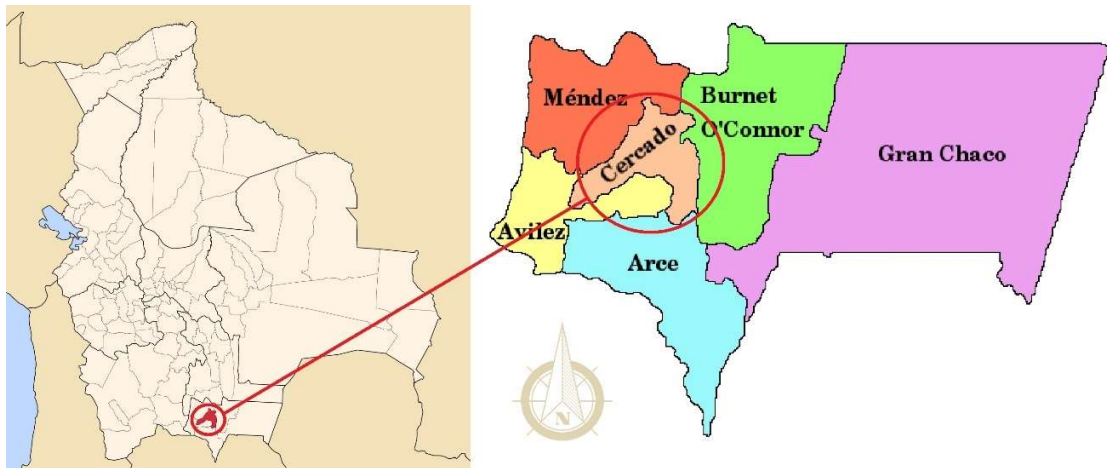
Esta sección describe el contexto geográfico, geológico y urbanístico de la zona investigada en la ciudad de Tarija

##### 3.2.1. Geografía, delimitación y área del municipio de Tarija

El municipio de Tarija está ubicado en el sur de Bolivia y ocupa el mismo territorio de la provincia Cercado, limita al norte y oeste con los municipios de San Lorenzo y El Puente

de la provincia de Méndez, al suroeste con el municipio de Yunchará y al sur con el municipio de Padcaya de la provincia de Aniceto Arce y al este con el municipio de Entre Ríos de la provincia O'Connor.

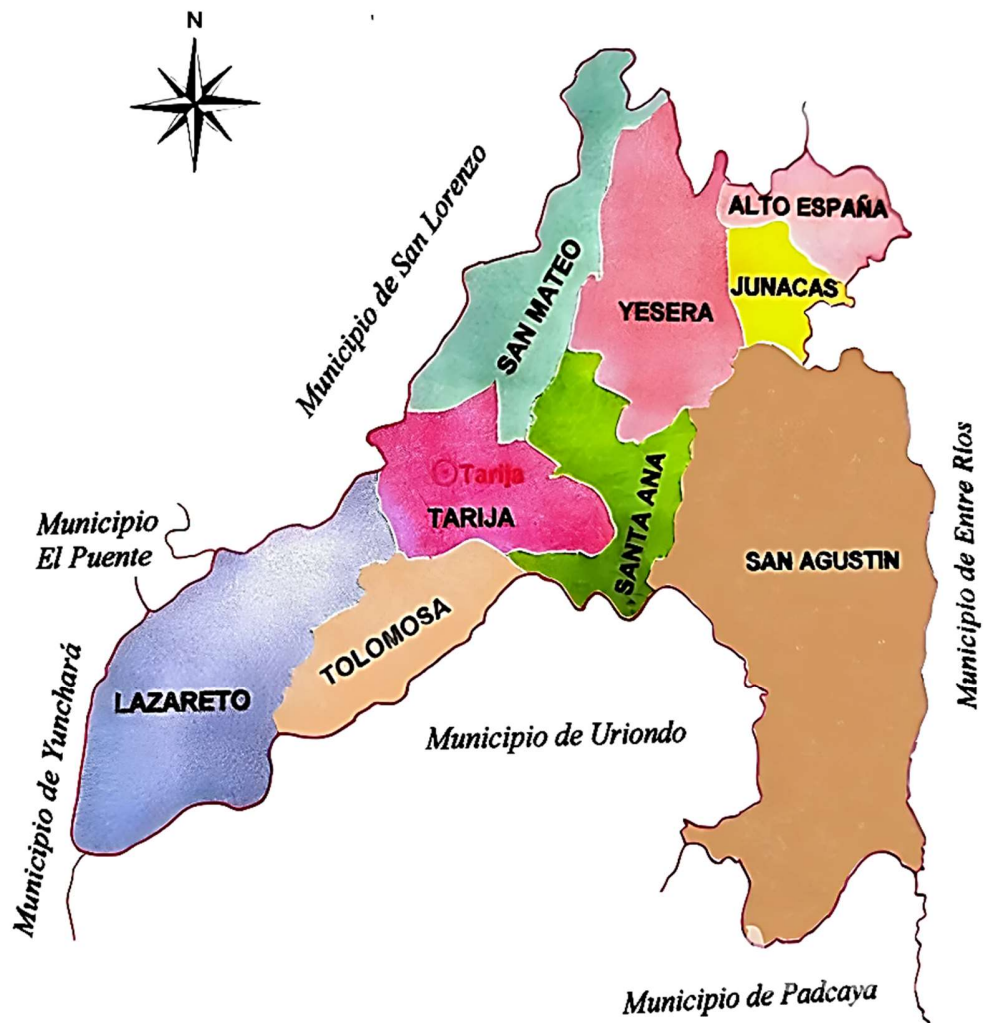
**Figura 3.1** Ubicación de la provincia cercado



**Fuente:** Propia.

La ciudad de Tarija se encuentra ubicada entre los municipios de Tolomosa en el sur, Santa Ana al este, San Mateo al norte y el municipio de san lorenzo al este.

**Figura 3.2 Ubicación de la ciudad de Tarija (capital)**

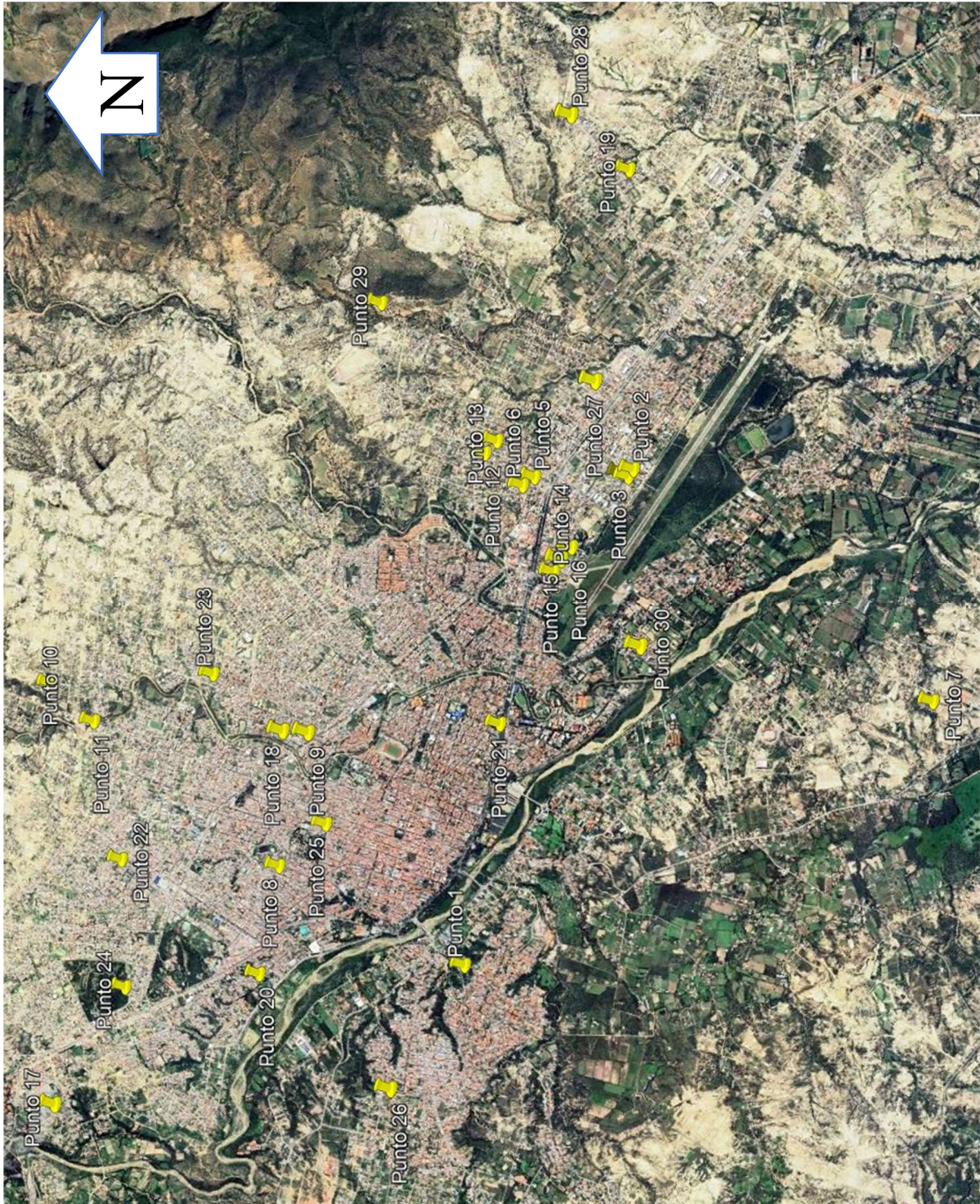


**Fuente:** Municipio de Tarija.

### 3.3. Ubicación de los puntos de investigación

Los puntos fueron distribuidos en zonas accesibles para el equipo y en donde no existieran restricciones físicas que limitaran el procedimiento.

**Figura 3.3** Ubicaciones de los puntos del proyecto en la ciudad de Tarija



Fuente: Google Earth, 2024.

**Tabla 3.2** Ubicaciones de los puntos con coordenadas geográficas UTM

| <b>Punto</b> | <b>Coordenadas</b> |            | <b>Cota</b>    | <b>Zona</b> |
|--------------|--------------------|------------|----------------|-------------|
|              | <b>UTM</b>         |            | <b>Inicial</b> |             |
|              | <b>Este</b>        | <b>Sur</b> | <b>m.s.n.m</b> |             |
| 1            | 319365.29          | 7617157.62 | 1913           | 20 K        |
| 2            | 323946.64          | 7615600.03 | 1859           | 20 K        |
| 3            | 323878.55          | 7615647.57 | 1858           | 20 K        |
| 4            | 323913.30          | 7615701.11 | 1861           | 20 K        |
| 5            | 323881.37          | 7616501.06 | 1878           | 20 K        |
| 6            | 323807.91          | 7616612.42 | 1882           | 20 K        |
| 7            | 321824.18          | 7612924.30 | 1868           | 20 K        |
| 8            | 320260.16          | 7618876.96 | 1886           | 20 K        |
| 9            | 321502.98          | 7618592.53 | 1877           | 20 K        |
| 10           | 321953.90          | 7621052.51 | 1902           | 20 K        |
| 11           | 321597.86          | 7620641.79 | 1887           | 20 K        |
| 12           | 324106.31          | 7616957.95 | 1878           | 20 K        |
| 13           | 324218.41          | 7616847.84 | 1876           | 20 K        |
| 14           | 323004.43          | 7616327.28 | 1865           | 20 K        |
| 15           | 323120.43          | 7616245.51 | 1864           | 20 K        |
| 16           | 323233.55          | 7616163.70 | 1865           | 20 K        |
| 17           | 317979.77          | 7621007.06 | 1959           | 20 K        |
| 18           | 32151570           | 7618831.20 | 1876           | 20 K        |
| 19           | 326697.93          | 7615638.38 | 1872           | 20 K        |
| 20           | 319249.31          | 7619064.40 | 1885           | 20 K        |

| Punto | Coordenadas |            | Cota    | Zona |
|-------|-------------|------------|---------|------|
|       | UTM         |            | Inicial |      |
|       | Este        | Sur        | m.s.n.m |      |
| 21    | 321596.03   | 7616820.49 | 1861    | 20 K |
| 22    | 320300.83   | 7620375.47 | 1902    | 20 K |
| 23    | 322048.69   | 7619500.26 | 1887    | 20 K |
| 24    | 319100.69   | 7620341.10 | 1923    | 20 K |
| 25    | 320658.16   | 7618437.33 | 1877    | 20 K |
| 26    | 318203.95   | 7617822.77 | 1930    | 20 K |
| 27    | 324755.03   | 7615936.47 | 1868    | 20 K |
| 28    | 327209.95   | 761656.90  | 1896    | 20 K |
| 29    | 325510.82   | 7617919.74 | 1899    | 20 K |
| 30    | 322312.47   | 7615524.04 | 1848    | 20 K |

**Fuente:** Elaboración propia

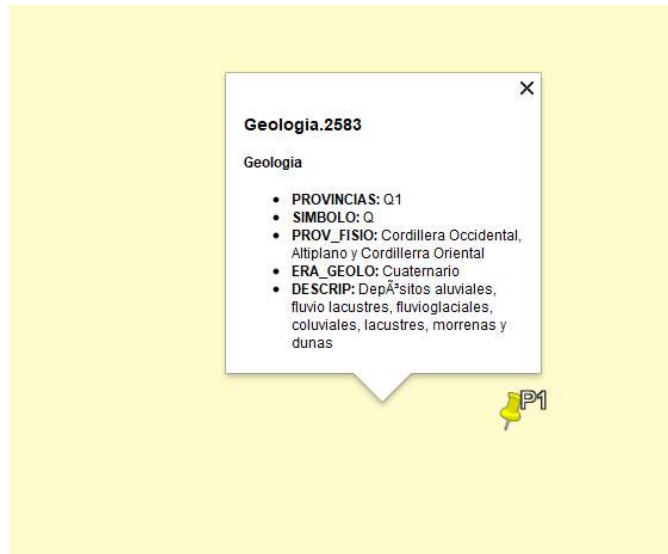
### 3.3.1. Geología general del área

Según el mapa geológico proporcionado por SERGEOMIN la zona está compuesta por sedimentos pertenecientes al periodo cuaternario.

Las cubiertas de sedimentos cuaternarios existentes en la cuenta Tarijeña sufren grandes variaciones, se compone de materiales aluviales y coluviales procedentes del altiplano y cordillera oriental. Estos sedimentos se presentan como capas estratigráficas, compuestas en su gran mayoría por arenas finas, limos y arcillas; también se han encontrado algunos niveles con arenas gruesas, intercaladas con conglomerados.

Los mismos que han sido afectados por un intenso transporte, eólico y fluvial siendo re trabajados y seleccionados durante su deposición.

**Figura 3.4** Geología de la ciudad de Tarija



**Fuente:** SERGEOMIN

### 3.3.2. Profundidad y distancia entre puntos

- **Profundidad:** Se definió una profundidad máxima de hasta 3.5 metros.
- **Distancia entre puntos:** Se utilizó una distancia mínima entre ensayos de 3 metros para evitar que las perturbaciones del suelo en un ensayo afecten a los datos de otro. De igual manera considerando que la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos dice que la distancia máxima recomendada para estratigrafía de variabilidad alta es de 20 metros, estamos dentro del margen de donde el ensayo SPT y DPSH no tenga variabilidad del tipo de suelos entre los dos ensayos.

### 3.3.3. Procedimiento de los ensayos

En esta sección se detallan los protocolos estandarizados aplicados para la ejecución de los ensayos SPT (Standard Penetration Test) y DPSH (Dynamic Probing Super Heavy) en los suelos arcillosos de Tarija.

#### 3.3.3.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó con ayuda del laboratorio de suelos INGEOSUD, los ensayos se realizaron cada que había un solicitante de ensayo de esa manera se pudo recolectar los datos tanto con SPT como con DPSH, la distancia entre ensayos en la misma

área de estudio se hizo a una distancia que no afecten las perturbaciones que pudiese haber con el otro ensayo.

#### **3.3.3.2. Preparación del terreno**

Se limpió y niveló el área de cada punto de ensayo para asegurar condiciones óptimas. En cada punto del proyecto se realizó ambos ensayos SPT y posteriormente DPSH.

#### **3.3.3.3. Ensayo SPT**

- Se utilizó el equipo penetrómetro automático con una cuchara Terzaghi para recolectar muestras de suelo.
- El procedimiento consistió en dejar caer un martillo de 63.5 kg desde una altura de 76 cm, midiendo el número de golpes necesarios para penetrar 15 cm del suelo en tres intervalos consecutivos.

#### **3.3.3.4. Ensayo DPSH**

- Se empleó el equipo penetrómetro automático con punta maciza, dejando caer un martillo de igual peso y altura que el SPT.
- Se midió el número de golpes necesarios para una penetración uniforme de 20 cm.
- Cada ensayo fue documentado en fichas técnicas, incluyendo condiciones del suelo, golpes registrados y profundidad alcanzada.

**Figura 3.5** Equipo en funcionamiento realizando el ensayo



**Fuente:** Elaboración propia

#### **3.3.3.5. Equipos utilizados**

La máquina de sondeo que se utilizó es ARCA 01 Kuarzo.

**Figura 3.6** Penetrómetro automático modelo ARCA 01 Kuarzo.



**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023

**3.3.3.6. Características del equipo**

**Tabla 3.3** Características equipo modelo ARCA 01 Kuarzo

| Sistema de Golpeo automático |                |
|------------------------------|----------------|
| Caída de masa                | 760 mm         |
| Peso de masa                 | 63.5 kg        |
| Motor                        |                |
| Marca/Modelo                 | Honda GX390    |
| Cilindros                    | Eje horizontal |
| Potencia                     | 13 HP          |

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| Rpm                             | 3600                   |
| <b>Sistema Hidráulico</b>       |                        |
| Bomba                           | 16Lt/min               |
| Motor                           | 80 cc                  |
| Cilindro                        | 1300 mm de carrera     |
| Presión de Trabajo              | 150 Kg/cm <sup>2</sup> |
| Capacidad de deposito           | 25 lts                 |
| <b>Herramientas compatibles</b> |                        |
| Diámetro                        | 50mm. 40mm             |
| Largo                           | 1000mm. 1500mm         |

**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023.

### 3.3.3.7. Característica del muestreador – cuchara Terzaghi

**Figura 3.7** Cuchara Terzaghi



**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023.

- Saca muestras bipartido punta de acero con cabeza de acoplamiento con dos orificios y válvula de retención de bola
- Diámetro externo 2 pulg.
- Diámetro interno 1 3/8 pulg.
- Longitud de cuchara 27 pulg.

### 3.3.3.8. Característica punta cónica DPSH

**Figura 3.8** Punta cónica para DPSH



**Fuente:** Revista Kuarzo Perforadoras Compactas, 2023.

- La punta o cono de penetración presenta un ángulo de ataque de  $90^\circ$
- Punta recuperable.
- Área nominal de la sección  $20 \text{ cm}^2$ .
- Diámetro 50.5 mm.

### 3.3.3.9. Normas utilizadas

- Ensayo de penetración estándar (SPT) Norma de Referencia ASTM D1586.
- Ensayo de penetración dinámica super pesada (DPSH) Norma de Referencia UNE-EN ISO 22476-2.

Ambas Normas de referencia están indicadas y aprobadas por la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos.

### 3.3.4. Trabajo de laboratorio

A partir de las muestras extraídas se realizaron los diferentes ensayos de laboratorio, cuya relación nominal es la siguiente:

- Contenido de Humedad Natural según ASTM D-2216-71
- Análisis granulométrico según ASTM D-6913
- Límites de consistencia
  - Límite líquido según BS 1377-2
  - Límite Plástico según ASTM D-4318
  - Índice de plasticidad
- Clasificación Unificada de Suelos (S.U.C.S.) ASTM D-2487-66

Todas las normas están validadas en la Norma Boliviana de Estudios Geotécnicos.

### 3.4. Número de golpes del ensayo SPT y DPSH con clasificación

**Tabla 3.4** Valores obtenidos en los ensayos SPT y DPSH

| Punto N.º | ID.   | Profundidad<br>(m) | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM<br>D 2487 | Número<br>De<br>Golpes |     |
|-----------|-------|--------------------|-----------------------------------------------------|------------------------|-----|
|           |       |                    |                                                     | DPSH                   | SPT |
| 1         | P1-01 | 1.00               | CL                                                  | 7                      | 12  |
|           | P1-02 | 2.00               | CL                                                  | 9                      | 16  |
|           | P1-03 | 3.00               | CH                                                  | 12                     | 17  |
| 2         | P2-01 | 1.00               | CL                                                  | 5                      | 13  |
|           | P2-02 | 2.00               | CL                                                  | 4                      | 10  |
|           | P2-03 | 3.00               | CL-ML                                               | 9                      | 19  |
| 3         | P3-01 | 1.50               | CL                                                  | 2                      | 4   |
|           | P3-02 | 2.50               | CL                                                  | 5                      | 10  |

|    |        |      |       |    |    |
|----|--------|------|-------|----|----|
|    | P3-03  | 3.50 | CL    | 5  | 10 |
| 4  | P4-01  | 1.50 | CL    | 1  | 2  |
|    | P4-02  | 2.50 | CL    | 4  | 6  |
|    | P4-03  | 3.50 | CH    | 21 | 40 |
| 5  | P5-01  | 1.50 | CL-ML | 6  | 6  |
|    | P5-02  | 2.50 | CH    | 3  | 7  |
|    | P5-03  | 3.50 | CH    | 7  | 9  |
| 6  | P6-01  | 1.50 | CL    | 5  | 6  |
|    | P6-02  | 2.50 | CL    | 7  | 8  |
|    | P6-03  | 3.50 | CH    | 8  | 9  |
| 7  | P7-01  | 1.50 | CL-ML | 27 | 34 |
|    | P7-02  | 2.50 | CL    | 21 | 24 |
|    | P7-03  | 3.50 | CL    | 20 | 22 |
| 8  | P8-01  | 1.50 | CL    | 8  | 14 |
|    | P8-02  | 2.50 | CL    | 9  | 18 |
|    | P8-03  | 3.50 | CL    | 9  | 17 |
| 9  | P9-01  | 1.50 | CL    | 15 | 17 |
|    | P9-02  | 2.50 | CL    | 15 | 13 |
|    | P9-03  | 3.50 | CL    | 14 | 12 |
| 10 | P10-01 | 1.00 | CL    | 2  | 4  |
|    | P10-02 | 2.00 | CL-ML | 1  | 2  |
|    | P10-03 | 3.00 | CL-ML | 2  | 2  |
| 11 | P11-01 | 1.00 | CL-ML | 8  | 9  |

|    |        |      |       |    |    |
|----|--------|------|-------|----|----|
|    | P11-02 | 2.00 | CL    | 22 | 30 |
|    | P11-03 | 3.00 | CL    | 26 | 31 |
| 12 | P12-01 | 1.50 | CH    | 12 | 20 |
|    | P12-02 | 2.50 | CH    | 7  | 11 |
|    | P12-03 | 3.50 | CL    | 13 | 25 |
| 13 | P13-01 | 1.50 | CH    | 14 | 26 |
|    | P13-02 | 2.50 | CL    | 16 | 24 |
|    | P13-03 | 3.50 | CL    | 21 | 24 |
| 14 | P14-01 | 1.50 | CL    | 9  | 14 |
|    | P14-02 | 2.50 | CL    | 9  | 11 |
|    | P14-03 | 3.50 | CL-ML | 11 | 12 |
| 15 | P15-01 | 1.50 | CL    | 12 | 17 |
|    | P15-02 | 2.50 | CL-ML | 8  | 9  |
|    | P15-03 | 3.50 | CL-ML | 11 | 13 |
| 16 | P16-01 | 1.50 | CL    | 7  | 13 |
|    | P16-02 | 2.50 | CL    | 11 | 12 |
|    | P16-03 | 3.50 | CL-ML | 9  | 9  |
| 17 | P17-01 | 1.50 | CL    | 3  | 7  |
|    | P17-02 | 2.50 | CL    | 5  | 7  |
|    | P17-03 | 3.50 | CL    | 2  | 3  |
| 18 | P18-01 | 1.50 | CL    | 5  | 12 |
|    | P18-02 | 2.50 | CH    | 18 | 30 |
|    | P18-03 | 3.50 | CH    | 26 | 48 |

|    |        |      |    |    |    |
|----|--------|------|----|----|----|
| 19 | P19-02 | 1.50 | CL | 13 | 25 |
|    | P19-03 | 2.50 | CL | 27 | 42 |
|    | P19-01 | 3.50 | CH | 21 | 43 |
| 20 | P20-01 | 1.00 | CH | 5  | 9  |
|    | P20-02 | 2.00 | CH | 5  | 8  |
|    | P20-03 | 3.00 | CL | 4  | 6  |
| 21 | P21-01 | 1.00 | CL | 6  | 10 |
|    | P21-02 | 2.00 | CL | 7  | 9  |
|    | P21-03 | 3.00 | CH | 6  | 11 |
| 22 | P22-01 | 1.50 | CH | 11 | 19 |
|    | P22-02 | 2.50 | CL | 15 | 20 |
|    | P22-03 | 3.50 | CL | 12 | 15 |
| 23 | P23-01 | 1.50 | CH | 11 | 22 |
|    | P23-03 | 2.50 | CL | 18 | 29 |
|    | P23-02 | 3.50 | CL | 17 | 30 |
| 24 | P24-01 | 1.00 | CL | 8  | 12 |
|    | P24-02 | 2.00 | CL | 9  | 12 |
|    | P24-03 | 3.00 | CL | 7  | 11 |
| 25 | P25-01 | 1.00 | CL | 10 | 13 |
|    | P25-02 | 2.00 | CL | 8  | 11 |
|    | P25-03 | 3.00 | CL | 9  | 13 |
| 26 | P26-01 | 1.50 | CL | 14 | 22 |
|    | P26-02 | 2.50 | CL | 8  | 13 |

|    |        |      |       |    |    |
|----|--------|------|-------|----|----|
|    | P26-03 | 3.50 | CL    | 6  | 12 |
| 27 | P27-01 | 1.50 | CL-ML | 17 | 21 |
|    | P27-02 | 2.50 | CL    | 17 | 25 |
|    | P27-03 | 3.50 | CL    | 20 | 27 |
| 28 | P28-01 | 1.50 | CL    | 2  | 2  |
|    | P28-02 | 2.50 | CL    | 4  | 6  |
|    | P28-03 | 3.50 | CL    | 4  | 6  |
| 29 | P29-01 | 1.00 | CL-ML | 28 | 34 |
|    | P29-02 | 2.00 | CL    | 30 | 43 |
|    | P29-03 | 3.00 | CL    | 30 | 43 |
| 30 | P30-01 | 1.00 | CL    | 8  | 13 |
|    | P30-02 | 2.00 | CL    | 11 | 16 |
|    | P30-03 | 3.00 | CL    | 13 | 17 |

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5. Resumen detallado de la caracterización de los suelos

**Tabla 3.5** Caracterización detallada de todos los puntos

| Punto N.º | ID.   | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|-------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |       | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 1         | P1-01 | 1.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.64 | 77.72 | 17.01                      | 31.04                | 20.18 | 10.87 |
|           | P1-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.94  | 94.82 | 80.05 | 24.83                      | 35.46                | 23.54 | 11.93 |
|           | P1-03 | 3.00  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.90 | 99.64 | 26.76                      | 51.76                | 26.50 | 25.26 |
| 2         | P2-01 | 1.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.84 | 88.75 | 19.43                      | 32.52                | 21.27 | 11.25 |
|           | P2-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.86  | 99.43 | 96.05 | 24.37                      | 46.40                | 26.53 | 19.87 |
|           | P2-03 | 3.00  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.70  | 97.75 | 49.87 | 8.80                       | 21.11                | 15.13 | 5.97  |
| 3         | P3-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.91 | 96.08 | 15.78                      | 42.30                | 24.09 | 18.21 |
|           | P3-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.96  | 99.58 | 78.73 | 9.13                       | 25.41                | 15.51 | 9.89  |
|           | P3-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 98.26  | 94.93 | 82.07 | 17.45                      | 32.99                | 22.79 | 10.20 |
| 4         | P4-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 98.78 | 95.51 | 17.80                      | 29.99                | 16.46 | 13.52 |
|           | P4-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.38 | 98.21 | 19.79                      | 35.02                | 19.26 | 15.76 |
|           | P4-03 | 3.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 97.82 | 94.72 | 14.33                      | 51.77                | 26.72 | 25.05 |

| Punto N.º | ID.   | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|-------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |       | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 5         | P5-01 | 1.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 98.89  | 94.77 | 65.36 | 12.41                      | 22.95                | 17.52 | 5.43  |
|           | P5-02 | 2.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.90 | 99.66 | 26.37                      | 52.64                | 29.51 | 23.13 |
|           | P5-03 | 3.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.65 | 98.01 | 28.21                      | 58.49                | 29.52 | 28.96 |
| 6         | P6-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.49 | 68.73 | 12.68                      | 30.06                | 18.38 | 11.68 |
|           | P6-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.73  | 99.16 | 78.06 | 15.36                      | 36.12                | 20.53 | 15.58 |
|           | P6-03 | 3.50  | CH                                        | 100.00                    | 99.56  | 95.75 | 63.83 | 18.79                      | 54.51                | 28.76 | 25.75 |
| 7         | P7-01 | 1.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.51  | 97.69 | 70.69 | 5.54                       | 24.00                | 18.62 | 5.38  |
|           | P7-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 98.70 | 75.02 | 9.76                       | 25.45                | 15.84 | 9.61  |
|           | P7-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 98.95 | 72.80 | 9.93                       | 27.58                | 18.48 | 9.09  |
| 8         | P8-01 | 1.50  | CL                                        | 98.81                     | 97.84  | 96.03 | 84.69 | 16.49                      | 33.40                | 21.93 | 11.47 |
|           | P8-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.68  | 96.39 | 89.34 | 19.59                      | 36.52                | 23.91 | 12.61 |
|           | P8-03 | 3.50  | CL                                        | 98.77                     | 97.99  | 95.38 | 88.39 | 23.13                      | 46.81                | 27.00 | 19.80 |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 9         | P9-01  | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.84 | 97.67 | 13.80                      | 43.11                | 26.06 | 17.05 |
|           | P9-02  | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.54  | 98.85 | 94.52 | 15.57                      | 41.03                | 25.48 | 15.55 |
|           | P9-03  | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 98.88 | 84.88 | 18.83                      | 27.43                | 19.52 | 7.91  |
| 10        | P10-01 | 1.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.32  | 95.97 | 83.17 | 9.90                       | 34.42                | 20.54 | 13.87 |
|           | P10-02 | 2.00  | CL-ML                                     | 100.00                    | 100.00 | 99.99 | 99.86 | 12.19                      | 27.42                | 20.50 | 6.92  |
|           | P10-03 | 3.00  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.37  | 95.19 | 64.90 | 9.55                       | 25.48                | 18.80 | 6.68  |
| 11        | P11-01 | 1.00  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.93  | 97.81 | 80.93 | 16.42                      | 24.85                | 17.87 | 6.98  |
|           | P11-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.62 | 93.76 | 22.74                      | 45.15                | 25.59 | 19.56 |
|           | P11-03 | 3.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.39 | 95.15 | 23.79                      | 43.66                | 26.06 | 17.60 |
| 12        | P12-01 | 1.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.45 | 75.16 | 18.68                      | 55.88                | 32.14 | 23.74 |
|           | P12-02 | 2.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.96 | 99.56 | 26.65                      | 60.72                | 26.71 | 34.02 |
|           | P12-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.65 | 87.55 | 15.41                      | 31.58                | 20.53 | 11.05 |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 13        | P13-01 | 1.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.67 | 85.56 | 13.01                      | 54.50                | 28.55 | 25.95 |
|           | P13-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.91 | 99.61 | 20.74                      | 41.33                | 24.92 | 16.41 |
|           | P13-03 | 3.50  | CL                                        | 99.60                     | 99.22  | 99.00 | 95.34 | 9.10                       | 36.88                | 24.17 | 12.71 |
| 14        | P14-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.65 | 87.55 | 15.41                      | 31.58                | 20.53 | 11.05 |
|           | P14-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 97.92 | 64.57 | 17.61                      | 24.61                | 17.00 | 7.61  |
|           | P14-03 | 3.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 100.00 | 98.20 | 52.12 | 6.26                       | 21.36                | 16.93 | 4.43  |
| 15        | P15-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.87 | 94.67 | 15.93                      | 38.39                | 23.89 | 14.51 |
|           | P15-02 | 2.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.75  | 97.60 | 62.06 | 7.48                       | 21.93                | 16.62 | 5.31  |
|           | P15-03 | 3.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 100.00 | 99.81 | 82.27 | 2.86                       | 23.49                | 17.37 | 6.12  |
| 16        | P16-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.68 | 75.64 | 13.02                      | 33.99                | 21.22 | 12.76 |
|           | P16-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.54  | 96.29 | 76.28 | 8.33                       | 26.97                | 18.12 | 8.85  |
|           | P16-03 | 3.50  | CL-ML                                     | 100.00                    | 99.92  | 98.79 | 73.99 | 7.33                       | 22.79                | 16.55 | 6.24  |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 17        | P17-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.97  | 98.77 | 87.00 | 18.65                      | 37.77                | 20.72 | 17.05 |
|           | P17-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.96  | 99.09 | 74.35 | 16.06                      | 25.49                | 17.92 | 7.56  |
|           | P17-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 98.35 | 69.78 | 8.14                       | 26.54                | 19.12 | 7.42  |
| 18        | P18-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.94  | 98.82 | 88.22 | 11.15                      | 31.74                | 17.57 | 14.17 |
|           | P18-02 | 2.50  | CH                                        | 100.00                    | 99.91  | 99.29 | 97.69 | 19.72                      | 64.79                | 24.50 | 40.29 |
|           | P18-03 | 3.50  | CH                                        | 100.00                    | 99.54  | 99.30 | 84.63 | 26.58                      | 63.03                | 25.87 | 37.16 |
| 19        | P19-02 | 1.50  | CL                                        | 99.19                     | 98.67  | 97.93 | 93.43 | 7.52                       | 31.69                | 21.32 | 10.37 |
|           | P19-03 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 97.28 | 67.10 | 7.68                       | 25.81                | 18.56 | 7.25  |
|           | P19-01 | 3.50  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.89 | 98.58 | 16.27                      | 50.95                | 26.38 | 24.57 |
| 20        | P20-01 | 1.00  | CH                                        | 98.85                     | 98.29  | 95.78 | 81.36 | 24.33                      | 54.48                | 28.80 | 25.67 |
|           | P20-02 | 2.00  | CH                                        | 100.00                    | 99.75  | 99.09 | 96.92 | 26.05                      | 60.54                | 30.28 | 30.26 |
|           | P20-03 | 3.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.81  | 97.07 | 80.86 | 22.36                      | 26.78                | 19.31 | 7.47  |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 21        | P21-01 | 1.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 96.48 | 92.34 | 23.10                      | 35.20                | 21.90 | 13.29 |
|           | P21-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.68  | 98.57 | 71.12 | 19.43                      | 24.92                | 16.90 | 8.02  |
|           | P21-03 | 3.00  | CH                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.49 | 68.73 | 18.39                      | 53.40                | 31.18 | 22.22 |
| 22        | P22-01 | 1.50  | CH                                        | 98.73                     | 97.84  | 95.54 | 88.65 | 19.24                      | 51.11                | 26.91 | 24.20 |
|           | P22-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.73  | 99.13 | 86.50 | 19.17                      | 39.07                | 24.60 | 14.47 |
|           | P22-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.91  | 98.47 | 50.14 | 14.00                      | 29.22                | 20.09 | 9.13  |
| 23        | P23-01 | 1.50  | CH                                        | 97.73                     | 97.02  | 95.12 | 87.02 | 15.56                      | 50.36                | 27.72 | 22.64 |
|           | P23-03 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.73 | 92.09 | 13.53                      | 29.14                | 18.81 | 10.33 |
|           | P23-02 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.75  | 96.64 | 58.20 | 6.94                       | 31.03                | 20.97 | 10.06 |
| 24        | P24-01 | 1.00  | CL                                        | 95.15                     | 91.87  | 85.55 | 63.99 | 14.16                      | 30.44                | 20.18 | 10.26 |
|           | P24-02 | 2.00  | CL                                        | 89.56                     | 87.49  | 82.78 | 64.20 | 11.17                      | 30.66                | 20.15 | 10.51 |
|           | P24-03 | 3.00  | CL                                        | 96.83                     | 94.79  | 92.24 | 74.53 | 15.62                      | 32.48                | 21.02 | 11.46 |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |        |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|--------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10   | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 25        | P25-01 | 1.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.40  | 96.06 | 79.67 | 14.81                      | 27.23                | 19.42 | 7.81  |
|           | P25-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.80  | 99.68 | 86.56 | 19.72                      | 35.43                | 21.99 | 13.44 |
|           | P25-03 | 3.00  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.71 | 91.67 | 21.82                      | 36.54                | 22.09 | 14.44 |
| 26        | P26-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.81  | 98.05 | 91.18 | 13.93                      | 39.12                | 23.34 | 15.77 |
|           | P26-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.94  | 98.91 | 94.17 | 17.74                      | 40.37                | 23.68 | 16.69 |
|           | P26-03 | 3.50  | CL                                        | 96.35                     | 94.64  | 89.18 | 76.86 | 19.27                      | 40.80                | 24.36 | 16.44 |
| 27        | P27-01 | 1.50  | CL-ML                                     | 99.82                     | 99.47  | 98.45 | 61.96 | 8.51                       | 20.06                | 15.34 | 4.72  |
|           | P27-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.72 | 84.25 | 14.10                      | 34.03                | 21.78 | 12.26 |
|           | P27-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 100.00 | 99.63 | 96.40 | 23.99                      | 31.74                | 20.37 | 11.37 |
| 28        | P28-01 | 1.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.11  | 95.10 | 77.12 | 9.69                       | 26.36                | 18.05 | 8.32  |
|           | P28-02 | 2.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.39  | 92.29 | 79.33 | 14.14                      | 31.51                | 21.12 | 10.39 |
|           | P28-03 | 3.50  | CL                                        | 100.00                    | 99.65  | 95.73 | 82.82 | 16.80                      | 30.63                | 20.96 | 9.67  |

| Punto N.º | ID.    | Prof. | Clasificación<br>De suelos<br>SUCS - ASTM | Porcentaje que pasa tamiz |       |       |       | Contenido<br>De<br>Humedad | Límites de Atterberg |       |       |
|-----------|--------|-------|-------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|----------------------------|----------------------|-------|-------|
|           |        | (m)   | D 2487                                    | Nº4                       | Nº10  | Nº40  | Nº200 | W%                         | LL                   | LP    | IP    |
| 29        | P29-01 | 1.00  | CL-ML                                     | 95.65                     | 91.26 | 82.69 | 43.44 | 6.20                       | 21.01                | 14.57 | 6.44  |
|           | P29-02 | 2.00  | CL                                        | 100.00                    | 98.65 | 94.08 | 67.92 | 8.67                       | 29.11                | 20.52 | 8.59  |
|           | P29-03 | 3.00  | CL                                        | 99.33                     | 98.06 | 91.46 | 51.01 | 6.42                       | 30.63                | 15.52 | 15.11 |
| 30        | P30-01 | 1.00  | CL                                        | 83.31                     | 77.08 | 66.07 | 42.70 | 18.12                      | 33.51                | 19.93 | 13.58 |
|           | P30-02 | 2.00  | CL                                        | 98.74                     | 98.51 | 97.24 | 89.17 | 22.03                      | 37.82                | 24.53 | 13.29 |
|           | P30-03 | 3.00  | CL                                        | 100.00                    | 99.97 | 97.99 | 85.55 | 20.20                      | 34.38                | 22.51 | 11.87 |

**Fuente:** Elaboración propia

### **3.6. Procesamiento y Validación Estadística de los Ensayos**

En esta sección se detallan los procedimientos estadísticos aplicados para establecer y validar la correlación entre los valores obtenidos mediante los ensayos SPT y DPSH. El tratamiento de los datos incluyó la organización de la información recolectada en campo, la verificación de su comportamiento mediante herramientas estadísticas y la construcción de modelos matemáticos de ajuste.

#### **3.6.1. Validación estadística mediante prueba F**

Para verificar la validez estadística de las ecuaciones de correlación desarrolladas entre los resultados del ensayo DPSH y el SPT, se utilizó la prueba F aplicada mediante la herramienta de análisis de regresión de Microsoft Excel.

Esta prueba estadística se emplea para determinar si el modelo de regresión obtenido explica una parte significativa de la variabilidad total de los datos. En otras palabras, la prueba F permite evaluar si la relación entre las variables independientes (golpes DPSH) y la variable dependiente (golpes SPT) es estadísticamente significativa, y si la ecuación generada es adecuada para representar el comportamiento observado.

Para eso primero nos ayudamos el programa Excel con su complemento análisis de datos, con este análisis queremos demostrar que la varianza entre nuestro número de golpes de campo, y nuestro número de golpes predicho con la ecuación encontrada es aplicable.

En el contexto de este estudio, la prueba F se utilizó para comprobar si el modelo de regresión aplicado en cada tipo de suelo (CH, CL, CL-ML) tiene un nivel de ajuste lo suficientemente alto como para no ser producto del azar.

#### **3.6.2. Aplicación de la prueba F**

La prueba se ejecutó mediante el complemento Herramientas para análisis de datos de Excel, seleccionando la opción Regresión. Se ingresaron los datos de golpes DPSH como variable independiente (X) y los golpes SPT como variable dependiente (Y), de forma separada para cada tipo de suelo.

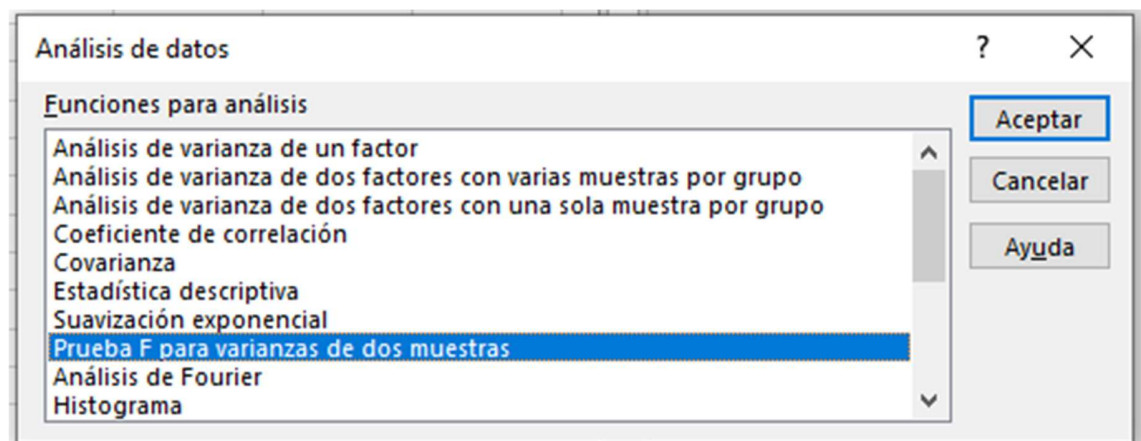
Se interpreta que el valor calculado de F es considerablemente mayor que el valor F crítico de la tabla (F crítico), y el p-valor es menor a 0.05, se concluye que el modelo tiene validez estadística con un 95% de confianza. En todos los casos analizados en este proyecto, se obtuvo un valor de  $p < 0.05$ , lo que indica que las ecuaciones desarrolladas son estadísticamente significativas y que el número de golpes DPSH tiene una relación válida con el número de golpes SPT.

Esto respalda que las correlaciones propuestas pueden ser utilizadas con confianza en el análisis de suelos arcillosos en la ciudad de Tarija, particularmente cuando se desea estimar valores SPT a partir de ensayos DPSH en suelos CH, CL y CL-ML.

A continuación, se muestra capturas del software:

Mediante el software Excel primero escogemos la función que necesitamos en este caso prueba F para varianza de dos muestras

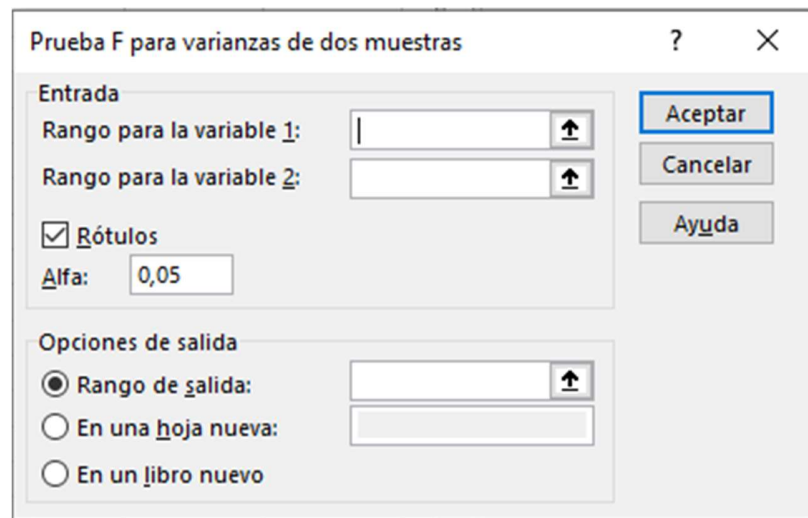
**Figura 3.9** Prueba F para varianza de dos muestras



**Fuente:** Elaboración propia

Continuando introducimos la columna de los datos del SPT (medido) en el rango de la variable 1, en el rango de la variable 2 introducimos los valores que obtuvimos mediante la ecuación SPT (predicho), el alfa es de valor 0.05 que nos indica que dicha prueba tiene una confianza del 95%.

**Figura 3.10** Introducción de datos para el análisis de la variable F



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.7. Aplicación práctica de los resultados

Para que el proyecto tenga una aplicación práctica, se realizó el cálculo de la capacidad portante de los suelos estudiados en esta investigación, con sus respectivas ecuaciones obtenidas tanto para las arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL) y arcillas limosas (CL-ML). Como vimos anterior mente para llegar a obtener los parámetros de resistencia de los suelos estudiados, previamente se necesita corregir el valor de campo, a continuación, se muestra el proceso.

#### 3.7.1. Obtención del valor $N_{60}$ a partir de la correlación

En esta investigación, una vez obtenida la correlación entre los resultados de los ensayos SPT y DPSH, se procedió a calcular el valor  $N_{60}$  a partir de los valores estimados de SPT. El valor  $N_{60}$  representa una versión corregida del número de golpes SPT, ajustada a una eficiencia energética estándar del 60%, lo cual permite normalizar los resultados y compararlos entre diferentes estudios, proyectos o equipos de trabajo.

El uso del  $N_{60}$  es fundamental en geotecnia, ya que muchas correlaciones empíricas reconocidas internacionalmente utilizan este valor como base para estimar propiedades del suelo, en este caso lo utilizamos para estimar parámetros de resistencia del suelo, para

comparar los resultados que obtenemos en campo y los que obtendríamos utilizando la ecuación.

### 3.7.2. Correcciones

Para la obtención de parámetros de resistencia previamente se necesita el número de golpes SPT corregido es decir el valor de  $N_{60}$ .

#### 3.7.2.1. Cálculo del $N_{60}$

El cálculo para el valor e  $N_{60}$  está dada por la siguiente ecuación donde en sus variables tenemos correcciones como eficiencias:

$$N_{60} = C_B \times C_S \times C_R \times \frac{E R_f \times N_{SPT}}{60}$$

Donde:

$E R_f$  = eficiencia del martillo

$C_B$  = Corrección por diámetro del orificio

$C_S$  = Corrección por muestreador

$C_R$  = Corrección por largo de barra

$N_{SPT}$  = Valor SPT medido

Correcciones para SPT

| Factor              | Equipment Variable     | Term  | Correction                                    |
|---------------------|------------------------|-------|-----------------------------------------------|
| Overburden Pressure |                        | $C_N$ | $(P_n / \sigma'_{vo})^{0.5}$ but $C_N \leq 2$ |
| Energy ratio        | Donut Hammer           | $C_E$ | 0.5 to 1.0                                    |
|                     | Safety Hammer          |       | 0.7 to 1.2                                    |
|                     | Automatic Hammer       |       | 0.8 to 1.5                                    |
| Borehole diameter   | 65 mm to 115 mm        | $C_B$ | 1.0                                           |
|                     | 150 mm                 |       | 1.05                                          |
|                     | 200 mm                 |       | 1.15                                          |
| Rod length          | 3 m to 4 m             | $C_R$ | 0.75                                          |
|                     | 4 m to 6 m             |       | 0.85                                          |
|                     | 6 m to 10 m            |       | 0.95                                          |
|                     | 10 m to 30 m           |       | 1.0                                           |
|                     | >30 m                  |       | <1.0                                          |
| Sampling method     | Standard sampler       | $C_S$ | 1.0                                           |
|                     | Sampler without liners |       | 1.1 to 1.3                                    |

**Fuente:** Skempton, 1986

$ER_f = 80$  Dato sumido por tabla ( Eficiencia del equipo es 80% de energía)

$C_B = 1,00$  para orificio de 100 mm (el orificio de los estudios es de aprox. 10 cm)

$C_S =$  Para muestreador sin camisa interior (Se realizaron sin camisa interior)

$C_R = 0.75$  para profundidad 3 a 4 metros (La profundidad max. de este estudio es 3,5 m)

### 3.7.3. Cálculo de parámetro de resistencia del suelo

En esta sección se presentan los procedimientos utilizados para la estimación de los parámetros de resistencia del suelo..

#### 3.7.3.1. Correlación entre Su-N(SPT)

Mediante la siguiente tabla tenemos las correlaciones entre el N60 ya calculado anteriormente y la cohesión no drenada

**Figura 3.11** Correlación previa entre Su-N(SPT)

| Researchers               | Explanation         | $S_u$ (kPa)     |
|---------------------------|---------------------|-----------------|
| Sivrikaya & Toğrol (2002) | Highly plastic soil | $4.85N_{field}$ |
|                           |                     | $6.82N_{60}$    |
|                           | Low plastic soil    | $3.35N_{field}$ |
|                           |                     | $4.93N_{60}$    |
|                           | Fine-grained soil   | $4.32N_{field}$ |
|                           |                     | $6.18N_{60}$    |

**Fuente:** Kalantari, 2011

Donde tenemos estas dos ecuaciones donde dependiendo que tipo de suelo es para nuestra investigación usamos las ecuaciones:

$$Su(Kpa) = 4,93 * N_{60} \text{ Suelos de baja plasticidad CL y CL-ML}$$

$$Su(Kpa) = 6,82 * N_{60} \text{ Suelos de alta plasticidad CH}$$

#### 3.7.4. Capacidad de carga ultima neta

$$q_{u(neta)} = 5,7 * Su$$

Donde el valor de Su lo obtenemos de las ecuaciones mostradas en el anterior subtitulo dependiendo el tipo de suelo que estemos calculando.

### 3.7.5. Capacidad de carga segura

Se calcula la capacidad de carga admisible nominal del suelo en sí, es decir cuanto resiste el suelo arcilloso en estudio. Dada por la formula:

$$q_{adm} = \frac{q_{u(neta)}}{FS} = \frac{5,7 * Su}{3}$$

$$q_{adm} = 1,9 * Su$$

Donde el factor de seguridad (FS) es 3 ya que es el valor que se usa para estar del lado de la seguridad, estas ecuaciones se obtuvieron de Bodó & Jones, 2013.

Como se mencionó anteriormente este valor de carga admisible es su aplicación práctica para que sirva de ejemplo de los valores que se obtendrían con los valores de SPT (medido) y compararlos con los valores que se obtendrá con la ecuación SPT (predicho).

## CAPITULO IV

### ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LA CORRELACIÓN SPT–DPSH

#### 4.1. Introducción

Los datos fueron obtenidos por los estudios de suelo, tanto en SPT y DPSH, realizados junto con la empresa INGEOSUD, con una cantidad total de 30 puntos de muestreo y que en cada punto se realizó ambos ensayos a la misma profundidad. Obteniendo como resultado 180 datos en total.

**Tabla 4.1** Número de datos recolectados

| Ensayos | Datos obtenidos |
|---------|-----------------|
| SPT     | 90              |
| DPSH    | 90              |
| Total   | 180             |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.2. Datos de estudio número de golpes SPT y DPSH

En la siguiente tabla se muestra el número de golpes SPT y DPSH tomados en campo:

**Tabla 4.2** Numero de golpes para el análisis de la correlación

| Punto N.º | Profundidad<br>(m) | Número<br>De<br>Golpes |     |
|-----------|--------------------|------------------------|-----|
|           |                    | DPSH                   | SPT |
| 1         | 1.00               | 7                      | 12  |
|           | 2.00               | 9                      | 16  |
|           | 3.00               | 12                     | 17  |
| 2         | 1.00               | 5                      | 13  |

|   |      |    |    |
|---|------|----|----|
|   | 2.00 | 4  | 10 |
|   | 3.00 | 9  | 19 |
| 3 | 1.50 | 2  | 4  |
|   | 2.50 | 5  | 10 |
|   | 3.50 | 5  | 10 |
| 4 | 1.50 | 1  | 2  |
|   | 2.50 | 4  | 6  |
|   | 3.50 | 21 | 40 |
| 5 | 1.50 | 6  | 6  |
|   | 2.50 | 3  | 7  |
|   | 3.50 | 7  | 9  |
| 6 | 1.50 | 5  | 6  |
|   | 2.50 | 7  | 8  |
|   | 3.50 | 8  | 9  |
| 7 | 1.50 | 27 | 34 |
|   | 2.50 | 21 | 24 |
|   | 3.50 | 20 | 22 |
| 8 | 1.50 | 8  | 14 |
|   | 2.50 | 9  | 18 |
|   | 3.50 | 9  | 17 |
| 9 | 1.50 | 15 | 17 |
|   | 2.50 | 15 | 13 |
|   | 3.50 | 14 | 12 |

|    |      |    |    |
|----|------|----|----|
| 10 | 1.00 | 2  | 4  |
|    | 2.00 | 1  | 2  |
|    | 3.00 | 2  | 2  |
| 11 | 1.00 | 8  | 9  |
|    | 2.00 | 22 | 30 |
|    | 3.00 | 26 | 31 |
| 12 | 1.50 | 12 | 20 |
|    | 2.50 | 7  | 11 |
|    | 3.50 | 13 | 25 |
| 13 | 1.50 | 14 | 26 |
|    | 2.50 | 16 | 24 |
|    | 3.50 | 21 | 24 |
| 14 | 1.50 | 9  | 14 |
|    | 2.50 | 9  | 11 |
|    | 3.50 | 11 | 12 |
| 15 | 1.50 | 12 | 17 |
|    | 2.50 | 8  | 9  |
|    | 3.50 | 11 | 13 |
| 16 | 1.50 | 7  | 13 |
|    | 2.50 | 11 | 12 |
|    | 3.50 | 9  | 9  |
| 17 | 1.50 | 3  | 7  |
|    | 2.50 | 5  | 7  |

|    |      |    |    |
|----|------|----|----|
|    | 3.50 | 2  | 3  |
| 18 | 1.50 | 5  | 12 |
|    | 2.50 | 18 | 30 |
|    | 3.50 | 26 | 48 |
| 19 | 1.50 | 13 | 25 |
|    | 2.50 | 27 | 42 |
|    | 3.50 | 21 | 43 |
| 20 | 1.00 | 5  | 9  |
|    | 2.00 | 5  | 8  |
|    | 3.00 | 4  | 6  |
| 21 | 1.00 | 6  | 10 |
|    | 2.00 | 7  | 9  |
|    | 3.00 | 6  | 11 |
| 22 | 1.50 | 11 | 19 |
|    | 2.50 | 15 | 20 |
|    | 3.50 | 12 | 15 |
| 23 | 1.50 | 11 | 22 |
|    | 2.50 | 18 | 29 |
|    | 3.50 | 17 | 30 |
| 24 | 1.00 | 8  | 12 |
|    | 2.00 | 9  | 12 |
|    | 3.00 | 7  | 11 |
| 25 | 1.00 | 10 | 13 |

|    |      |    |    |
|----|------|----|----|
|    | 2.00 | 8  | 11 |
|    | 3.00 | 9  | 13 |
| 26 | 1.50 | 14 | 22 |
|    | 2.50 | 8  | 13 |
|    | 3.50 | 6  | 12 |
| 27 | 1.50 | 17 | 21 |
|    | 2.50 | 17 | 25 |
|    | 3.50 | 20 | 27 |
| 28 | 1.50 | 2  | 2  |
|    | 2.50 | 4  | 6  |
|    | 3.50 | 4  | 6  |
| 29 | 1.00 | 28 | 34 |
|    | 2.00 | 30 | 43 |
|    | 3.00 | 30 | 43 |
| 30 | 1.00 | 8  | 13 |
|    | 2.00 | 11 | 16 |
|    | 3.00 | 13 | 17 |

**Fuente:** Elaboración propia

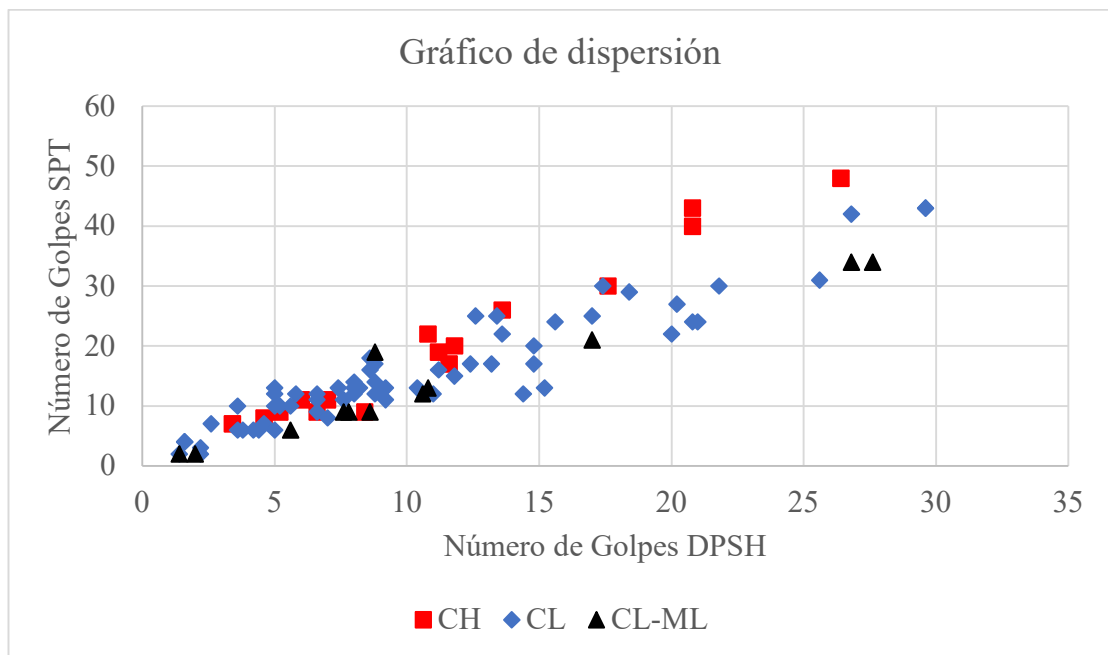
#### **4.3. Análisis previo de datos**

Antes de proceder al desarrollo de los modelos de correlación entre los ensayos SPT y DPSH, se realizó un análisis previo de los datos con el objetivo de evaluar su coherencia, consistencia y comportamiento estadístico.

#### 4.3.1. Gráfico de dispersión

Como primer paso, se construyó un gráfico de dispersión para visualizar la relación entre los golpes obtenidos en los ensayos SPT y DPSH de todos los pares estudiados en este proyecto, se pueden observar los 3 tipos de suelos que se estudiaron arcilla de alta plasticidad (CH), arcilla de baja plasticidad (CL) y arcilla limosa (CL-ML).

**Gráfica 4.1** Gráfica de dispersión análisis previo



#### 4.3.3. Consistencia del coeficiente de determinación y coeficiente de Pearson

Se realizaron de manera específica para el tipo de suelo estudiados en este proyecto, para calcular el grado de correlación lineal que tenemos en los suelos estudiados, como se muestra en la siguiente tabla:

**Figura 4.1** Resumen de datos obtenidos de  $R^2$  y  $r$  (Pearson)

| <b>Coeficiente de correlación para arcilla de alta plasticidad (CH)</b> |        |
|-------------------------------------------------------------------------|--------|
| Coeficiente de determinación $R^2$                                      | 0.9641 |
| Coeficiente de Pearson                                                  | 0.9819 |
| <b>Coeficiente de correlación para arcilla de baja plasticidad (CL)</b> |        |
| Coeficiente de determinación $R^2$                                      | 0.8861 |
| Coeficiente de Pearson                                                  | 0.9413 |
| <b>Coeficiente de correlación para arcilla limosa (CL-ML)</b>           |        |
| Coeficiente de determinación $R^2$                                      | 0.9454 |
| Coeficiente de Pearson                                                  | 0.9723 |

**Fuente:** Elaboración propia

Mediante un análisis individual por tipo de suelo, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson considerando todos los puntos recopilados en la campaña de campo, los 90 pares de datos correspondientes a los ensayos DPSH y SPT en su conjunto, realizados específicamente para cada tipo de suelo analizado en esta investigación.

Los valores obtenidos del coeficiente de Pearson de los suelos estudiados fueron mayores a 0.90, tanto con CH, CL y CL-ML respectivamente, lo que indica una correlación positiva muy fuerte entre las dos variables. Esto confirma que, en general, el número de golpes del ensayo DPSH tiene una relación directa y consistente con el número de golpes del ensayo SPT.

Estos análisis iniciales proporcionan una base sólida para el desarrollo de las correlaciones específicas que se abordarán a continuación.

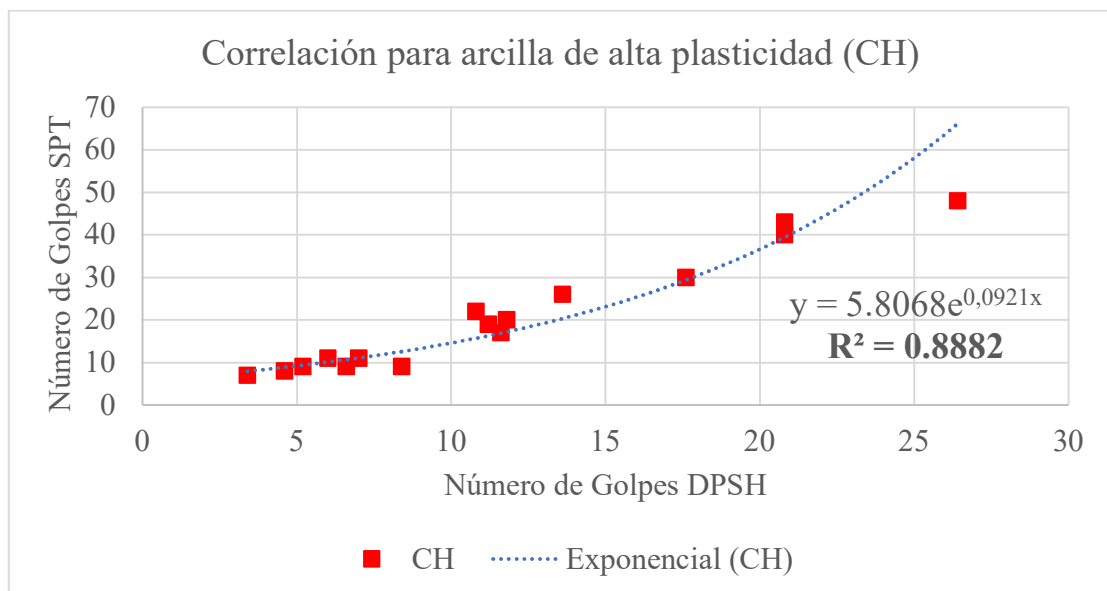
#### 4.4. Correlaciones

Como ya se observó nuestros datos son altamente correlacionables, entonces continuando con el proyecto, se realizó la correlación la en los distintos tipos de arcillas estudiadas CH (arcilla de alta plasticidad), CL (arcilla de baja plasticidad), CL-ML (arcilla limosa).

##### 4.4.1. Correlación para arcilla de alta plasticidad (CH)

Para esta correlación utilizamos las arcillas de alta plasticidad, que en total tenemos 16 datos con el ensayo SPT como con el ensayo DPSH respectivamente.

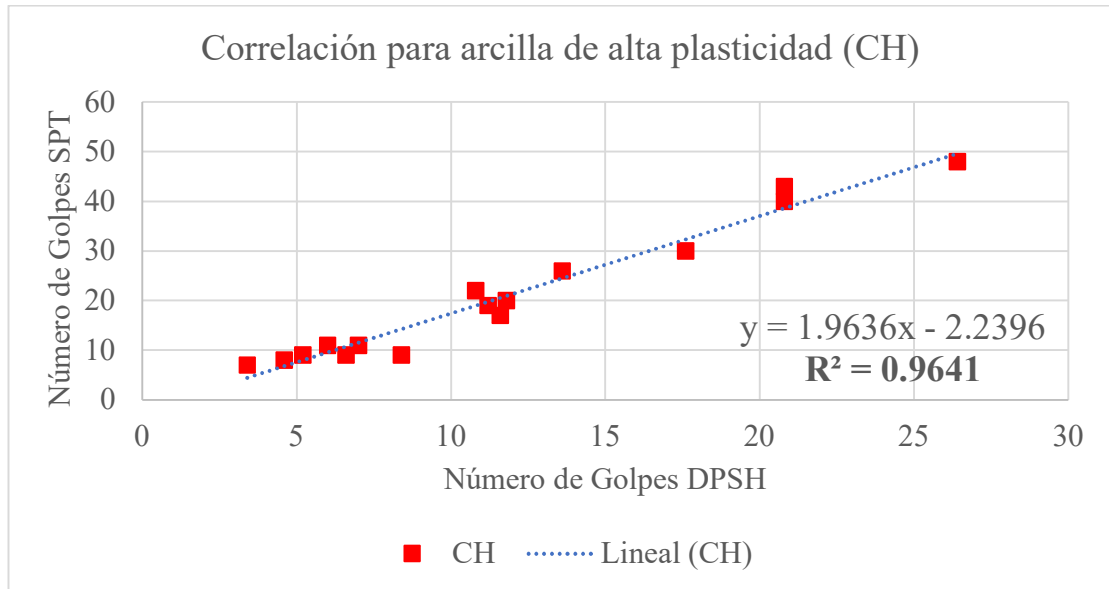
**Gráfica 4.2** Correlación exponencial para CH



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo sugiere que a medida que los golpes DPSH aumentan, el valor del SPT crece de manera acelerada. Sin embargo, el  $R^2$  de 0.8882 indica que el ajuste no es tan preciso como otros modelos: algunos puntos en el gráfico están por debajo o por encima de la curva, sobre todo en valores intermedios y altos.

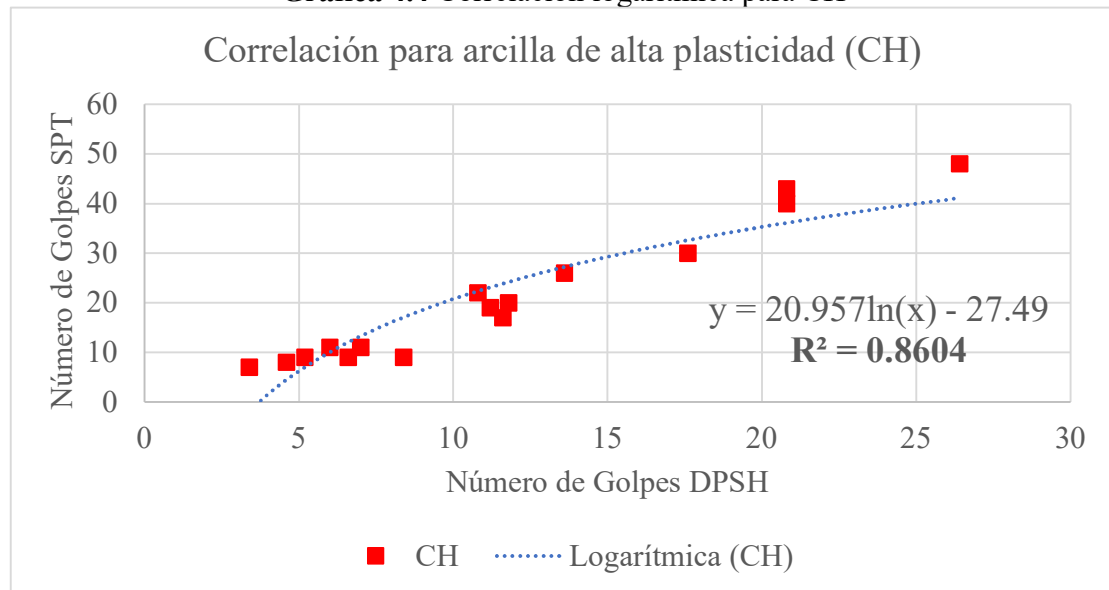
**Gráfica 4.3** Correlación lineal para CH



**Fuente:** Elaboración propia

Aunque su  $R^2$  es alto, este modelo simplifica el comportamiento del suelo al asumir que por cada golpe DPSH adicional. En los datos, esto puede ser cierto en el rango medio, pero el modelo no se ajusta bien en los extremos en rangos bajos puede sobre estimar y en rangos altos podría subestimar.

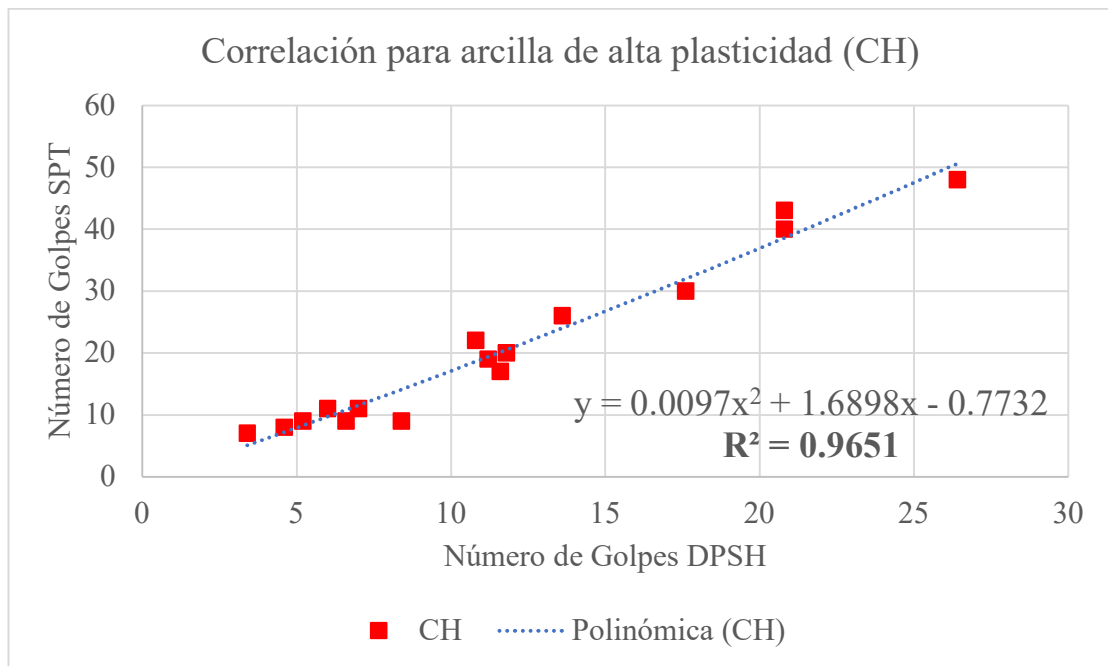
**Gráfica 4.4** Correlación logarítmica para CH



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo tiene el menor  $R^2$  de todos. A nivel visual, también se nota que muchos puntos quedan por fuera de la curva. El comportamiento logarítmico implica que el aumento del SPT se desacelera con el incremento del DPSH, este modelo no logra representar bien los datos intermedios ni los altos, por lo que podría inducir a errores en la estimación del SPT si se usa en campo.

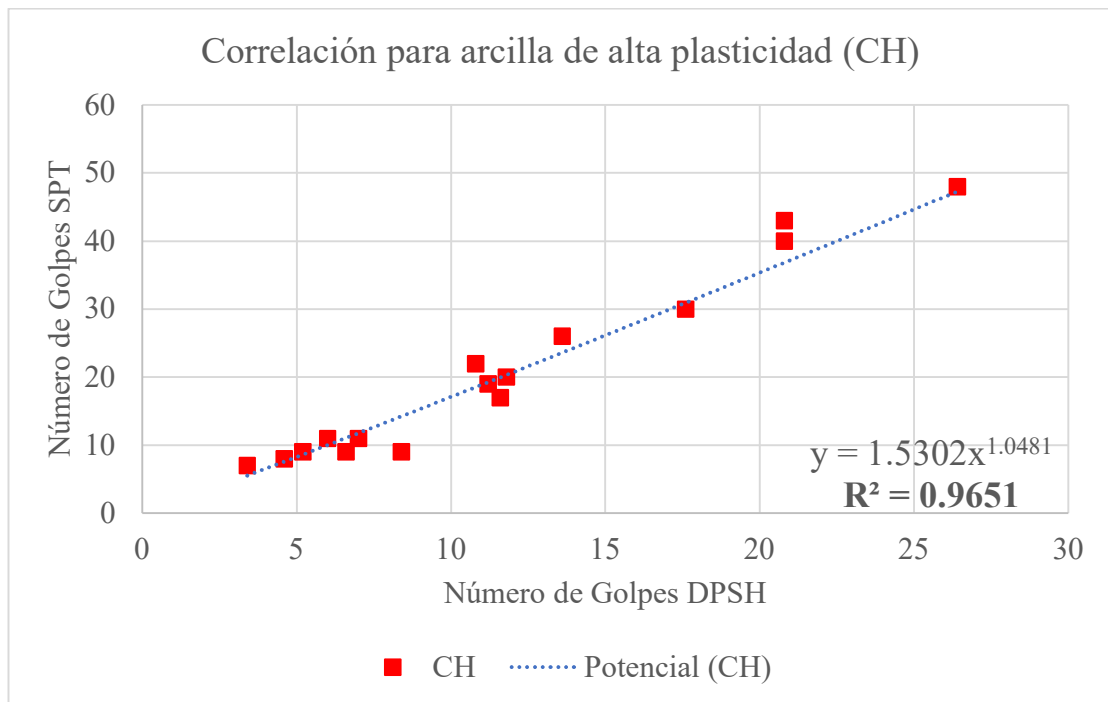
**Gráfica 4.5** Correlación polinómica de grado 2 para CH



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo tiene el mejor ajuste visual y estadístico para tus datos. La curva sigue fielmente el patrón de los puntos, especialmente en los rangos donde DPSH oscila entre 5 y 20 golpes. En los datos, se observa que este modelo pasa muy cerca del mayor número de puntos, especialmente en el centro del conjunto. Esto indica que logra predecir bien tanto zonas blandas como duras del perfil CH.

**Gráfica 4.6** Correlación potencial para CH



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo ofrece un excelente ajuste estadístico y su forma se adapta muy bien a la mayoría de tus datos. La relación potencia con exponente 1.0481 implica una casi linealidad corregida, donde los valores del SPT aumentan suavemente más que los del DPSH a medida que crecen.

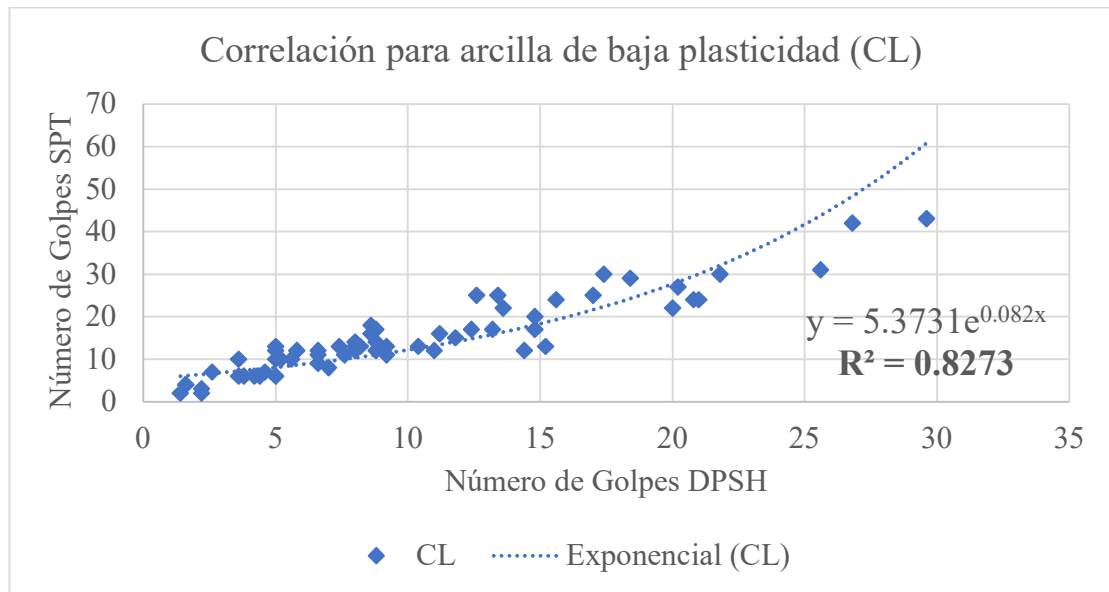
#### 4.4.2. Selección del modelo de regresión para (CH)

La curva polinómica ajustada modela la tendencia promedio de cómo varía el número de golpes del SPT respecto al DPSH con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0.9651$ , en este estudio, los suelos CH mostraron un patrón de comportamiento bastante predecible porque a medida que se incrementan los golpes del DPSH, también lo hace el número de golpes del SPT. Este crecimiento progresivo está relacionado con su cohesión natural y el aumento de resistencia con la profundidad o compactación, aún dentro de su comportamiento plástico. El modelo exponencial presentaba un buen ajuste también, pero para fines de uniformizar las ecuaciones se escogió el modelo polinómico de segundo grado.

#### 4.4.3. Correlación para arcilla de baja plasticidad (CL)

Para esta correlación utilizamos las arcillas de baja plasticidad.

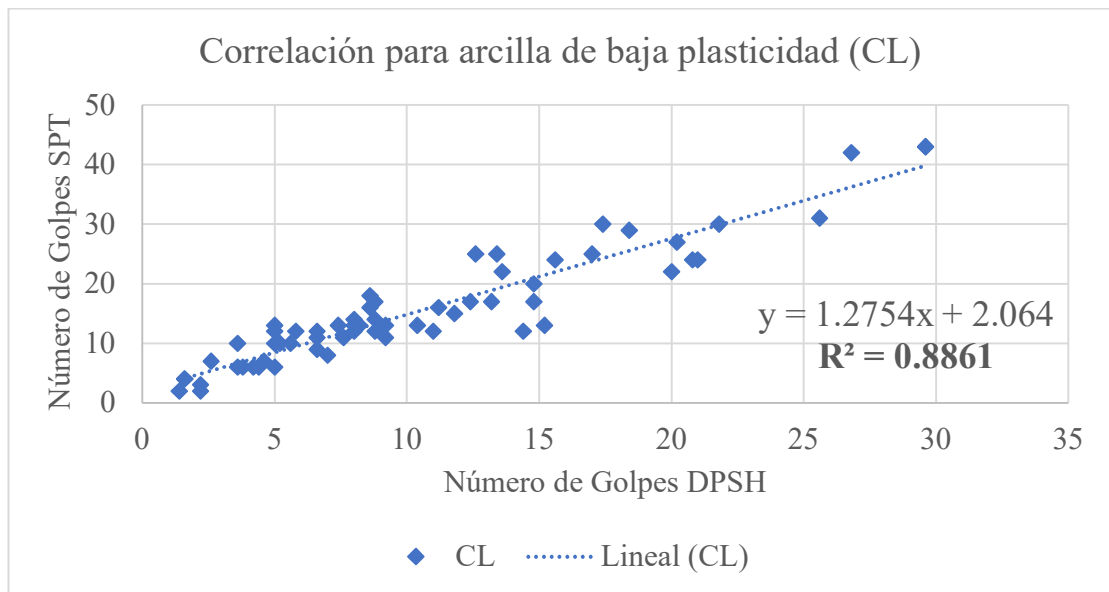
**Gráfica 4.7** Correlación exponencial para CL



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo tiene un comportamiento más sensible en suelos duros. A bajas cifras de golpes DPHS (menos de 10), predice valores moderados de SPT, pero conforme los golpes superan los 20, la curva asciende rápidamente, lo que se asocia con materiales más resistentes. Visualmente, sigue la tendencia general, pero tiende a sobrestimar los valores altos de resistencia, lo que podría generar sobrevaloración de la rigidez del estrato profundo.

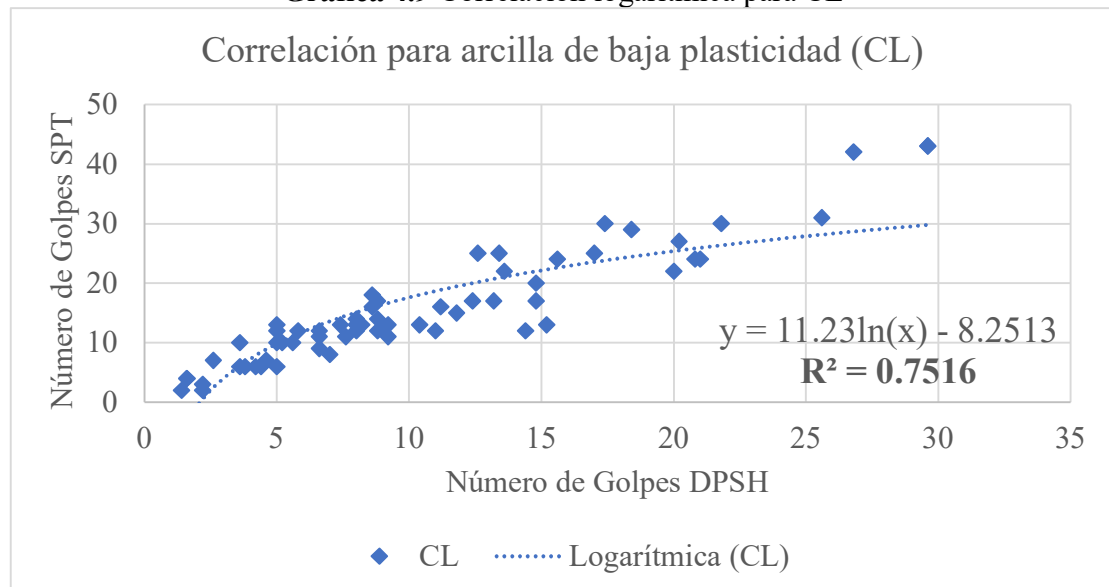
**Gráfica 4.8** Correlación lineal para CL



**Fuente:** Elaboración propia

Su interpretación es directa, a cada aumento de golpes DPSH produce un incremento proporcional del SPT sin embargo a comparación de los modelos que se presentan más adelante su valor  $R^2$  es menor a comparación de los otros modelos estudiados.

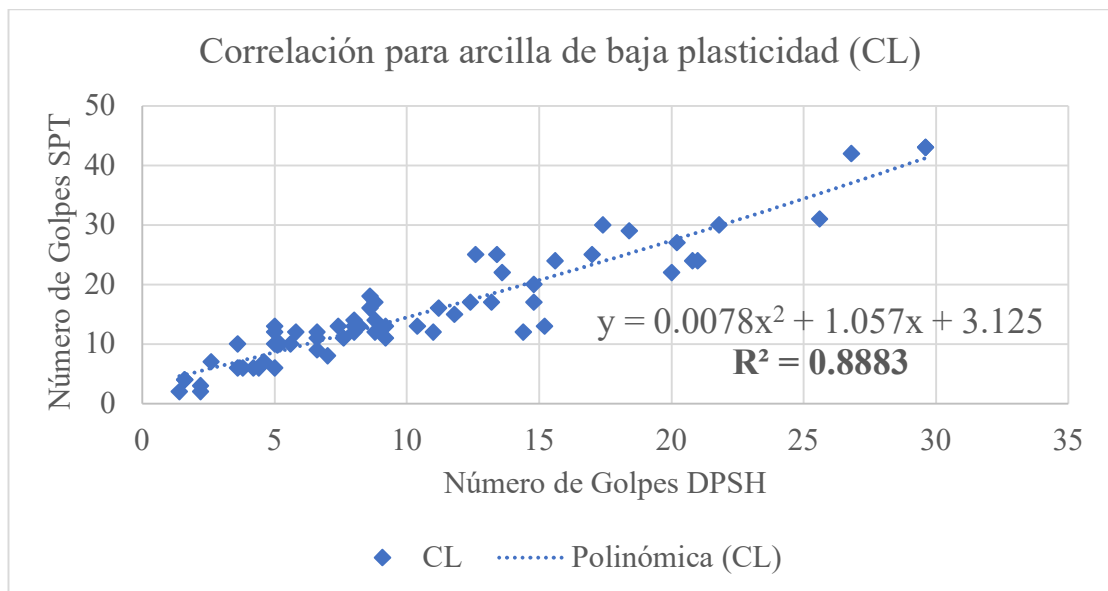
**Gráfica 4.9** Correlación logarítmica para CL



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo no refleja adecuadamente la progresión de la resistencia del suelo en función del golpeo DPSH. Aunque sigue la tendencia general, subestima los valores altos, lo cual puede traducirse en errores importantes al momento de usar la ecuación.

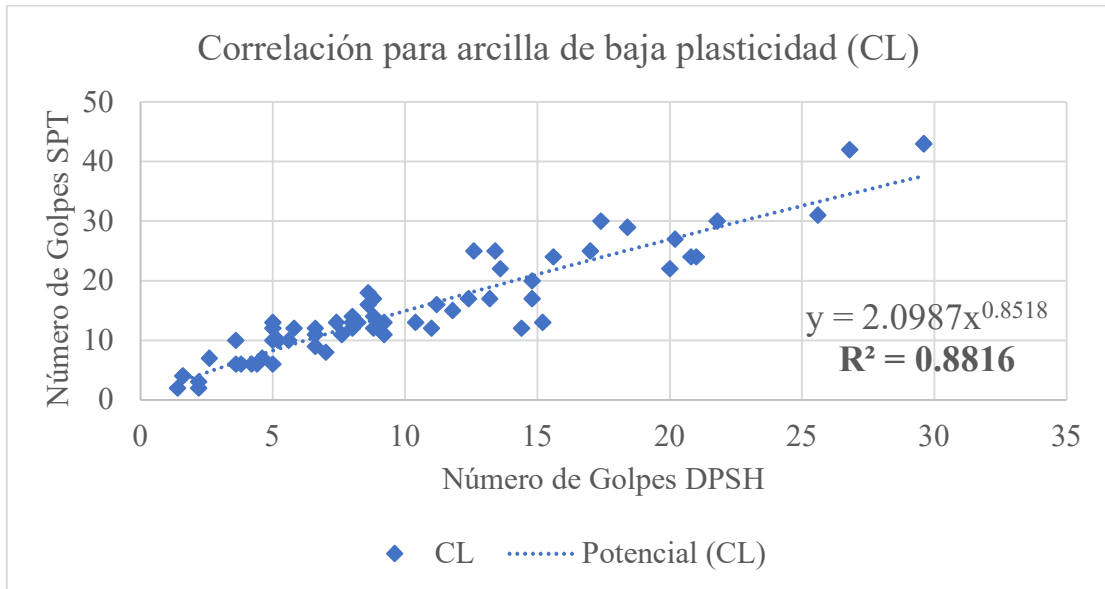
**Gráfica 4.10** Correlación polinómica de grado 2 para CL



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo muestra el mejor ajuste visual al comportamiento del suelo arcilloso CL. La curva se adapta especialmente bien al rango de golpes DPSH entre 5 y 25, que es donde se ubica la mayoría de los datos. Captura con precisión zonas blandas (5–10 golpes), intermedias (10–20) y algo más rígidas (>20) sin sobredimensionar los valores que se necesitan predecir.

**Gráfica 4.11** Correlación potencial para CL



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo logra captar la respuesta no lineal del suelo, especialmente en los rangos bajos e intermedios de resistencia. Predice con precisión los valores de SPT cuando DPSH está entre 5 y 20 golpes, y mantiene una pendiente suave hacia valores más altos.

#### 4.4.4. Selección del modelo de regresión para (CL)

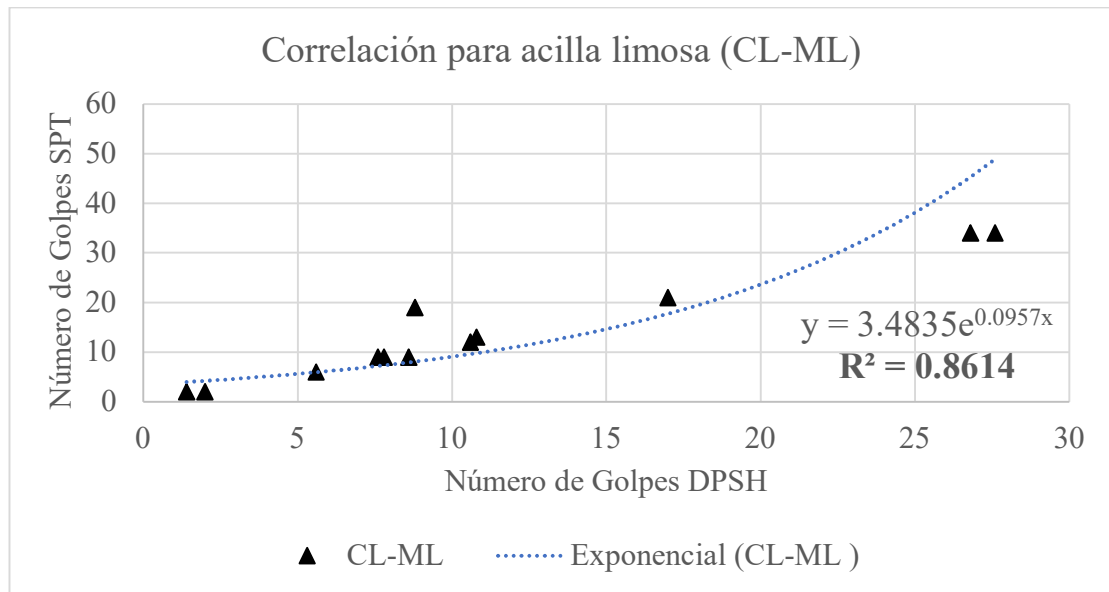
Las arcillas de baja plasticidad (CL) fueron el tipo de suelo más presente en el área de estudio, representando 62 de los 90 pares de datos analizados. Durante los ensayos, se observó una tendencia muy clara porque a menor contenido de humedad natural, mayor fue el número de golpes registrados en el SPT. Esta relación refleja directamente cómo el suelo, al estar más seco, presenta mayor cohesión y rigidez, resistiendo mejor la penetración. En cambio, al aumentar la humedad, la resistencia disminuye de forma progresiva. Esta variabilidad fue manejable y permitió obtener un modelo confiable.

El comportamiento observado fue estable, sin dispersión extrema, y el modelo polinómico de segundo grado mostró un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.8883$ , lo que indica una correlación fuerte y confiable entre los golpes del DPSH y los del SPT.

#### 4.4.5. Correlación para arcilla limosa (CL-ML)

Para esta correlación utilizamos las arcillas limosas.

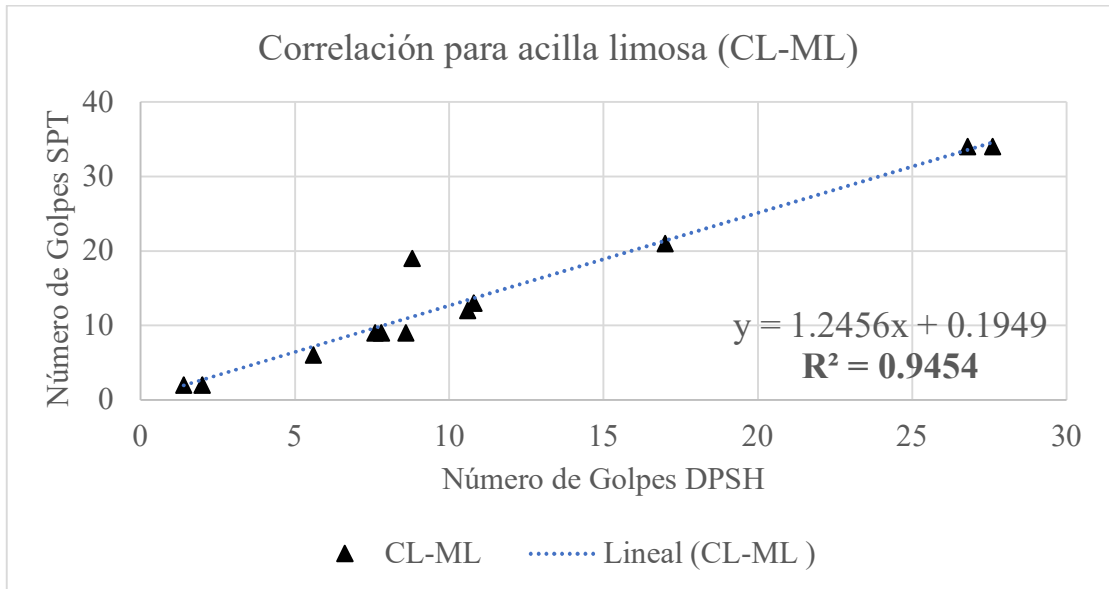
**Gráfica 4.12** Correlación exponencial para CL-ML



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo muestra una tendencia creciente pronunciada a medida que aumentan los golpes del DPSH, refleja una respuesta acelerada del suelo, asumiendo que la resistencia a la penetración crece rápidamente con el número de golpes. Los valores altos arriba de los 20 golpes la curva tiende a sobre estimar la resistencia a la penetración.

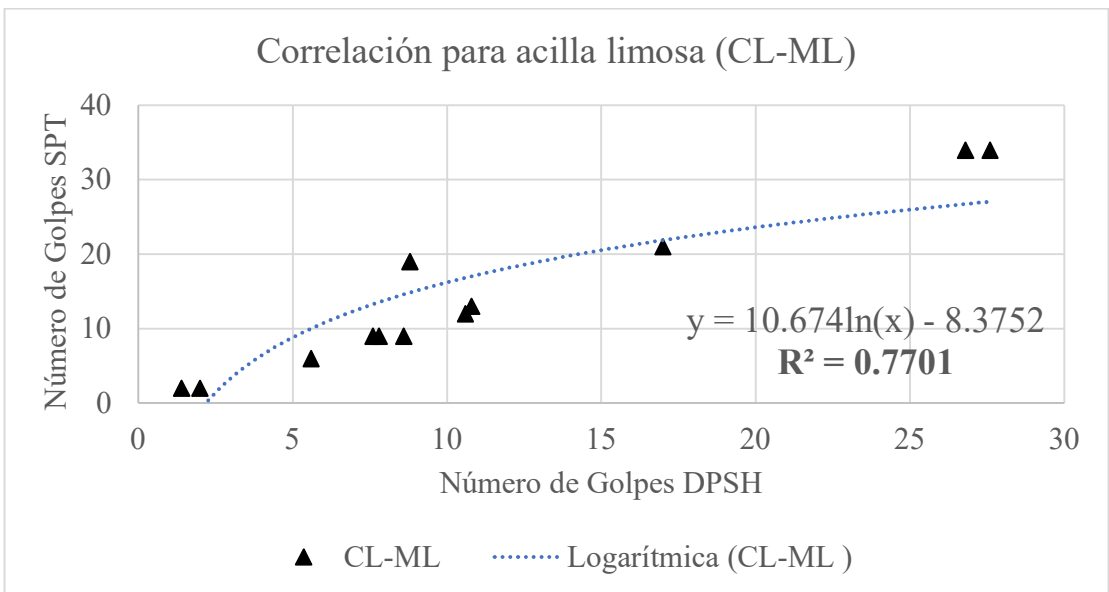
**Gráfica 4.13** Correlación lineal para CL-ML



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo ofrece una relación directa y constante entre los golpes del DPSH y del SPT, su alto  $R^2$  y el ajuste visual limpio lo hacen una excelente opción.

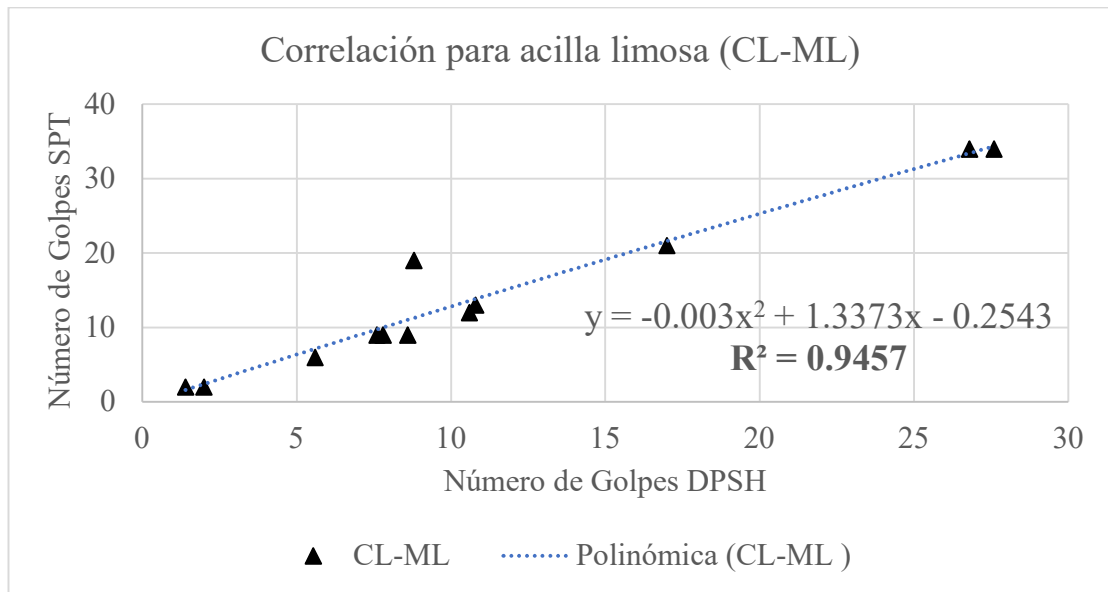
**Gráfica 4.14** Correlación logarítmica para CL-ML



**Fuente:** Elaboración propia

La curva de este modelo muestra una pendiente fuerte en los primeros valores, pero se estabiliza rápidamente, lo que representa que aumentos en los golpes DPSH dejan de reflejar incrementos importantes en SPT. Modelo débil para este caso. Su bajo  $R^2$  respalda esta limitación.

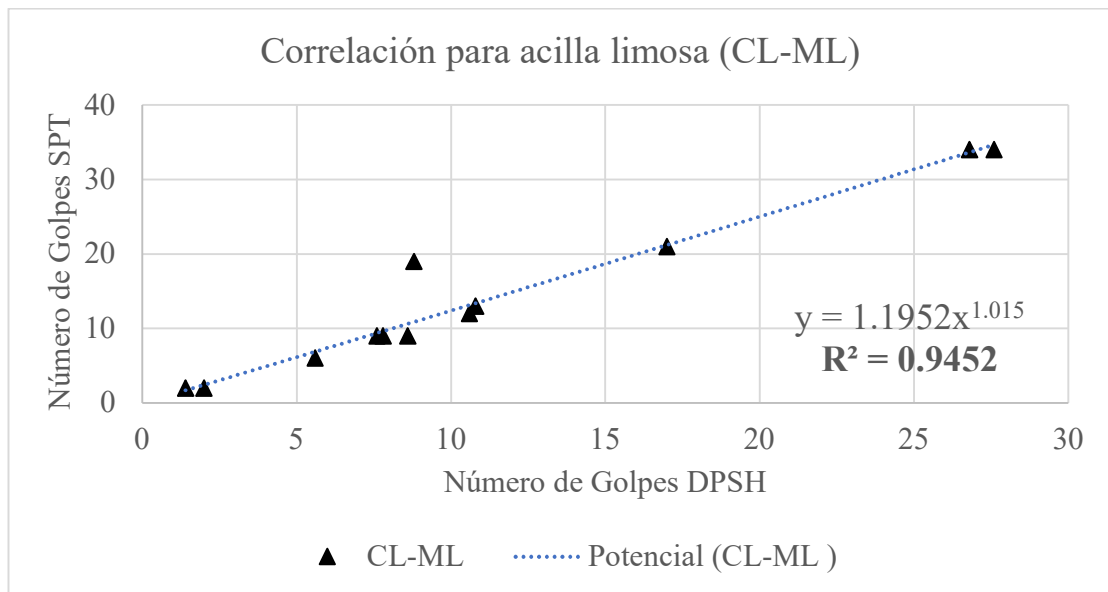
**Gráfica 4.15** Correlación polinómica de grado 2 para CL-ML



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo permite capturar ligeras curvaturas en la relación entre golpes, adaptándose a transiciones más complejas de resistencia dentro del perfil del suelo. Su ligera curvatura refleja con mayor fidelidad el comportamiento real de muchos suelos arcillosos limosos, donde la respuesta no siempre es lineal.

**Gráfica 4.16** Correlación potencial para CL-ML



**Fuente:** Elaboración propia

Este modelo representa una respuesta de crecimiento progresivo, muy parecida a una curva lineal, pero con una ligera aceleración. A medida que aumentan los golpes DPSH, los SPT crecen casi proporcionalmente. Este modelo de igual manera es una buena opción para utilizarla como ecuación.

#### 4.4.6. Selección del modelo de regresión para (CL-ML)

El modelo que mejor ajusta los datos es polinómico, con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9457, lo cual indica que la correlación es muy fuerte y que la ecuación representa adecuadamente el comportamiento de este tipo de suelo en las condiciones estudiadas.

Los suelos clasificados como CL-ML en este estudio representan una mezcla de arcillas de baja plasticidad con limos. Se caracterizan por tener baja cohesión y una respuesta menos estructurada que los suelos puramente arcillosos. En campo, mostraron una resistencia variable, especialmente en zonas donde el contenido de humedad natural era más alto.

#### 4.5. Coeficientes de Determinación de los suelos en estudio

En este análisis, se determinó que, considerando los suelos en general, la ecuación polinómica de grado 2 es la que mejor se ajusta a los datos obtenidos, alcanzando un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) elevado y con mínima variabilidad entre datos observados y predichos. Asimismo, al analizar los tipos de suelos clasificados como CL, CH y CL-ML, se observó que la ecuación polinómica también es la más adecuada para cada uno de ellos, destacándose la consistencia en el ajuste entre las diferentes clasificaciones. No obstante, las ecuaciones lineales también muestran un comportamiento aceptable con ligeras diferencias, principalmente en los valores decimales.

**Tabla 4.3** Resultados de los coeficientes de determinación

| <b>Ecuación</b>   | <b>Coeficiente De Determinación <math>R^2</math></b> |               |               |
|-------------------|------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                   | CH                                                   | CL            | CL-ML         |
| Exponencial       | 0.8882                                               | 0.8273        | 0.8614        |
| Lineal            | 0.9641                                               | 0.8861        | 0.9454        |
| Logarítmica       | 0.8604                                               | 0.7516        | 0.7701        |
| <b>Polinómica</b> | <b>0.9651</b>                                        | <b>0.8883</b> | <b>0.9457</b> |
| Potencial         | 0.9651                                               | 0.8816        | 0.9452        |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.6. Ecuación de la correlación

El análisis demuestra que la ecuación polinómica de grado 2 es la herramienta más efectiva para describir la relación entre los golpes obtenidos en los ensayos SPT y DPSH en suelos de la región de la ciudad de Tarija, tanto en el análisis general como en las clasificaciones específicas (CL, CH, CL-ML).

#### 4.6.1. Ecuaciones

Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

| Tipo de suelo | Ecuación                                         |
|---------------|--------------------------------------------------|
| CH            | $SPT = 0.0097 * DPSH^2 + 1.6898 * DPSH - 0.7732$ |
| CL            | $SPT = 0.0078 * DPSH^2 + 1.057 * DPSH + 3.125$   |
| CL-ML         | $SPT = -0.003 * DPSH^2 + 1.3373 * DPSH - 0.2543$ |

**Fuente:** Elaboración propia

**Donde:**

**DPSH** = son los valores DPSH obtenidos en campo

Para evaluar la fiabilidad de la correlación propuesta en el presente estudio a partir de los valores DPSH, se planteó la hipótesis de que la varianza en el SPT (medido) es igual al SPT (predicho), esto quiere demostrar que, no hay varianza significativa entre los datos obtenidos en campo con los calculados con la ecuación, con ellos podemos decir que nuestra ecuación es fiable.

En la siguiente tabla se aplica las ecuaciones encontradas para evaluarlas reemplazando los valores DPSH en su respectivo tipo de arcilla.

Donde:

**SPT medido** = Son los datos obtenidos en campo

**SPT predicho** = Son los datos DPSH convertidos a SPT usando la ecuación

**Tabla 4.4** SPT medido y SPT predicho para CH

| Arcillas de alta plasticidad (CH) |              |                |
|-----------------------------------|--------------|----------------|
| Nº                                | SPT (medido) | SPT (predicho) |
| 1                                 | 17           | 22             |
| 2                                 | 40           | 40             |
| 3                                 | 7            | 7              |
| 4                                 | 9            | 12             |
| 5                                 | 9            | 16             |
| 6                                 | 20           | 22             |

|           |    |    |
|-----------|----|----|
| <b>7</b>  | 11 | 13 |
| <b>8</b>  | 26 | 26 |
| <b>9</b>  | 30 | 34 |
| <b>10</b> | 48 | 52 |
| <b>11</b> | 43 | 40 |
| <b>12</b> | 9  | 10 |
| <b>13</b> | 8  | 9  |
| <b>14</b> | 11 | 11 |
| <b>15</b> | 19 | 21 |
| <b>16</b> | 22 | 20 |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.5** SPT medido y SPT predicho para CL

| <b>Arcillas de baja plasticidad (CL)</b> |                         |                           |
|------------------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <b>Nº</b>                                | <b>SPT<br/>(medido)</b> | <b>SPT<br/>(predicho)</b> |
| <b>1</b>                                 | 12                      | 10                        |
| <b>2</b>                                 | 16                      | 13                        |
| <b>3</b>                                 | 13                      | 9                         |
| <b>4</b>                                 | 10                      | 7                         |
| <b>5</b>                                 | 4                       | 5                         |
| <b>6</b>                                 | 10                      | 9                         |
| <b>7</b>                                 | 10                      | 9                         |
| <b>8</b>                                 | 2                       | 5                         |
| <b>9</b>                                 | 6                       | 7                         |
| <b>10</b>                                | 6                       | 9                         |
| <b>11</b>                                | 8                       | 11                        |
| <b>12</b>                                | 24                      | 28                        |
| <b>13</b>                                | 22                      | 27                        |
| <b>14</b>                                | 14                      | 12                        |
| <b>15</b>                                | 18                      | 13                        |
| <b>16</b>                                | 17                      | 13                        |
| <b>17</b>                                | 17                      | 20                        |
| <b>18</b>                                | 13                      | 21                        |
| <b>19</b>                                | 12                      | 20                        |
| <b>20</b>                                | 4                       | 5                         |
| <b>21</b>                                | 30                      | 30                        |
| <b>22</b>                                | 31                      | 35                        |
| <b>23</b>                                | 25                      | 18                        |

|           |    |    |
|-----------|----|----|
| <b>24</b> | 24 | 22 |
| <b>25</b> | 24 | 29 |
| <b>26</b> | 14 | 13 |
| <b>27</b> | 11 | 14 |
| <b>28</b> | 17 | 17 |
| <b>29</b> | 13 | 11 |
| <b>30</b> | 12 | 16 |
| <b>31</b> | 7  | 6  |
| <b>32</b> | 7  | 8  |
| <b>33</b> | 3  | 5  |
| <b>34</b> | 12 | 9  |
| <b>35</b> | 25 | 19 |
| <b>36</b> | 42 | 37 |
| <b>37</b> | 6  | 7  |
| <b>38</b> | 10 | 9  |
| <b>39</b> | 9  | 10 |
| <b>40</b> | 20 | 20 |
| <b>41</b> | 15 | 17 |
| <b>42</b> | 29 | 25 |
| <b>43</b> | 30 | 24 |
| <b>44</b> | 12 | 12 |
| <b>45</b> | 12 | 13 |
| <b>46</b> | 11 | 10 |
| <b>47</b> | 13 | 15 |
| <b>48</b> | 11 | 12 |
| <b>49</b> | 13 | 14 |
| <b>50</b> | 22 | 19 |
| <b>51</b> | 13 | 12 |
| <b>52</b> | 12 | 10 |
| <b>53</b> | 25 | 23 |
| <b>54</b> | 27 | 28 |
| <b>55</b> | 2  | 5  |
| <b>56</b> | 6  | 8  |
| <b>57</b> | 6  | 8  |
| <b>58</b> | 43 | 41 |
| <b>59</b> | 43 | 41 |
| <b>60</b> | 13 | 12 |
| <b>61</b> | 16 | 16 |
| <b>62</b> | 17 | 18 |

**Tabla 4.6** SPT medido y SPT predicho para CL-ML

| <b>Arcillas limosas (CL-ML)</b> |                         |                           |
|---------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <b>Nº</b>                       | <b>SPT<br/>(medido)</b> | <b>SPT<br/>(predicho)</b> |
| <b>1</b>                        | 19                      | 11                        |
| <b>2</b>                        | 6                       | 7                         |
| <b>3</b>                        | 34                      | 33                        |
| <b>4</b>                        | 2                       | 2                         |
| <b>5</b>                        | 2                       | 2                         |
| <b>6</b>                        | 9                       | 10                        |
| <b>7</b>                        | 12                      | 14                        |
| <b>8</b>                        | 9                       | 10                        |
| <b>9</b>                        | 13                      | 14                        |
| <b>10</b>                       | 9                       | 11                        |
| <b>11</b>                       | 21                      | 22                        |
| <b>12</b>                       | 34                      | 34                        |

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.7. Análisis fiabilidad de los resultados obtenidos a través de la prueba F**

La fiabilidad de los resultados obtenidos en esta investigación se evaluó mediante el complemento "Análisis de Datos" de Microsoft Excel. Este análisis se centró en comparar los golpes medidos en campo mediante el ensayo SPT con los valores predichos utilizando la ecuación de correlación desarrollada.

como  $F < \text{Valor crítico para } F$  está en la región de aceptación de la hipótesis de que la varianza en el SPT (medido) es igual al SPT (predicho).

Entonces con un nivel de significancia de 0.05, no existe diferencia significativa entre las varianzas, por lo tanto, se justifica haber considerado varianzas iguales en la hipótesis. Con lo que podemos decir que la ecuación encontrada para correlación entre el número de golpes entre SPT y DPSH es fiable.

En las siguientes tablas tenemos los resultados de la prueba F para CH, CL y CL-ML, tenemos las siguientes tablas de resultados:

**Tabla 4.7** Resultado del análisis de prueba F para CH

|                                        | <i>SPT (medido)</i> | <i>SPT (predicho)</i> |
|----------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Media                                  | 20.56               | 22.11                 |
| Varianza                               | 179.73              | 173.56                |
| Observaciones                          | 16.00               | 16.00                 |
| Grados de libertad                     | 15.00               | 15.00                 |
| <b>F</b>                               | <b>1.04</b>         |                       |
| P(F<=f) una cola                       | 0.47                |                       |
| <b>Valor crítico para F (una cola)</b> | <b>2.40</b>         |                       |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.8** Resultado del análisis de prueba F para CL

|                                        | <i>SPT (medido)</i> | <i>SPT (predicho)</i> |
|----------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Media                                  | 15.66               | 15.65                 |
| Varianza                               | 91.67               | 80.79                 |
| Observaciones                          | 62.00               | 62.00                 |
| Grados de libertad                     | 61.00               | 61.00                 |
| <b>F</b>                               | <b>1.13</b>         |                       |
| P(F<=f) una cola                       | 0.31                |                       |
| <b>Valor crítico para F (una cola)</b> | <b>1.53</b>         |                       |

**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 4.9** Resultado del análisis de prueba F para CL-ML

|                                        | <i>SPT (medido)</i> | <i>SPT (predicho)</i> |
|----------------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Media                                  | 14.17               | 14.17                 |
| Varianza                               | 118.70              | 112.33                |
| Observaciones                          | 12.00               | 12.00                 |
| Grados de libertad                     | 11.00               | 11.00                 |
| <b>F</b>                               | <b>1.06</b>         |                       |
| P(F<=f) una cola                       | 0.46                |                       |
| <b>Valor crítico para F (una cola)</b> | <b>2.82</b>         |                       |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.7.1. Resultado de la prueba F

Para garantizar la validez estadística de las ecuaciones de correlación desarrolladas entre los valores de DPSH y SPT, se aplicó la prueba F a cada uno de los modelos generados según el tipo de suelo: CH (arcilla de alta plasticidad), CL (arcilla de baja plasticidad) y CL-ML (arcilla limosa).

En todos los casos, los resultados obtenidos confirmaron que el valor de F calculado fue mayor que el F crítico o, equivalente a ello, que el p-valor resultó menor al nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ . Esto indica que las regresiones desarrolladas son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Esta validación estadística refuerza la calidad de las ecuaciones propuestas, demostrando que la relación observada entre los golpes del ensayo DPSH y del SPT no es producto del azar, y que el modelo de correlación representa de forma confiable la tendencia real del comportamiento de los suelos analizados en la ciudad de Tarija.

Como se observa en los resultados todas las ecuaciones específicas son fiables así que podemos dar por válida nuestras ecuaciones.

#### 4.8. Ecuaciones finales de la correlación SPT-DPSH

Como resultado del análisis estadístico, se desarrollaron tres ecuaciones de correlación específicas entre los valores de golpes del ensayo DPSH y del SPT, diferenciadas según el tipo de suelo: arcilla de alta plasticidad (CH), arcilla de baja plasticidad (CL) y arcilla limosa (CL-ML).

Estas ecuaciones se ajustaron mediante modelos de regresión polinómica, que ofrecieron los mejores coeficientes de determinación ( $R^2$ ), con valores comprendidos entre 0.88 y 0.96, lo que indica un alto nivel de ajuste y confiabilidad en la estimación de SPT a partir de DPSH.

Esta diferenciación por tipo de suelo permitió mejorar significativamente la precisión de los modelos, frente a una correlación general única, capturando el comportamiento mecánico particular de cada grupo. Las ecuaciones obtenidas permiten estimar con buena precisión los golpes del SPT en función de los datos obtenidos con el DPSH, siempre dentro del rango de observación registrado en campo.

**Tabla 4.10 Ecuaciones finales**

| <b>Tipos de Suelo</b> | <b>Ecuación</b>                                  | <b>R<sup>2</sup></b> |
|-----------------------|--------------------------------------------------|----------------------|
| <b>CH</b>             | $SPT = 0.0097 * DPSH^2 + 1.6898 * DPSH - 0.7732$ | 0.96                 |
| <b>CL</b>             | $SPT = 0.0078 * DPSH^2 + 1.057 * DPSH + 3.125$   | 0.89                 |
| <b>CL-ML</b>          | $SPT = -0.003 * DPSH^2 + 1.3373 * DPSH - 0.2543$ | 0.95                 |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.9. Aplicación practica

Una vez validadas las ecuaciones de correlación, se procedió a su aplicación práctica mediante el cálculo de la capacidad admisible neta del terreno, utilizando los valores de SPT estimados. Para ello, se aplicaron fórmulas empíricas comúnmente utilizadas en la ingeniería geotécnica, donde el número de golpes del SPT es un parámetro de entrada clave.

Se generaron gráficas comparativas entre la capacidad admisible obtenida con valores reales de SPT y aquella calculada con los SPT estimados por correlación. Los resultados mostraron una alta coherencia entre ambas curvas, especialmente en los suelos CH y CL-ML, validando así la utilidad técnica de las ecuaciones desarrolladas.

Este ejercicio práctico demuestra que las ecuaciones obtenidas no solo son válidas desde el punto de vista estadístico, sino que pueden ser aplicadas eficazmente en el diseño geotécnico, permitiendo optimizar recursos y ampliar la base de datos técnica en zonas donde no se realicen ensayos SPT completos.

**Tabla 4.11 Cargas admisibles para CH, CL Y CL-ML**

| Arcilla de alta plasticidad (CH) |                   |      |             |                       |    |                          |                                           |                              |                     |                       |    |                          |
|----------------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|----|--------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|----|--------------------------|
| Nº                               | N SPT<br>(golpes) | N 60 | Su<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm<br>neta<br>(kg/cm2) | N SPT<br>predicho con<br>DPSH<br>(golpes) | N 60<br>predicho<br>con DPSH | Su<br>DPSH<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm<br>neta<br>(kg/cm2) |
| 1                                | 17                | 18.7 | 127.53      | 7.27                  | 3  | 2.42                     | 20                                        | 22.15                        | 151.04              | 8.61                  | 3  | 2.87                     |
| 2                                | 40                | 44   | 300.08      | 17.10                 |    | 5.70                     | 39                                        | 42.43                        | 289.36              | 16.49                 |    | 5.50                     |
| 3                                | 7                 | 7.7  | 52.51       | 2.99                  |    | 1.00                     | 5                                         | 5.59                         | 38.14               | 2.17                  |    | 0.72                     |
| 4                                | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                     | 11                                        | 11.88                        | 58.58               | 3.34                  |    | 1.11                     |
| 5                                | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                     | 14                                        | 15.52                        | 76.49               | 4.36                  |    | 1.45                     |
| 6                                | 20                | 22   | 150.04      | 8.55                  |    | 2.85                     | 21                                        | 22.57                        | 153.92              | 8.77                  |    | 2.92                     |
| 7                                | 11                | 12.1 | 82.52       | 4.70                  |    | 1.57                     | 12                                        | 12.68                        | 86.50               | 4.93                  |    | 1.64                     |
| 8                                | 26                | 28.6 | 195.05      | 11.12                 |    | 3.71                     | 24                                        | 26.40                        | 180.06              | 10.26                 |    | 3.42                     |
| 9                                | 30                | 33   | 225.06      | 12.83                 |    | 4.28                     | 32                                        | 35.17                        | 239.85              | 13.67                 |    | 4.56                     |
| 10                               | 48                | 52.8 | 360.10      | 20.53                 |    | 6.84                     | 51                                        | 55.66                        | 379.59              | 21.64                 |    | 7.21                     |
| 11                               | 43                | 47.3 | 322.59      | 18.39                 |    | 6.13                     | 39                                        | 42.43                        | 289.36              | 16.49                 |    | 5.50                     |
| 12                               | 9                 | 9.9  | 67.52       | 3.85                  |    | 1.28                     | 8                                         | 9.10                         | 62.09               | 3.54                  |    | 1.18                     |
| 13                               | 8                 | 8.8  | 43.38       | 2.47                  |    | 0.82                     | 7                                         | 7.93                         | 39.07               | 2.23                  |    | 0.74                     |
| 14                               | 11                | 12.1 | 82.52       | 4.70                  |    | 1.57                     | 10                                        | 10.69                        | 72.88               | 4.15                  |    | 1.38                     |
| 15                               | 19                | 20.9 | 142.54      | 8.12                  |    | 2.71                     | 19                                        | 21.31                        | 145.31              | 8.28                  |    | 2.76                     |
| 16                               | 22                | 24.2 | 119.31      | 6.80                  |    | 2.27                     | 19                                        | 20.47                        | 100.91              | 5.75                  |    | 1.92                     |

| Arcilla de baja plasticidad (CL) |                   |      |             |                       |    |                       |                                           |                              |                     |                       |    |                       |
|----------------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|----|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|----|-----------------------|
| N°                               | N SPT<br>(golpes) | N 60 | Su<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) | N SPT<br>predicho con<br>DPSH<br>(golpes) | N 60<br>predicho<br>con DPSH | Su<br>DPSH<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) |
| 1                                | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  | 3  | 1.24                  | 10                                        | 11.49                        | 56.62               | 3.23                  | 3  | 1.08                  |
| 2                                | 16                | 17.6 | 86.77       | 4.95                  |    | 1.65                  | 13                                        | 14.07                        | 69.37               | 3.95                  |    | 1.32                  |
| 3                                | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 9                                         | 9.47                         | 46.66               | 2.66                  |    | 0.89                  |
| 4                                | 10                | 11   | 54.23       | 3.09                  |    | 1.03                  | 7                                         | 7.73                         | 38.13               | 2.17                  |    | 0.72                  |
| 5                                | 4                 | 4.4  | 21.69       | 1.24                  |    | 0.41                  | 5                                         | 5.32                         | 26.23               | 1.49                  |    | 0.50                  |
| 6                                | 10                | 11   | 54.23       | 3.09                  |    | 1.03                  | 9                                         | 9.47                         | 46.66               | 2.66                  |    | 0.89                  |
| 7                                | 10                | 11   | 54.23       | 3.09                  |    | 1.03                  | 9                                         | 9.72                         | 47.90               | 2.73                  |    | 0.91                  |
| 8                                | 2                 | 2.2  | 10.85       | 0.62                  |    | 0.21                  | 5                                         | 5.08                         | 25.05               | 1.43                  |    | 0.48                  |
| 9                                | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                  | 7                                         | 7.73                         | 38.13               | 2.17                  |    | 0.72                  |
| 10                               | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                  | 9                                         | 9.47                         | 46.66               | 2.66                  |    | 0.89                  |
| 11                               | 8                 | 8.8  | 43.38       | 2.47                  |    | 0.82                  | 11                                        | 12.00                        | 59.14               | 3.37                  |    | 1.12                  |
| 12                               | 24                | 26.4 | 130.15      | 7.42                  |    | 2.47                  | 28                                        | 31.33                        | 154.48              | 8.81                  |    | 2.94                  |
| 13                               | 22                | 24.2 | 119.31      | 6.80                  |    | 2.27                  | 27                                        | 30.12                        | 148.51              | 8.47                  |    | 2.82                  |
| 14                               | 14                | 15.4 | 75.92       | 4.33                  |    | 1.44                  | 12                                        | 13.29                        | 65.51               | 3.73                  |    | 1.24                  |
| 15                               | 18                | 19.8 | 97.61       | 5.56                  |    | 1.85                  | 13                                        | 14.07                        | 69.37               | 3.95                  |    | 1.32                  |
| 16                               | 17                | 18.7 | 92.19       | 5.25                  |    | 1.75                  | 13                                        | 14.33                        | 70.67               | 4.03                  |    | 1.34                  |
| 17                               | 17                | 18.7 | 92.19       | 5.25                  |    | 1.75                  | 20                                        | 22.52                        | 111.05              | 6.33                  |    | 2.11                  |
| 18                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 21                                        | 23.09                        | 113.85              | 6.49                  |    | 2.16                  |
| 19                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 20                                        | 21.96                        | 108.26              | 6.17                  |    | 2.06                  |
| 20                               | 4                 | 4.4  | 21.69       | 1.24                  |    | 0.41                  | 5                                         | 5.32                         | 26.23               | 1.49                  |    | 0.50                  |
| 21                               | 30                | 33   | 162.69      | 9.27                  |    | 3.09                  | 30                                        | 32.86                        | 162.01              | 9.23                  |    | 3.08                  |

| Arcilla de baja plasticidad (CL) |                   |      |             |                       |    |                       |                                           |                              |                     |                       |    |                       |
|----------------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|----|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|----|-----------------------|
| Nº                               | N SPT<br>(golpes) | N 60 | Su<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) | N SPT<br>predicho con<br>DPSH<br>(golpes) | N 60<br>predicho<br>con DPSH | Su<br>DPSH<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) |
| 22                               | 31                | 34.1 | 168.11      | 9.58                  |    | 3.19                  | 35                                        | 38.83                        | 191.41              | 10.91                 |    | 3.64                  |
| 23                               | 25                | 27.5 | 135.58      | 7.73                  | 3  | 2.58                  | 18                                        | 19.45                        | 95.89               | 5.47                  | 3  | 1.82                  |
| 24                               | 24                | 26.4 | 130.15      | 7.42                  |    | 2.47                  | 22                                        | 23.66                        | 116.66              | 6.65                  |    | 2.22                  |
| 25                               | 24                | 26.4 | 130.15      | 7.42                  |    | 2.47                  | 29                                        | 31.64                        | 155.98              | 8.89                  |    | 2.96                  |
| 26                               | 14                | 15.4 | 75.92       | 4.33                  |    | 1.44                  | 13                                        | 14.33                        | 70.67               | 4.03                  |    | 1.34                  |
| 27                               | 11                | 12.1 | 59.65       | 3.40                  |    | 1.13                  | 14                                        | 14.86                        | 73.26               | 4.18                  |    | 1.39                  |
| 28                               | 17                | 18.7 | 92.19       | 5.25                  |    | 1.75                  | 17                                        | 19.17                        | 94.53               | 5.39                  |    | 1.80                  |
| 29                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 11                                        | 12.51                        | 61.68               | 3.52                  |    | 1.17                  |
| 30                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 16                                        | 17.27                        | 85.12               | 4.85                  |    | 1.62                  |
| 31                               | 7                 | 7.7  | 37.96       | 2.16                  |    | 0.72                  | 6                                         | 6.52                         | 32.14               | 1.83                  |    | 0.61                  |
| 32                               | 7                 | 7.7  | 37.96       | 2.16                  |    | 0.72                  | 8                                         | 8.97                         | 44.21               | 2.52                  |    | 0.84                  |
| 33                               | 3                 | 3.3  | 16.27       | 0.93                  |    | 0.31                  | 5                                         | 6.04                         | 29.76               | 1.70                  |    | 0.57                  |
| 34                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 9                                         | 9.47                         | 46.66               | 2.66                  |    | 0.89                  |
| 35                               | 25                | 27.5 | 135.58      | 7.73                  |    | 2.58                  | 19                                        | 20.56                        | 101.35              | 5.78                  |    | 1.93                  |
| 36                               | 42                | 46.2 | 227.77      | 12.98                 |    | 4.33                  | 37                                        | 40.76                        | 200.95              | 11.45                 |    | 3.82                  |
| 37                               | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                  | 7                                         | 7.98                         | 39.34               | 2.24                  |    | 0.75                  |
| 38                               | 10                | 11   | 54.23       | 3.09                  |    | 1.03                  | 9                                         | 10.22                        | 50.37               | 2.87                  |    | 0.96                  |
| 39                               | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                  | 10                                        | 11.49                        | 56.62               | 3.23                  |    | 1.08                  |
| 40                               | 20                | 22   | 108.46      | 6.18                  |    | 2.06                  | 20                                        | 22.52                        | 111.05              | 6.33                  |    | 2.11                  |
| 41                               | 15                | 16.5 | 81.35       | 4.64                  |    | 1.55                  | 17                                        | 18.35                        | 90.48               | 5.16                  |    | 1.72                  |
| 42                               | 29                | 31.9 | 157.27      | 8.96                  |    | 2.99                  | 25                                        | 27.74                        | 136.74              | 7.79                  |    | 2.60                  |

| Arcilla de baja plasticidad (CL) |                   |      |             |                       |    |                       |                                           |                              |                     |                       |    |                       |
|----------------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|----|-----------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|----|-----------------------|
| N°                               | N SPT<br>(golpes) | N 60 | Su<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) | N SPT<br>predicho con<br>DPSH<br>(golpes) | N 60<br>predicho<br>con DPSH | Su<br>DPSH<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm neta<br>(kg/cm2) |
| 43                               | 30                | 33   | 162.69      | 9.27                  | 3  | 3.09                  | 24                                        | 26.27                        | 129.49              | 7.38                  | 3  | 2.46                  |
| 44                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 12                                        | 13.29                        | 65.51               | 3.73                  |    | 1.24                  |
| 45                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 13                                        | 14.33                        | 70.67               | 4.03                  |    | 1.34                  |
| 46                               | 11                | 12.1 | 59.65       | 3.40                  |    | 1.13                  | 10                                        | 11.49                        | 56.62               | 3.23                  |    | 1.08                  |
| 47                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 15                                        | 16.46                        | 81.14               | 4.62                  |    | 1.54                  |
| 48                               | 11                | 12.1 | 59.65       | 3.40                  |    | 1.13                  | 12                                        | 12.77                        | 62.95               | 3.59                  |    | 1.20                  |
| 49                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 14                                        | 14.86                        | 73.26               | 4.18                  |    | 1.39                  |
| 50                               | 22                | 24.2 | 119.31      | 6.80                  |    | 2.27                  | 19                                        | 20.84                        | 102.73              | 5.86                  |    | 1.95                  |
| 51                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  | 3  | 1.34                  | 12                                        | 13.29                        | 65.51               | 3.73                  | 3  | 1.24                  |
| 52                               | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                  | 10                                        | 10.47                        | 51.62               | 2.94                  |    | 0.98                  |
| 53                               | 25                | 27.5 | 135.58      | 7.73                  |    | 2.58                  | 23                                        | 25.68                        | 126.62              | 7.22                  |    | 2.41                  |
| 54                               | 27                | 29.7 | 146.42      | 8.35                  |    | 2.78                  | 28                                        | 30.43                        | 150.00              | 8.55                  |    | 2.85                  |
| 55                               | 2                 | 2.2  | 10.85       | 0.62                  |    | 0.21                  | 5                                         | 6.04                         | 29.76               | 1.70                  |    | 0.57                  |
| 56                               | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                  | 8                                         | 8.72                         | 42.99               | 2.45                  |    | 0.82                  |
| 57                               | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                  | 8                                         | 8.47                         | 41.77               | 2.38                  |    | 0.79                  |
| 58                               | 43                | 47.3 | 233.19      | 13.29                 |    | 4.43                  | 41                                        | 45.37                        | 223.68              | 12.75                 |    | 4.25                  |
| 59                               | 43                | 47.3 | 233.19      | 13.29                 |    | 4.43                  | 41                                        | 45.37                        | 223.68              | 12.75                 |    | 4.25                  |
| 60                               | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                  | 12                                        | 13.55                        | 66.79               | 3.81                  |    | 1.27                  |
| 61                               | 16                | 17.6 | 86.77       | 4.95                  |    | 1.65                  | 16                                        | 17.54                        | 86.45               | 4.93                  |    | 1.64                  |
| 62                               | 17                | 18.7 | 92.19       | 5.25                  |    | 1.75                  | 18                                        | 20.28                        | 99.98               | 5.70                  |    | 1.90                  |

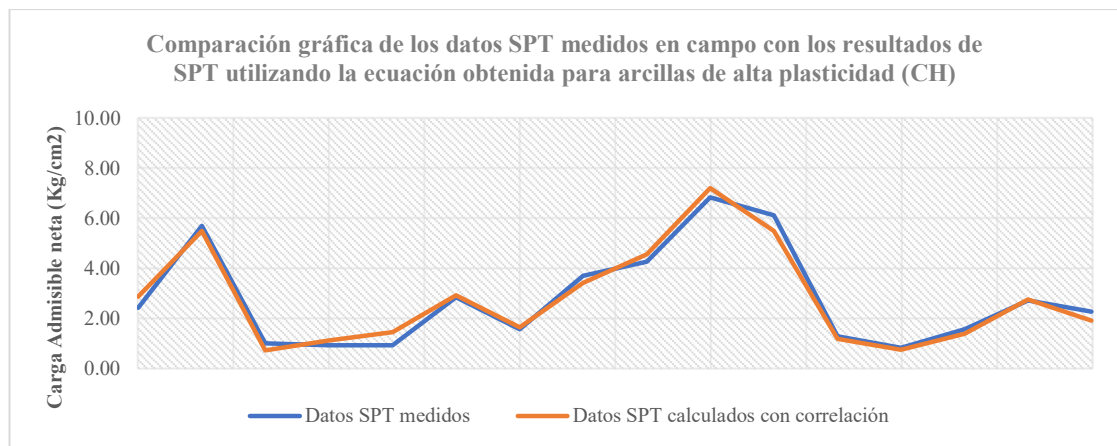
| Arcilla limosa (CL-ML) |                   |      |             |                       |    |                          |                                           |                              |                     |                       |    |                          |
|------------------------|-------------------|------|-------------|-----------------------|----|--------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|----|--------------------------|
| Nº                     | N SPT<br>(golpes) | N 60 | Su<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm<br>neta<br>(kg/cm2) | N SPT<br>predicho con<br>DPSH<br>(golpes) | N 60<br>predicho<br>con DPSH | Su<br>DPSH<br>(kPa) | Qult neta<br>(kg/cm2) | FS | Qadm<br>neta<br>(kg/cm2) |
| 1                      | 19                | 20.9 | 103.04      | 5.87                  | 3  | 1.96                     | 11                                        | 12.41                        | 61.18               | 3.49                  | 3  | 1.16                     |
| 2                      | 6                 | 6.6  | 32.54       | 1.85                  |    | 0.62                     | 7                                         | 7.85                         | 38.72               | 2.21                  |    | 0.74                     |
| 3                      | 34                | 37.4 | 184.38      | 10.51                 |    | 3.50                     | 33                                        | 36.77                        | 181.29              | 10.33                 |    | 3.44                     |
| 4                      | 2                 | 2.2  | 10.85       | 0.62                  |    | 0.21                     | 2                                         | 1.77                         | 8.74                | 0.50                  |    | 0.17                     |
| 5                      | 2                 | 2.2  | 10.85       | 0.62                  |    | 0.21                     | 2                                         | 2.65                         | 13.06               | 0.74                  |    | 0.25                     |
| 6                      | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                     | 10                                        | 10.99                        | 54.20               | 3.09                  |    | 1.03                     |
| 7                      | 12                | 13.2 | 65.08       | 3.71                  |    | 1.24                     | 14                                        | 14.94                        | 73.67               | 4.20                  |    | 1.40                     |
| 8                      | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                     | 10                                        | 10.71                        | 52.80               | 3.01                  |    | 1.00                     |
| 9                      | 13                | 14.3 | 70.50       | 4.02                  |    | 1.34                     | 14                                        | 15.22                        | 75.05               | 4.28                  |    | 1.43                     |
| 10                     | 9                 | 9.9  | 48.81       | 2.78                  |    | 0.93                     | 11                                        | 12.13                        | 59.79               | 3.41                  |    | 1.14                     |
| 11                     | 21                | 23.1 | 113.88      | 6.49                  |    | 2.16                     | 22                                        | 23.77                        | 117.21              | 6.68                  |    | 2.23                     |
| 12                     | 34                | 37.4 | 184.38      | 10.51                 |    | 3.50                     | 34                                        | 37.81                        | 186.39              | 10.62                 |    | 3.54                     |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.10. Comparación gráfica entre resultados de la aplicación practica

En las siguientes gráficas muestra la comparación entre la capacidad admisible neta del terreno calculada con valores de SPT medidos en campo y aquellos estimados a partir de SPT calculados mediante la correlación con DPSH, para los tres tipos de suelos que estudiados en este proyecto.

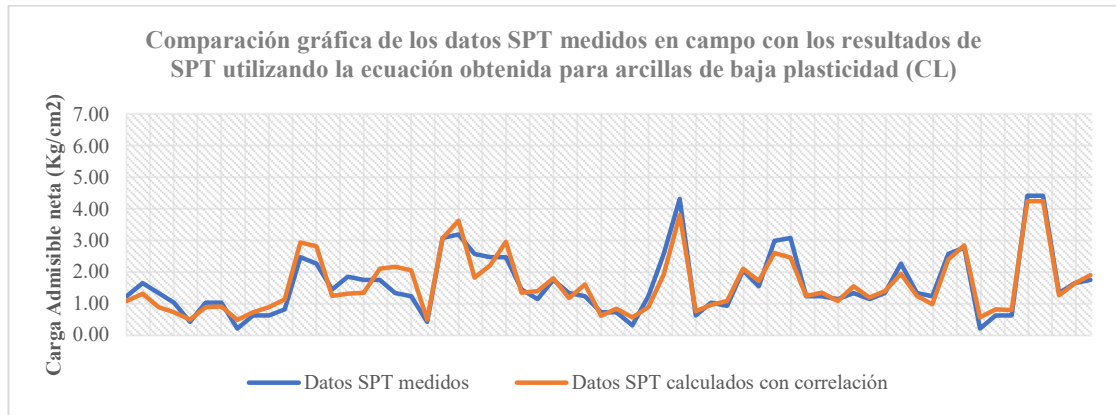
**Gráfica 4.17** Carga admisible SPT medido vs. SPT predicho para CH



**Fuente:** elaboración propia

En la gráfica se observa una buena coincidencia entre los datos obtenidos por correlación y los valores medidos in situ. La línea que representa la carga admisible calculada (basada en la ecuación polinómica) se superpone de forma notable a la curva derivada de los datos del SPT, lo que indica que el uso de la ecuación obtenida para este tipo de suelo permite estimar con buena aproximación la resistencia del terreno.

**Gráfica 4.18** Carga admisible SPT medido vs. SPT predicho para CL



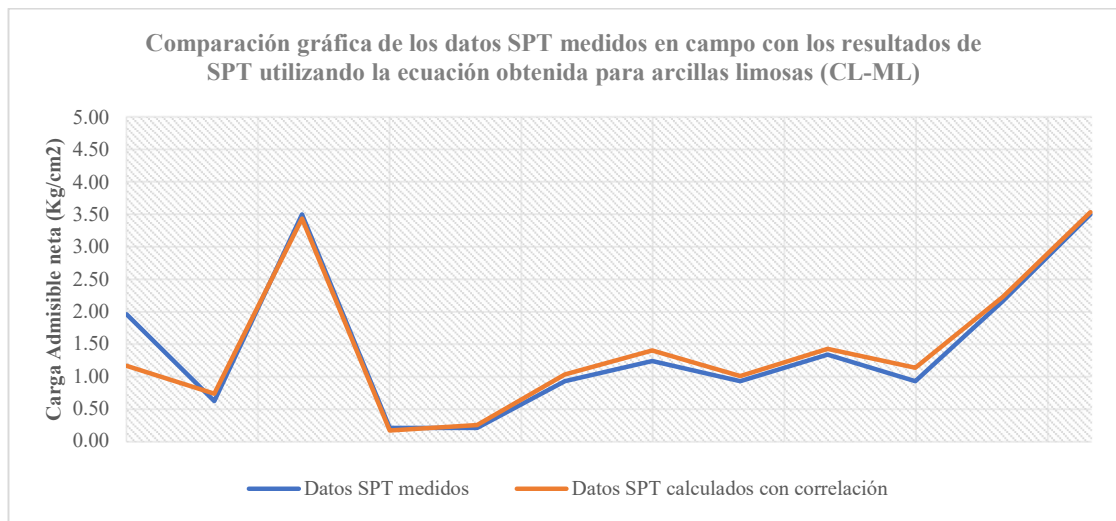
**Fuente:** elaboración propia

En este caso de las arcillas de baja plasticidad, los resultados muestran un comportamiento más complejo. Si bien en términos generales el modelo polinómico presenta un buen ajuste estadístico, evidenciado por un coeficiente de determinación elevado ( $R^2 = 0.8883$ ), la representación gráfica revela mayores oscilaciones entre los valores de carga admisible calculada y los datos obtenidos en campo.

Desde un enfoque geotécnico, esta dispersión puede explicarse por la respuesta variable del suelo CL a la penetración dinámica, la cual está fuertemente influenciada por factores como la humedad. En este tipo de suelos, es común observar que, aunque el golpeo del DPSH registre valores relativamente altos, el SPT no siempre responde de forma directamente proporcional.

En ese sentido, el análisis de los resultados sugiere que la utilidad del modelo se ve favorecida en zonas de media consistencia, donde la relación entre DPSH y SPT es más estable. Por el contrario, en tramos donde el golpeo es mayor, la sensibilidad del modelo se incrementa y es recomendable aplicar criterio.

**Gráfica 4.19** Carga admisible SPT medido vs. SPT predicho para CL-ML



**Fuente:** elaboración propia

El comportamiento del modelo polinómico en suelos CL-ML revela una característica particular: una subestimación significativa de la carga admisible neta en los primeros metros del perfil, la cual se atenúa progresivamente. La influencia de la humedad y la sensibilidad del DPSH al grado de saturación provoca subestimaciones significativas en los primeros tramos.

#### 4.11. Aporte del estudio

Los resultados obtenidos en esta investigación representan un avance significativo en la caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad de Tarija, al establecer ecuaciones de correlación entre los ensayos SPT y DPSH adaptadas a las condiciones locales. Desde un punto de vista teórico, este trabajo contribuye al conocimiento sobre la relación entre ambos ensayos en suelos arcillosos, validando la aplicabilidad del DPSH como una alternativa regulada y confiable para sustituir parcialmente el SPT en estudios geotécnicos.

También proporciona un enfoque estructurado para el desarrollo de correlaciones específicas para diferentes tipos de suelo, con un análisis estadístico riguroso que garantiza la validez de los modelos obtenidos. Este procedimiento puede servir como

referencia para estudios similares en otras regiones con características geotécnicas comparables.

Los modelos desarrollados permiten optimizar los estudios de suelos al reducir costos y tiempos sin comprometer la calidad de los resultados. Gracias a la diferenciación entre ecuaciones específicas para suelos CL, CH y CL-ML, además de una ecuación general, se ofrece una herramienta adaptable a diversas condiciones del subsuelo, aumentando la precisión en la estimación del SPT a partir del DPSH. Esto facilita la toma de decisiones en proyectos de ingeniería civil, permitiendo una caracterización más eficiente de los suelos con un uso estratégico de ambos ensayos.

El estudio justifica su relevancia no solo porque los resultados obtenidos son buenos, sino porque establecen una base de datos propia para Tarija, eliminando la necesidad de depender de correlaciones genéricas desarrolladas en otras regiones con condiciones geotécnicas distintas. De este modo, se brinda a los profesionales y empresas del sector una herramienta válida que permite una mejor planificación y diseño en cualquier tipo de obra civil.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

En la presente investigación se planteó como objetivo principal establecer una correlación entre los resultados del ensayo DPSH y del ensayo SPT en suelos arcillosos de la ciudad de Tarija. Esta necesidad surgió de una realidad concreta: a pesar de la existencia de correlaciones en otras regiones, hasta el momento no se contaba con una ecuación local que represente fielmente el comportamiento de los suelos arcillosos de esta zona. Mediante una investigación aplicada, con trabajo de campo en 30 puntos distribuidos en distintas áreas, se recolectaron 90 pares de datos (DPSH y SPT) que permitieron desarrollar y validar modelos matemáticos específicos para los tipos de suelo identificados: arcillas de alta plasticidad (CH), baja plasticidad (CL) y arcillas limosas (CL-ML).

- Se logró establecer una correlación confiable entre los valores del ensayo SPT y el ensayo DPSH en suelos arcillosos de la ciudad de Tarija, validando que es posible predecir con precisión el número de golpes del SPT a partir del DPSH mediante una ecuación polinómica ya que fue la que mejor se ajusta en todos los casos. Esto demuestra que la relación entre ambos ensayos no es aleatoria, sino que puede ser utilizada como una herramienta de apoyo real para la caracterización geotécnica.
- Los valores de SPT estimados mediante las ecuaciones de correlación fueron utilizados para calcular parámetros de resistencia del suelo, con el valor  $N_{60}$ , obteniendo resultados que mostraron una buena concordancia con los datos reales medidos en campo. Esto confirma que las ecuaciones desarrolladas en este estudio son funcionales para la práctica geotécnica real, permitiendo estimar de forma confiable propiedades fundamentales del suelo. Esta capacidad de transformar golpes DPSH en SPT útiles amplía significativamente la cantidad de datos disponibles en una campaña, contribuyendo así a la optimización técnica y económica de estudios de suelos en cualquier proyecto de obra civil.

- Finalmente, este estudio aporta una propuesta de valor local para la ingeniería geotécnica en Tarija. Las ecuaciones desarrolladas no son extrapolaciones de otras regiones, sino el resultado de un análisis específico de los suelos de esta ciudad. Con ello, se contribuye a la construcción de una base de datos local, útil tanto para fines académicos como para el ejercicio profesional en proyectos de infraestructura que demandan precisión en la caracterización del subsuelo.

## **5.2. Recomendaciones**

- Se recomienda aplicar las ecuaciones de correlación desarrolladas en este estudio en proyectos geotécnicos locales donde se trabaje con suelos arcillosos (CH, CL, CL-ML) en la ciudad de Tarija, priorizando su uso en etapas preliminares o en sectores con perfil estratigráfico claro. La validación estadística y práctica de las ecuaciones respalda su utilización para estimar el valor del SPT a partir del DPSH en puntos donde no se justifique la ejecución de perforaciones completas, optimizando recursos sin comprometer la calidad técnica del análisis.
- Es aconsejable utilizar el ensayo DPSH como método complementario al SPT, no como reemplazo total, respetando los porcentajes de sustitución establecidos por la norma boliviana de estudios geotécnicos y aplicándolo en zonas donde ya se haya identificado un comportamiento homogéneo del subsuelo, este enfoque permite aumentar la densidad de datos en una zona de estudio.