

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Antes del desarrollo de la Mecánica de suelos los problemas de la ingeniería civil eran resueltos en forma intuitiva o realizando tanteos, esto daba origen a serios riesgos en las diferentes obras civiles afectando la seguridad como la economía en la ejecución de las obras. La Mecánica de Suelos hizo posible predecir el comportamiento de los suelos basándose en la obtención de sus propiedades, la plasticidad en este sentido es una propiedad tan evidente y de mucha importancia que aporta de gran manera a entender el comportamiento ingenieril de los diferentes suelos existentes, por lo cual existe una relación específica entre la plasticidad y el comportamiento mecánico de los diferentes suelos, es por eso que la plasticidad se convierte en una propiedad de interés científico. Por otra parte, se desarrolló otra interpretación de la plasticidad fundamentándose en las características esfuerzo-deformación de los materiales este proceso involucra la variación de volumen y disminución de vacíos en un suelo lo cual hace percibir la importancia de la compactación de los suelos en la ejecución de las diferentes obras civiles, ya que con este proceso se logra el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación. En la actualidad en Tarija la técnica de la compactación se la aplica en diferentes obras civiles, esto con el fin de garantizar una buena ejecución y adecuado funcionamiento de las obras. Tomando en cuenta las características de las diferentes formaciones geológicas en la que se encuentra asentada la ciudad de Tarija y las propiedades mecánicas de estos materiales, el proceso de compactación para la ejecución de cualquier obra civil es de mucha importancia ya que mediante este proceso se realiza el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas. La importancia de la compactación de los suelos consiste en el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes las cuales disminuyen sus vacíos y aumentan la densidad del suelo. Para realizar el mejoramiento artificial de las propiedades mecánicas de un suelo y obtener la máxima densidad seca, es necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio, que consisten principalmente en determinar el contenido de humedad del suelo para lograr su máxima

densidad seca, por lo cual este procesó demanda tiempo y un determinado costo económico en establecer estas propiedades. Los ensayos para determinar el contenido de humedad óptimo de un suelo con lo cual se obtiene una densidad máxima son necesarios e imprescindibles para garantizar una buena ejecución de una obra, pero por diferentes factores estos no se los realizan, o se asumen contenidos de humedad erróneos. Por lo cual el presente trabajo de investigación nos proporcionara ayuda para poder estimar o aproximarnos a los valores de contenido de humedad óptimo (CHO) y densidad máxima seca en arcillas de baja plasticidad, basándonos principalmente en la plasticidad de los suelos.

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas de las investigaciones en las que se han realizado correlación entre límites de Atterberg y compactación de suelos finos.

Rivera (2017), realizo la Correlación entre parámetros de compactación y propiedades geotécnicas en suelos tropicales misioneros, En este estudio, se describen y examinan modelos empíricos para determinar cuáles de las propiedades índices poseen un ajuste considerable con las características de compactación para suelos residuales provenientes de la Provincia de Misiones. Se recopilaron diferentes modelos de estimación de los parámetros de compactación.

Morgenstern (2018), realizo la Correlación entre propiedades índices y parámetros de compactación en suelos residuales de misiones, Argentina. El Autor se propone presentar los resultados de ensayos de caracterización y ensayos de compactación sobre 10 muestras de suelo regional, obteniéndose correlaciones entre densidad seca máxima y humedad óptima junto a propiedades índice, conforme los ensayos de compactación a dos energías de referencia.

1.2. Situación problemática

Uno de los problemas al momento de realizar cualquier obra civil es el mal uso de la información de las propiedades del estudio del suelo para su diseño haciendo mal uso de la información y generando el deterioro de la misma.

Entre las propiedades físicas del suelo, la resistencia que tendrá el terreno es muy importante al momento de construir una edificación debido que esta es la encargada de soportar la estructura que se procederá a construir.

El conocer las características físicas del suelo, es fundamental para el estudio de cualquier obra civil, en la determinación de la densidad máxima seca y la humedad óptima del suelo requiere tiempo, conocimiento y mayor costo.

Unas de las propiedades como ser la plasticidad (límites de Atterberg) es un ensayo que no requiere mucho tiempo comparado con el ensayo de compactación, mediante el desarrollo de esta investigación es posible predecir un valor aproximado de densidades máximas secas y humedades óptimas solo para suelos finos con plasticidad baja que serán tomados para esta investigación.

La correlación de límites de Atterberg y densidades compactadas dinámicamente a la humedad óptima es un método alternativo más económico y rápido que el método convencional.

1.2.1. Problema

¿Se puede establecer una relación entre las variables de densidades compactadas dinámicamente a la humedad óptima con los límites de Atterberg en arcillas de baja plasticidad?

1.2.2. Relevancia y factibilidad del problema

La importancia de determinar el valor densidad máxima seca y humedad óptima de un suelo, es fundamental para la construcción de edificaciones, o cualquier obra civil que lo necesite.

Es necesario conocer el nivel de confiabilidad entre los límites de Atterberg y los valores de densidades compactadas dinámicamente a la humedad óptima, porque a futuro los límites de Atterberg de suelos cohesivos de baja plasticidad servirá de aproximación para establecer el valor de densidades máximas secas y humedad óptima mediante una ecuación matemática.

1.2.3. Delimitación temporal y especial del problema

Delimitación temporal:

Primer semestre del año 2023 (Enero a Junio).

Delimitación espacial:

Arcillas de baja plasticidad extraídas de la ciudad de Tarija.

1.3. Justificación

Para una mejor comprensión de la mecánica de los suelos, y las propiedades de los suelos arcillosos de baja plasticidad en la ciudad de Tarija, y como estos resisten, es necesario disponer con una serie de factores, los cuales nos puedan proveer una asistencia técnica en el desarrollo de los temas que conforman esta rama de la Ingeniería Civil.

Entre los factores más importantes e indispensables los cuales nos coadyuven a una mejor comprensión y aplicación de los suelos es poder disponer de un adecuado material de trabajo como ser un laboratorio debidamente equipado y una extensa bibliografía, asimismo poseer un registro o base de datos sobre la información de las características y propiedades que tienen estos suelos en la ciudad de Tarija.

La importancia de disponer de una base de datos de las diferentes propiedades de estos suelos, es imprescindible ya que mediante esta se pueda realizar la comparación o estimación de los resultados obtenidos mediante ensayos minuciosos de laboratorio.

Una de las propiedades necesarias y que se requieren con mayor frecuencia en el campo de fundaciones es la determinación del contenido óptimo de humedad del suelo con el cual se logra la máxima densidad seca, esto debido a que los suelos al compactarse a un contenido de humedad óptimo mejoran sus propiedades mecánicas y optimizan su aplicabilidad en la ingeniería civil. En la actualidad en nuestro medio no se cuenta con un registro o una base de datos del contenido de humedad óptimo y densidad máxima seca de los suelos cohesivos de baja plasticidad existentes en la ciudad de Tarija, los cuales nos puedan proporcionar una ayuda para poder estimar o aproximarnos a valores más certeros y adecuados para su utilización o también estos valores puedan ser usados de manera comparativa con los ensayos que se determinen en laboratorio.

En base a lo citado anteriormente la investigación que se plantea realizar consiste principalmente en poder establecer las máximas densidades secas y humedades óptimas mediante el ensayo proctor modificado en función de la plasticidad de los suelos (límite líquido, límite plástico, Índice de plasticidad) en suelos cohesivos de baja plasticidad existentes en los diferentes barrios de la ciudad de Tarija. Después de un análisis y estudio de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio se podrán determinar modelos matemáticos o ecuaciones las cuales puedan establecer o estimar el contenido óptimo de humedad y densidad máxima seca de un suelo cohesivo de baja plasticidad en particular a partir del conocimiento previo de las características plásticas del suelo en estudio.

Importantes razones de orden técnico justifican la realización del presente trabajo de investigación, las cuáles brevemente se dan a conocer a continuación:

- La realización del presente trabajo como se pudo explicar anteriormente será una gran ayuda para relacionar el comportamiento de la humedad óptima y densidad máxima seca de un suelo cohesivo de baja plasticidad en función a su plasticidad del mismo (límite líquido, límite plástico, Índice de plasticidad) utilizando como factor común la humedad óptima y densidad máxima seca de los suelos.
- Se determinará y demostrará mediante una correlación, la relación que existe entre el límite líquido, límite plástico, Índice de plasticidad y el contenido de humedad óptimo, y densidad máxima seca de un suelo.
- Los valores o resultados obtenidos de las ecuaciones que se obtenga del estudio y análisis de la relación entre la húmeda óptima y densidad máxima seca de un suelo y sus límites nos proporcionaran una ayuda para poder estimar el valor verdadero de este o también los resultados puedan ser usados de manera comparativa con los ensayos que se determinen en laboratorio.
- Con la elaboración del trabajo se podrá disponer de un mayor enfoque de las propiedades estudiadas de los suelos cohesivos de baja plasticidad de la ciudad de Tarija
- Se dispondrá con un registro o una base de datos de diferentes propiedades de los suelos de la ciudad de Tarija como ser: densidad máxima, contenido de humedad

óptimo del suelo, límite líquido, límite plástico, esto en función al tipo de suelo CL debido a que es este el que se estudiara.

- Los resultados obtenidos de la investigación podrán ser utilizados como una base de datos en otros trabajos de investigación, o estos mismos podrán ser utilizados como un grado de interconexión con otras propiedades de los suelos.
- La falta de información técnica sobre la relación que existe entre las diferentes propiedades de este suelo, hacen que el ingeniero o estudiante no consideren como una alternativa adecuada la correlación que existe entre las diferentes propiedades de un suelo CL en el análisis o estudio de la mecánica de suelos, por lo que se pretende cambiar esta situación marcando un precedente para incentivar estudios más avanzados y aplicaciones diversas con relación a este tema.
- Se debe tener en cuenta que el tema en investigación no está en el medio lo cual hace necesario la implementación de este para poder disponer de esta información y así favorecer a todos los trabajos que requiera de su utilización

Todas las razones antes mencionadas, así como también el afán personal de querer contribuir con una herramienta útil a la comunidad técnica y académica regional, han sido justificativos suficientes para el desarrollo de este tema como trabajo de investigación.

1.4. Objetivos

Los objetivos planteados para la siguiente investigación se dividen en dos partes.

1.4.1. Objetivo General

Correlacionar los valores de contenido de humedad óptimo y densidad máxima seca con los límites de Atterberg en arcillas de baja plasticidad, mediante un análisis estadístico descriptivo con el fin de establecer la relación entre variables.

1.4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos que ayudaran en el desarrollo del proyecto son los siguientes:

- Establecer la muestra a analizar.
- Clasificar las muestras extraídas de suelos finos mediante la clasificación SUCS.

- Determinar el límite líquido y límite plástico de cada muestra tomada en campo de acuerdo al ensayo establecido ASTM D4318.
- Determinar la densidad máxima seca y humedad óptima para cada muestra, mediante el ensayo de proctor modificado basado en las normas 698-91 de la ASTM
- Realizar una correlación simple y múltiple y determinar cuál tipo de correlación es la más aceptable.
- Determinar una ecuación empírica con la cual se estime datos de densidades máximas secas y humedades óptimas en función de la plasticidad para un suelo CL.

1.5. Hipótesis

Los valores de Límites de Atterberg y las densidades compactadas dinámicamente a la humedad óptima presentan una correlación positiva muy fuerte.

1.6. Operacionalización de variables

La Operacionalización de las variables se conforma por independientes y dependientes, que se presentaran a continuación.

1.6.1. Variable independiente

- valores de límites de Atterberg

Tabla 1 Operacionalización de variable independiente

Variable 1	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Valores de límites de Atterberg	Límite líquido	(%)	Con equipo Casagrande
	Límite plástico	(%)	Rollitos de 3mm de diámetro

Fuente: Elaboración propia

1.6.2. Variable dependiente

- valores de densidad máxima seca y humedad óptima.

Tabla 2 Variable dependiente.

Variable 2	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Compactación	Densidad máxima seca	(g)	Masa de suelo seco
	Contenido de humedad Óptimo	(%)	Humedad por horno

Fuente: Elaboración propia

1.7. Identificación del tipo de investigación

El presente trabajo es una investigación de tipo correlacional, las variables dependerán una de la otra, para conocer la composición de la muestra de suelo se realiza el ensayo de límites de Atterberg y a partir de eso también conoceremos los valores de densidades máximas secas y humedades óptimas, como resultado se obtendrá rangos de aplicación.

1.8. Unidades de estudio y decisión maestra

Las unidades de estudio y decisión ayudan a visualizar los elementos sobre el cual se desarrolló la investigación, para ello se tiene lo siguiente:

1.8.1. Unidad de estudio

Se denomina como unidad de estudio, aquel elemento que nos brindara la información necesaria:

Las unidades a estudiarse son “los ensayos de suelos finos clasificados como CL desarrollados en laboratorio”

1.8.2. Población

La población se refiere a los 13 distritos que conforman la ciudad de Tarija

1.8.3. Muestra

La muestra escogida son 30 suelos de 30 barrios dentro de los 13 distritos de la ciudad de Tarija cuya clasificación sea arcillas de baja plasticidad

1.8.4. Selección de las técnicas de muestreo

El criterio a seguir fue adoptar un muestreo por conveniencia, y una técnica para la selección de una muestra a partir de una población.

El muestreo que se pretende obtener es suelo arcilloso de baja plasticidad, la cantidad del suelo necesario para poder realizar el estudio de laboratorio será extraída de los bancos de suelo.

1.9. Métodos y técnicas empleadas

Se utilizó dos métodos y técnicas de investigación: Empíricas y teóricas.

1.9.1. Empíricas

Se realizó experimentos, a través de ensayos de laboratorio, con el fin de determinar las variables de los ensayos de Límites de Atterberg y compactación de arcillas de baja plasticidad de la ciudad de Tarija.

1.9.2. Teóricos

Toda la teoría disponible relacionada a lo que va estudiar la presente investigación, tales como conceptos, definiciones y normas.

1.10. Procesamiento de la información

La determinación del nivel de confiabilidad está a base de un análisis estadístico, correlacional.

1.11. Alcance de la investigación

Básicamente la elaboración de la presente investigación es realizada con el fin de contribuir mejor información al momento de diseñar cualquier tipo de obra civil, lo cual se realizará teniendo en cuenta los diferentes estudios e investigaciones realizadas en la mecánica de suelos los cuales indican la relación que existe entre la plasticidad de un suelo y su densidad máxima seca y contenido de humedad óptimo.

Para poder realizar y establecer una correlación se determinará un número adecuado de 30 datos de las propiedades en estudio, establecidas o calculadas apropiadamente en laboratorio y cumpliendo con todas las normas implantadas, ya que los valores determinados nos garantizaran y certificaran que el trabajo que se pretende realizar es óptimo.

Con la elaboración de la presente investigación se realizará un análisis de correlación entre el contenido de humedad óptimo y densidad máxima seca de los suelos CL y la plasticidad de este, teniendo como zona de estudio los diferentes barrios de la ciudad de Tarija.

En la presente investigación, una de las propiedades que deberán contar los suelos para ser incluidos en la investigación es la plasticidad, ya que los suelos no plásticos no formaran parte en el análisis del estudio, esto debido a que la correlación que se pretende demostrar está en función a esta propiedad de gran interés científico.

Para el análisis y estudio de los suelos se realizará la clasificación de los mismos mediante el sistema unificado de clasificación de suelos "SUCS".

Se tomará en cuenta como base las normas empleadas por el sistema AASTHO y ASTM las cuales son ampliamente usadas en nuestra región para dar una mayor claridad y precisión en análisis de los datos, se buscará una correlación entre la plasticidad y contenido óptimo de humedad, densidad máxima seca del suelo, primeramente, realizando la clasificación del suelo en según el sistema de clasificación mencionado para posteriormente realizar todos los análisis correspondientes.

La energía de compactación que se utilizará para realizar la compactación de los suelos, en todos los casos será la especificada para ensayo de Proctor modificado: también es importante tener en cuenta que los suelos que se utilizaran en el trabajo de grado, deberán ser aquellos que según su clasificación sean suelos arcillosos de baja plasticidad "CL".

Los modelos de ecuación que se determinaran en función al estudio realizado serán definidos con muestras obtenidas de los diferentes barrios de la ciudad de Tarija, por lo cual las estimaciones o predicciones que se puedan realizar, caracterizaran las propiedades de los suelos existentes en el lugar.

CAPÍTULO II
CONSIDERACIONES
GENERALES DE
LÍMITES DE
ATTERBERG Y
COMPACTACIÓN

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES GENERALES DE LOS LÍMITES DE ATTEBERG Y COMPACTACIÓN

2.1 Suelo

Se define suelo como un sustrato físico sobre el cual se realizan las obras, del que importan las propiedades físico-químicas, especialmente las propiedades mecánicas. Lo considera como un sistema multifase por estar compuesto de sólidos, líquidos y gases. Entre los parámetros de identificación son los más significativos la granulometría (distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado) y la plasticidad (la variación de consistencia del agregado en función del contenido en agua). El tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocidos como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo. Las variaciones en la consistencia del suelo en función del contenido en agua diferencian también las mencionadas clases granulométricas principales. Los parámetros de estado fundamentales son la humedad (contenido en agua del agregado), y la densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes. (Pérez Alamá, 2004)

2.2 Suelos finos

Figura 1 suelo fino



Fuente: tomado de <https://www.google.com/?hl=es>

Los suelos cohesivos o finos son los limos y arcillas estos tienden a tener granos finos y un alto contenido de humedad. Una alta concentración de arcilla o limo puede producir

todavía suelo cohesivo, incluso donde están presentes elementos no cohesivos tales como arena o grava. En un suelo cohesivo la estructura que forma, es debido principalmente a las fuerzas iónicas actuantes entre las partículas del suelo. El tamaño de las partículas de este tipo de suelo hace que las fuerzas gravitatorias actuantes sobre cada partícula. A este tipo de partícula se denomina coloide las cuales tienen forma de escamas o laminas, o de forma cilíndrica o prismática. (Ocas de la Cruz, 2013)

2.2.1 Distribución del tamaño de partícula

Según este sistema (SUCS), los suelos se dividen en tres grupos principales: de grano grueso, de grano fino y altamente orgánico (suelos-turbas).

Los suelos de grano gruesos se dividen en gravas (G) y arenas (S) según tengan más o menos del 50% de granos visibles retenidos en el tamiz N°4 (mayores a 1mm). (Terzaghi & Ralph B. Peck, 1973).

En la siguiente tabla se muestra la denominación que reciben las partículas según la fracción dominante.

Tabla 3 Características de suelos finos

Denominación		Tamaño	Tamiz	Clasificación	
Suelos granulares	Bloque	>200		Grava >2mm arena 2-0,06mm limo 0,06mm-0,002mm arcilla <0,002mm	
	Bolo	200-75			
	Grava	Gruesa	51-19		3-3/4"
		Media	19-4,75		3/4"-Nro 4
		Fina	4,75-2		Nro 4-Nro10
	Arena	Gruesa	2-0,42		Nro10-Nro 40
Fina		0,42-0,075	Nro 40-Nro 200		
Suelos finos		Limos	0,075-0,002	Límites de Atterberg	
		Arcillas	<0,002		

Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, T. y Whitman,

La separación de las partículas de los distintos tamaños de los suelos en el campo y laboratorio, y la determinación relativa de su proporción relativa en el total de la muestra,

se realiza siguiendo los siguientes aspectos, basados en el tamaño de los granos y en las claves de la experiencia:

Tabla 4 Características de suelos finos

Gravas	Granos de roca de tamaño mayor al milimétrico
Arena	Se ven los granos individuales No tiene plasticidad Es fácil de romper cuando está seco
Limo	Se ven solo unas partículas Presenta asperidad Es fácil de romper o desmenuzarse Poca o alguna plasticidad
Arcilla	Las partículas individuales no se ven Aspecto suave Difícil de romper cuando está seco Presenta plasticidad

Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, T. y Whitman,

2.3 Granulometría de suelos

Se llama granulometría o análisis granulométrico al proceso de determinación de la proporción en que se encuentra distintos tamaños de partículas presentes en un suelo. A esta proporción también se le da el nombre de gradación del suelo. El análisis granulométrico puede ser de dos formas totalmente distintas.

Uno es el del tamizado, utilizado especialmente para partículas gruesas, y el otro es el de sedimentación, utilizado para partículas finas, las cuales no son posibles determinar por tamiz (Terzaghi & Ralph B. Peck, 1973).

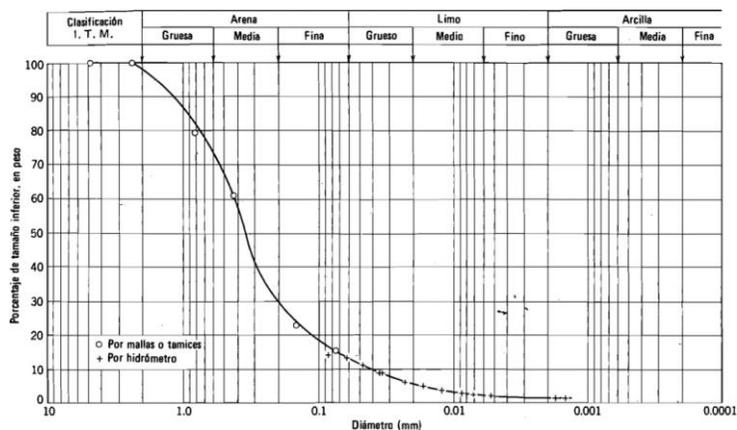
2.3.1 Método de tamizado

Este método consiste en pasar partículas del suelo por una cantidad de mallas o tamices con aberturas de tamaños diferente. Las mallas son acomodadas en serie, un encima de otra y en orden descendentes de tamaños de aberturas. El material debe ser pesado en seco, luego se lava por el tamiz N° 200, se seca nuevamente y se determina su nuevo peso después de lavado, la diferencia de pesos es conocidos como pasa N° 200 por lavado, el material seco y pesado se pasa por cada uno de los tamices y se pesa finalmente el suelo retenido en cada uno de los tamices. Con los datos obtenidos se puede calcular la cantidad de suelo en peso que pasa por cada malla y con esta información se procede a dibujar la curva granulométrica que es tal vez el resultado más importante que se puede obtener de un análisis granulométrico. (Lizcano, 2007)

La curva granulométrica se obtiene de graficar en una escala semilogarítmica, la abertura del tamiz en mm, en las abscisas, en escala logarítmica vs el porcentaje de partículas que pasa cada tamiz.

A continuación, encontramos la gráfica de la curva granulométrica.

Figura 2.3 Curva granulométrica



Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, T. y Whitman,

2.4 Clasificación SUCS

Tabla 5 Clasificación mediante SUCS

Divisiones Mayores			Símbolo del grupo	Nombre del grupo
Suelos granulares gruesos el 50% o más se retuvo en el tamiz n°200 (0.075 mm)	Grava < 50% de la fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4 (4.75 mm)	grava limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200	GW	grava bien graduada, Grava fina a gruesa
			GP	Grava pobremente graduada
		Grava con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	GM	grava limosa
			GC	grava arcillosa
	Arena ≥ 50% de fracción gruesa que pasa el tamiz n.º 4	Arena limpia menos del 5% pasa el tamiz n°200	SW	Arena fina a gruesa.
			SP	Arena pobremente graduada
		Arena con más de 12% de finos pasantes del tamiz n° 200	SM	Arena limosa
			SC	Arena arcillosa
		ML	Limo	

Suelos de grano fino más del 50% de la muestra pasa el tamiz No.200 (0.075 mm)	Limos y arcillas, límite líquido <50	Inorgánico	CL	Arcilla de baja plasticidad
		Orgánico	OL	Limo orgánico, arcilla Orgánica
	Limos y arcillas límite líquido ≥ 50	Inorgánico	MH	limo de alta plasticidad, limo elástico
			CH	Arcilla de alta Plasticidad
		Orgánico	OH	Arcilla orgánica, Limo orgánico
	Suelos altamente orgánicos			Pt

Fuente: Mecánica de suelos. Lambe, T. y Whitman, R

2.5 Límites de un suelo

Los suelos finos pueden tener infinidad de estados, según la cantidad de agua que hayan absorbido, que varían desde un estado prácticamente sólido a otro extremo prácticamente líquido. La cantidad de humedad determina su consistencia, ósea la mayor o menor cohesión entre sus partículas; la cual determina su estado de consistencia. (Geotecnia Fácil 2019)

Se define su consistencia como el grado de cohesión en las partículas de un suelo; y su resistencia a la acción de fuerzas externas que tienden a destruir su estructura; por tanto, los diferentes estados de consistencia podrán ser definidos por ciertos límites de

consistencia, o ciertos límites de humedad, propios de cada suelo. Los estados que se quiere diferenciar son: solidó, semisólido, plástico y líquido. (Consistencia del suelo 2011)

Cuando a un suelo solidó se le añade agua, cada partícula solididad de suelo se cubre por una delgada lámina de agua, cuyo espesor dependerá de la cantidad de agua que se vaya añadiendo al suelo seco. A medida que el espesor de esta delgada lámina de agua crezca, aumentara la lubricación para el deslizamiento entre partículas húmedas; es decir disminuirá la fricción. (JM Gisbert Blanquer 2010)

En la década de los años treinta del anterior siglo Atterberg, estableció procedimientos empíricos para diferenciar los límites de los diferentes estados de un suelo cualquiera; llamó límite líquido al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados líquidos y plástico; llamó límite plástico al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados plástico y semisólido; llamó límite de contracción al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados semisólido y solidó. Los límites de consistencia o los límites de Atterberg, como quiera llamárselos son propios de cada suelo y varían en márgenes considerables ya que dependen de su composición química y mineralógica, dependen de la forma y tamaño de sus partículas; de su capacidad de absorción de agua y de la película de agua que cubre a sus partículas sólidas. (AJ Puy Santín · 2005)

2.5.1 Plasticidad de suelos

En algunos tipos de suelos añadiéndoles agua y remodelándolos, adoptan una consistencia característica, que se ha denominado plástica. Estos suelos han sido llamados arcillas. La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido hace mucho tiempo atrás para clasificar suelos en forma puramente descriptiva. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. En ese momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica; las investigaciones posteriores han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar. (AS Cevallos Luna 2012)

Resulta muy útil, en nuestros días, seguir manejando en Mecánica de Suelos un concepto simple de plasticidad, basado en ideas con un sentido físico inmediato, incorporando las conclusiones aplicables de la Teoría de la Plasticidad en forma gradual, en etapas más avanzadas del estudio y siempre con un criterio que permita adoptar puntos de vista teóricos claramente confirmados por la experimentación y el laboratorio. (Juárez Badiño 2013)

Al tratar de definir en términos simples la plasticidad de un suelo, no resulta suficiente decir que un suelo plástico puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, pues una arena fina y húmeda tiene esas características cuando la deformación se produce lentamente, sin embargo, no es plástica; hay entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena en una importante diferencia: el volumen de la arcilla permanece constante durante la deformación mientras que el de la arena varía; además la arena se desmorona en deformación rápida. (Javier Acosta 2009)

En Mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Con esta definición se logra circunscribir la propiedad a las arcillas en ciertas circunstancias, según se verá más adelante. Los experimentos realizados por diferentes científicos e investigadores han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos, que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua; en los suelos plásticos, el espesor de estas capas de agua sólida y viscosa influida es grande, y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determinan su plasticidad. Si esta hipótesis fuera correcta, otros líquidos bipolares mezclados con polvo de arcilla deberían de producir suelos plásticos, mientras que los líquidos mono polares generarían suelos exentos de tal propiedad; es si se demostró que tales hechos se revelaban claramente en el laboratorio. También se vio que las partículas equidimensionales, de pequeña relación área a volumen y, por lo tanto, la escasa actividad eléctrica superficial, nunca constituyen suelos plásticos. (Geotecnia Fácil 2010)

2.5.2 Estados de consistencia, límites de plasticidad

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales uno solo, el debido a Atterberg, se mencionará en lo que sigue:

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente. Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg. (J Rojas Huamaní · 2017)

- Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
- Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de éstas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia. La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada límite líquido, nombre que hoy se conserva. Se definió en términos de una cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en una cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de un cierto número de golpes. (J Rojas Huamaní 2017)

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada límite plástico y definido también en términos de una manipulación de laboratorio. En este caso se rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada. A las fronteras anteriores, que definen el intervalo plástico del suelo se les ha llamado límites de plasticidad. Además de los límites de plasticidad (líquido y plástico) ya señalados, Atterberg definió otros límites de consistencia, que se mencionan a continuación:

- El límite de adhesión, definido como el contenido de agua con el que la arcilla pierde sus propiedades de adherencia con una hoja metálica, por ejemplo, una espátula.
- El límite de cohesión, definido como el contenido de agua con el que los grumos de arcilla ya no se adhieren entre sí.
- El límite de contracción, frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, definido con el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando.

De estos límites, sólo el de contracción presenta un interés definido en algunas importantes aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Este límite se manifiesta visualmente por un característico cambio de tono oscuro a más claro que el suelo presenta en su proximidad, al irse secando gradualmente. Atterberg lo determinaba efectuando mediciones durante el proceso de contracción. (Luis Miguel Choque 2022)

2.5.3 Determinación del límite líquido

Cuando la plasticidad se convirtió en una propiedad índice fundamental, a partir de la utilización que Terzaghi y Casagrande hicieron de ella, la determinación de los límites de plasticidad se transformó en prueba de rutina en todos los laboratorios; en este caso, los métodos de Atterberg se revelaron ambiguos, dado que la influencia del operador es grande y que muchos detalles, al no estar especificados, quedaban a su elección. En vista de lo cual, Terzaghi sugirió a Casagrande la tarea de elaborar un método de prueba para la determinación del límite líquido estandarizando todas sus etapas, de modo que

operadores diferentes en laboratorios distintos obtuviesen los mismos valores. Como resultado de tal investigación nació la técnica basada en el uso de la Copa de Casagrande que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje fijo unido a la base. Una excéntrica hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base del dispositivo, que es de hule duro. La altura de caída de la copa es, por especificación, de 1 cm. medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la base misma, estando la copa en su punto más alto. Es importante que este ajuste se haga con todo cuidado, usando un prisma metálico de 1 cm de lado, para hacer la calibración; este prisma se introduce entre base y copa, cuidando que su arista superior quede en contacto con el punto de la copa que golpea la base. (En las copas usadas este punto se delata por la brillantez causada por el desgaste.) La copa es esférica, con radio interior de 54 mm. espesor 2 mm. y peso 200 ± 20 g. Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerle una ranura trapecial con dimensiones estandarizadas. (Luis Miguel Choque 2022)

Para hacer la ranura debe usarse el ranurador laminar ya con las medidas establecidas; la copa se sostiene con la mano izquierda, con el tacón hacia arriba y el ranurador se pasa a través de la muestra, manteniéndolo normal a su superficie, a lo largo del meridiano que pasa por el centro del tacón, con un movimiento de arriba hacia abajo. En poco tiempo se adquiere la soltura necesaria para hacer una ranura apropiada, con una sola pasada suave del ranurador, en una arcilla bien mezclada, sin partículas gruesas. En mezclas no uniformes o con partículas gruesas, los bordes de la ranura tienden a rasgarse; cuando esto suceda el suelo ha de volver a remoldearse con la espátula, colocándolo de nuevo y formando otra vez la ranura. En los suelos con arena o con materia orgánica no se puede formar la ranura con el ranurador, debiendo usarse entonces la espátula, utilizando el ranurador sólo para verificar las dimensiones. En ocasiones se ha usado otro tipo de ranurador, curvo con sección trapecial, que no rebana el suelo al ser introducido en él, sino que forma la ranura desplazándolo, lo cual hace que se rompa la adherencia entre el suelo y la copa, especialmente en suelos arenosos; en tal caso los golpes hacen que el suelo deslice, cerrándose más pronto la ranura por la falta de aquella adherencia; por tal causa este ranurador no es aconsejable. (Luis Miguel Choque 2022)

A partir de extensas investigaciones sobre los resultados obtenidos por Atterberg con su método original ya descrito y usando determinaciones efectuadas por diferentes operadores en varios laboratorios, se estableció que el límite líquido obtenido por medio de la copa de Casagrande corresponde al de Atterberg, si se define como el contenido de agua del suelo para el que la ranura se cierra a lo largo de 1.27 cm., con 25 golpes en la copa. Esta correlación permitió incorporar a la experiencia actual toda la adquirida previamente al uso de la copa. De hecho, el límite líquido se determina conociendo 2 ó 3 contenidos de agua diferentes en su vecindad, con los correspondientes números de golpes y trazando la curva Contenido de agua y número de golpes. (Luis Miguel Choque 2022)

La ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido. Para mejor determinación y apreciación se usa papel semilogarítmico (con los contenidos de agua en escala aritmética y el número de golpes en escala 51 logarítmica), la curva anterior, llamada de fluidez, es una recta cerca del límite líquido. El modo de determinar el límite líquido es mediante la ecuación de la curva de flujo que es:

$$W = Fw * \log N + C$$

Donde:

W = Contenido de agua, como porcentaje del peso seco.

Fw = índice de fluidez, pendiente de la curva de fluidez, igual a la variación del contenido de agua correspondiente a un ciclo de la escala logarítmica.

N = Número de golpes.

C = Constante que representa la ordenada en la abscisa de 1 golpe; se calcula prolongando el trazo de la curva de fluidez.

Para construir la curva de fluidez sin salirse del intervalo en que puede considerarse recta, se recomienda registrar valores entre los 6 y los 35 golpes, determinando 4 a 6 puntos, tres entre 6 y 15 golpes y tres entre 23 y 32.

Para consistencias correspondientes a menos de 6 golpes se hace ya muy difícil discernir el momento del cierre de la ranura y si ésta se cierra con más de 35 golpes, la gran duración de la prueba causa excesiva evaporación.

En pruebas de rutina basta con determinar 4 puntos de la curva de fluidez.

La fuerza que se opone a la fluencia de los lados de la ranura proviene de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por lo que el número de golpes requerido para cerrar la ranura es una medida de esa resistencia, al correspondiente contenido de agua.

De lo anterior puede deducirse que la resistencia de todos los suelos en el límite líquido debe ser la misma, siempre y cuando el impacto sirva solamente para deformar al suelo, como es el caso de los suelos plásticos; pero en el caso de los suelos no plásticos (arenosos), de mayor permeabilidad que las arcillas, las fuerzas de impacto producen un flujo del agua hacia la ranura, con la consecuencia de que el suelo se reblandece en las proximidades de aquélla, disminuyendo su resistencia al esfuerzo cortante; por ello en esos suelos, el límite líquido ya no representa un contenido de agua para el cual el suelo presente una resistencia al corte definida. Por medio de pruebas de laboratorio se determinó que el límite líquido de un suelo plástico corresponde a una resistencia al corte de 25 g/cm².

La hipótesis de que el número de golpes es una medida de la resistencia al corte del suelo, fue enunciada por Casagrande y se confirma por el hecho de que una gráfica semilogarítmica de la resistencia contra el contenido de agua es recta y no sólo en la vecindad del límite líquido, sino en consistencias bastante distintas

2.5.4 Determinación actual del límite plástico

Para la determinación del límite plástico, se debe realizar la formación de rollitos con la condición de que el diámetro sea de 3 mm.

La formación de los rollitos se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material; también es frecuente efectuar el rolado sobre una placa de vidrio.

Cuando los rollitos llegan a los 3 mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento se determinará rápidamente su contenido de agua, que es el límite plástico.

Se han hecho varios intentos para sustituir el rolado manual por la acción mecánica de algún aparato, pero sin resultados satisfactorios, debido, en primer lugar, a que la experiencia ha demostrado que en esta prueba la influencia del operador no es importante y, en segundo, a que, hasta la fecha, no ha podido desarrollarse ningún aparato en que la presión ejercida se ajuste a la tenacidad de los diferentes suelos; en el rolado manual, el operador, guiado por el tacto, hace el ajuste automáticamente. (Jhonatan Reque Lumbre)

2.5.5 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad (IP) numéricamente es la diferencia ente el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), es decir:

$$I_p = LL - LP$$

El índice de plasticidad nos indica la magnitud del campo plástico del material analizado. Esto significa que un índice plástico elevado indicará mayor plasticidad del suelo.

Tabla 6 Plasticidad de diversos suelos arcillosos/limosos

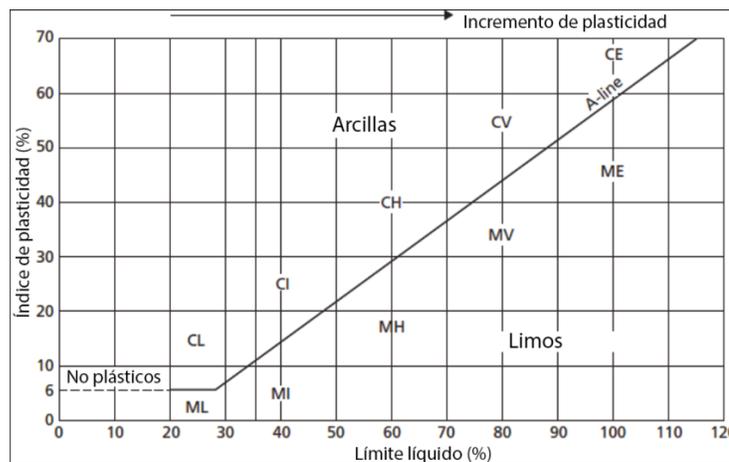
Categoría	Suelo	Ip	Grado de plasticidad
I	Arena o limo	0 a 1	No plástico
		1 a 5	Ligera plasticidad
		5 a 10	Baja plasticidad
II	Franco arcilloso	10 a 20	Mediana plasticidad
III	Arcilloso limoso	20 a 35	Alta plasticidad
	Arcilla	>35	Muy alta plasticidad

Fuente: Modificado de Craig y Knappett (2012)

Podemos decir también que el índice de plasticidad se expresa con el porcentaje del peso en seco de la muestra de suelo e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico. (Consistencia del suelo 2013)

En general, el índice de plasticidad depende sólo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen.

Figura 2 Carta de plasticidad



Fuente: Modificado de Craig y Knappett (2012)

Un IP elevado indica un exceso de arcilla o de coloides en el suelo. Siempre que el LP sea superior o igual al LL, su valor será cero. El índice de plasticidad también da una buena indicación de la compresibilidad. Mientras mayor sea el IP, mayor será la compresibilidad del suelo (Consistencia del suelo 2013).

2.6 Compactación de suelos

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. La importancia de la compactación de los suelos consiste en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su densidad seca, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para

caminos, bordos de defensa, muelles, pavimentos, fundaciones, cimentaciones etc. (Paramo, 2002)

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso; para suelos puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso.

En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos "pata de cabra".

En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera que el ingeniero tiene posibilidad de elegir entre muchos, los implementos adecuados a cada caso particular. (Juárez, 2005)

La eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio la compactación que se pueda lograr en el campo con el equipo disponible. De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son los más importantes:

El contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso.

Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

El establecimiento de una prueba simple de compactación en el laboratorio cubre, principalmente, dos finalidades. Por un lado, disponer de muestras de suelo compactadas teóricamente con las condiciones de campo, a fin de investigar sus propiedades mecánicas para conseguir datos firmes de proyecto; por otro lado, es necesario poder controlar el trabajo de campo, con vistas a tener la seguridad de que el equipo usado está trabajando efectivamente en las condiciones previstas en el proyecto. (Juárez, 2005)

En realidad, la secuela práctica suele ser como sigue:

Cuando se va a realizar una obra en la que el suelo vaya a ser compactado se recaban muestras de los suelos que se usarán; en el laboratorio se sujetan esos suelos a distintas condiciones de compactación, hasta encontrar algunas que garanticen un proyecto seguro y que puedan lograrse económicamente con el equipo de campo existente; con el equipo de campo que vaya a usarse se reproducen las condiciones de laboratorio adoptadas para el proyecto (esto suele hacerse construyendo y compactando en el campo un terraplén de prueba con el suelo a usar, en el que se ve el número de veces que deba pasar el equipo, el espesor de las capas de los suelos depositados para compactar, etc.)

Finalmente, una vez iniciada la construcción, verificando la compactación lograda en el campo con muestras al azar tomadas del material compactado en la obra, se puede comprobar que en ésta se están satisfaciendo los requerimientos del proyecto. (Juárez, 2005)

2.6.1 Pruebas de compactación

En la actualidad existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la compactación de los suelos. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido a R. R. Proctor y es conocido hoy día como Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials) Estándar. La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión en tres capas, dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada.

El molde es un cilindro de 0.94 l de capacidad aproximada, de 10.2 cm. de diámetro y 11.7 cm. de altura, provisto de una extensión desmontable de igual diámetro y 5 cm. de altura.

El molde puede fijarse a una base de metal con tornillos de mariposa.

El pisón es de 2.5 kg de peso y consta de un vástago cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm. de diámetro. Los golpes se aplican dejando caer el pisón desde la altura

de 30.5 cm. Dentro del molde el suelo debe colocarse en tres capas que se compactan dando 25 golpes, repartidos en el área del cilindro, a cada una de ellas.

Con los datos anteriores la energía específica de compactación es de 6 kg cm/cm³ (12300 libras, pie/pie³), calculada con la fórmula:

$$E_e = \frac{N * n * W * h}{V}$$

Donde:

E_e = Energía específica.

N = Número de golpes por capa.

n = Número de capas de suelo.

W = Peso del pisón.

h = Altura de caída libre del pisón.

V = Volumen del suelo compactado.

Los datos que determinan la energía específica en la prueba, fueron establecidos originalmente por Proctor como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudió la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial de agua del suelo, encontrando que tal valor era de fundamental importancia en la compactación lograda. (Luengo, 1998).

En efecto, observó que, a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero que esta tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que, al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra. Es decir, Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial, llamada la "óptima", que produce la máxima densidad seca que puede lograrse con este procedimiento de compactación. Lo anterior puede explicarse, en términos generales,

teniendo en cuenta que, a bajos contenidos de agua, en los suelos finos, del tipo de los suelos arcillosos, el agua está en forma capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo, lo cual tiende a formar grumos difícilmente desintegrarles que dificultan la compactación. El aumento en contenido de agua disminuye esa tensión capilar en el agua haciendo que una misma energía de compactación produzca mejores resultados. Pero, si el contenido de agua es tal que haya exceso de agua libre, al grado de llenar casi los vacíos del suelo, ésta impide una buena compactación, puesto que no puede desplazarse instantáneamente bajo los impactos del pisón.

Debido al rápido desenvolvimiento del equipo de compactación de campo comercialmente disponible, la energía específica de compactación en la Prueba Proctor Estándar empezó a no lograr representar en forma adecuada las compactaciones mayores que podían lograrse con dicho nuevo equipo. Esto condujo a una modificación de la prueba, aumentando la energía de compactación, de modo que conservando el número de golpes por capa se elevó el número de éstas de 3 a 5, aumentando al mismo tiempo el peso del pisón y la altura de caída del mismo.

Las nuevas dimensiones son 4.5 kg. (10 libras) y 45.7 cm. (18 1/16 pulgadas) respectiva y aproximadamente.

La energía específica de compactación es ahora de 27.2 kg-cm/cm³ (56,200 libras pie/pie³), sobre la base de que el molde utilizado es el mismo que en la Prueba Proctor Estándar. Obviamente la densidad máxima obtenida con esta mayor energía de compactación resultará mayor que el obtenido en la Prueba Proctor Estándar y, consecuentemente, según la discusión precedente en torno al contenido inicial de agua, la nueva humedad óptima será ahora menor que en aquel caso.

Esta prueba modificada es conocida como Prueba Proctor Modificada o A.A.S.H.O. Modificada. Por otra parte, con el objeto de estudiar más ampliamente el efecto de la energía de compactación sobre la compactación efectivamente lograda en el suelo, al mismo tiempo que por resultar de utilidad en casos en que sólo se disponga en el campo de equipo ligero, en algunos laboratorios se usa a veces la Prueba Proctor con un número de golpes de 15 por capa, disminuyendo así la energía específica de compactación a 3.6 kg-cm/cm³ (7,400 libras-pie/pie³). En este caso la densidad seca máxima alcanzada en el

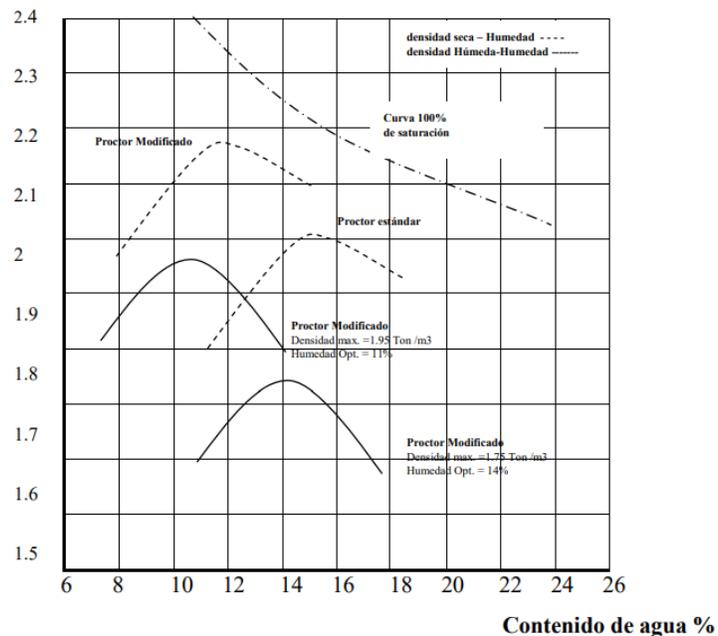
suelo será menor y la humedad óptima requerida será mayor que en el caso de la prueba estándar. En la Fig. 2.5.1 se presentan gráficas de compactación que ilustran los conceptos expuestos en los párrafos anteriores. En la gráfica aparecen las curvas de densidad humedad-contenido de agua de un suelo arcillo-arenoso sujeto a Pruebas Proctor Estándar y Proctor Modificada; aparecen también las correspondientes curvas de densidad seca-contenido de agua y la curva “del 100% de saturación” (Terzaghi & Peck, 1986).

Las curvas densidad humedad – humedad resultan de los datos de laboratorio, obtenidos al ejecutar las pruebas de compactación y las curvas densidad seca – Humedad se dibujan a partir de las anteriores aplicando la fórmula:

$$\gamma_{\text{Humedad}} = \frac{\gamma_{\text{seca}}}{1 + W\%}$$

Figura 3 Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificado

Densidad seca T/m³



Fuente: Manual de ensayos y materiales ABC

Puede observarse que la densidad seca crece al principio al aumentar la humedad, disminuyendo después de sobrepasado el valor óptimo del contenido de agua y que la densidad máxima de la Prueba Proctor Modificada es mayor que el alcanzado con la

Proctor Estándar, en tanto que la humedad óptima de ésta es mayor que la de Curva aquélla, lo cual es acorde con lo mencionado anterior mente.

La compactación del suelo se logra presionando estáticamente un émbolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con que se constituya la muestra; en cualquier aplicación la presión transmitida es constante, lo cual se logra adaptando al émbolo un resorte calibrado, que permite conocer el momento en que la presión ha sido aplicada. El molde es una cámara cilíndrica metálica de 3.3 cm de diámetro interior y 7.2 cm. de altura aproximada; el volumen de este molde resulta ser de 62 cm³; el molde está provisto de una extensión removible de 3.5 cm. de altura.

El molde se fija a una base metálica que lo mantiene en posición durante la prueba. El émbolo aplicador de presión es una barra metálica de 1.3 cm de diámetro con mango de madera; dentro de este mango actúa el resorte comprimido a que se ha hecho referencia. Cuando las pruebas Proctor se ejecutan sobre suelos puramente friccionantes como son las arenas limpias se encuentra que la curva no es del tipo mostrado en la Figura, no definiéndose, por lo general, una densidad seca máxima ni una humedad óptima. Esto es de esperarse si se toma en cuenta que este procedimiento de compactación no es el ordenado para este tipo de suelos por lo cual la acción del pisón no compacta eficientemente la muestra. Como se menciona anterior mente la vibración es el procedimiento más adecuado para compactar las arenas y por lo tanto, es preferible realizar pruebas de este tipo para determinar los pesos específicos en los estados más compacto y suelto y utilizar el concepto de compacidad relativa para determinar la compactación de masas de este tipo de suelo. Por lo anterior debe considerarse que las pruebas tipo Proctor son aplicables únicamente a suelos finos plásticos o que, por lo menos, tengan una apreciable proporción de éstos. En ocasiones se han utilizado algunos otros métodos de prueba con aplicación de carga estática, compactando a la muestra dentro de un cilindro por la aplicación de presión de un émbolo del mismo diámetro que el molde; estos métodos a veces han sido usados incluso en suelos puramente friccionantes; estas pruebas son realmente inadecuadas, por no reproducir las condiciones de amasado que pueda lograr cualquier equipo de campo disponible; en los suelos friccionantes la

aplicación de carga estática, según es obvio, no conduce a ningún resultado práctico representativo.

Modernamente se ha desarrollado equipo mecánico de laboratorio para efectuar las pruebas de compactación tipo Proctor automáticamente.

2.6.2 Curva de saturación

La masa de suelo involucrada en el proceso de compactación comienza como un sistema de tres fases: suelos, agua y aire. Durante los primeros ensayos hay una cantidad considerable de aire presente, pero el proceso produce un cambio de estado en el cual cada vez hay más suelo y agua presentes. Aun en la situación del contenido óptimo de agua en el suelo, existe una cantidad de aire considerable. En la parte húmeda de la curva, el efecto principal es de desplazar todo el aire de los vacíos con agua para producir un sistema de dos fases (una condición de cero aires – vacíos).

Como nunca es posible sacar todo el aire de los vacíos, lo cual resultaría una condición de $S=100\%$, cualquier curva de compactación estará siempre por debajo de la curva de saturación. El peso volumétrico seco correspondiente a la curva de saturación teórica para la humedad dada se calcula con la fórmula:

$$\gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + W}$$

Donde:

γ_{zav} = Peso específico seco de vacíos cero de aire

γ_w = Peso específico del agua

G_s = Peso específico de los sólidos del suelo

W = Contenido del agua

La curva de saturación teórica tiene por objeto comprobar si la prueba Proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva de saturación y la curva Proctor nunca deben cortarse dado que es imposible en la práctica llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado. La curva de saturación teórica sirve para

determinar si un suelo, en el estado en que se encuentra en el lugar, es susceptible de adquirir mayor humedad o mayor peso volumétrico fácilmente (Stevens Piedra 2018).

2.6.2.1 Otros factores que influyen en la compactación de los suelos

Aparte del contenido inicial de agua y de la energía específica de compactación, que son los factores más importantes entre los que influyen en la compactación de los suelos, hay otros que, en algunos casos, pueden ser de significación y cuya importancia práctica no debe ser subestimada.

Brevemente se mencionan algunos de ellos a continuación:

La curva densidad seca - humedad es diferente si la prueba se efectúa partiendo de un suelo relativamente seco y se va agregando agua para obtener los diferentes puntos o si se parte de un suelo húmedo que se va secando por evaporación en el laboratorio, según la prueba progresa.

Las investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y a los mismos contenidos de agua; este efecto parece ser particularmente notable en suelos finos plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo. La explicación del fenómeno podría ser como sigue: cuando el suelo está seco y se le agrega agua, ésta tiende a quedar en la periferia de los grumos, tendiendo a penetrar en ellos sólo cuando pase el tiempo; por otra parte, cuando el agua se evapora al irse secando un suelo húmedo, la humedad superficial de los grumos se hace menor que la interna. A un mismo contenido de humedad se tienen entonces condiciones diferentes en los grumos de suelo; en el primer caso, en que el agua se agregó, la presión capilar entre los grumos será menor por el exceso de agua en comparación con el segundo caso, en que la evaporación hace que los meniscos se desarrollen más. Por lo tanto, en el primer caso la ligazón entre los grumos será menor, haciendo que una misma energía de compactación sea más eficiente para compactar al suelo que en el segundo caso. (Marcelo 2018)

Claro está que los efectos anteriores se ven influidos por el tiempo que se deje pasar entre la incorporación del agua y el momento de la prueba, pues si este tiempo es largo se permite la uniformización de la humedad en los grumos de suelo, con la consecuencia de

que el agua superficial de ellos disminuye aumentando las presiones capilares. Por lo tanto, la diferencia entre las curvas de compactación de los casos antes analizados disminuirá al aumentar el tiempo de humedecimiento de la muestra de suelo.

La práctica recomendada a estos efectos es proceder en la prueba a partir de un suelo relativamente seco incorporando agua a distintas porciones del mismo en la proporción necesaria para alcanzar los contenidos de agua deseables, dejando cada porción 24 horas en reposo a fin de permitir la uniformización de la humedad.

El contenido de agua original del suelo en la naturaleza también es un factor que influye, aunque en menor grado, en la porción de la parte "seca" de la curva de compactación, sobre todo cuando se procede a la compactación inmediatamente después de haber incorporado al suelo el agua adicional requerida.

Este fenómeno se comprende si se toma en cuenta la discusión arriba incluida, pues en un suelo originalmente bastante seco, el agua que se añade para llegar a un contenido de agua deseado para la determinación de un cierto punto de la curva, producirá una mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad externa e interna de los grumos, que si el suelo originalmente hubiera estado más húmedo. Por ello es de esperarse que los pesos específicos secos obtenidos sean mayores cuando los contenidos originales de agua del suelo sean menores.

Este efecto prácticamente se elimina si se procede como anteriormente se recomienda; es decir, dejando pasar suficiente tiempo para la adecuada incorporación del agua. Es común en la práctica el usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de la curva de compactación: ello implica la continuada "re compactación" del mismo suelo. Esta práctica se ha revelado como totalmente inconveniente toda vez que la investigación experimental ha demostrado, sin género de duda, que procediendo con un suelo re compactado los pesos específicos obtenidos son mayores que los mismos obtenidos con muestra virgen, por lo que en suelos "recompactados" la prueba puede llegar a dejar de ser representativa.

Parece que una explicación simple del efecto anterior reside en la deformación volumétrica del tipo plástico producida por las sucesivas compactaciones. Como en el campo el suelo no sufre ninguna re compactación, la práctica de laboratorio debe ser,

consecuentemente, el usar muestras de suelo diferentes para la obtención de cada punto de la curva de compactación.

Las Pruebas Proctor Estándar o Modificada con el molde de 10.2 cm (4 pulgadas) de diámetro interior no deben usarse en suelos cuyo tamaño máximo de partícula sea mayor que el correspondiente a la malla N° 4; es decir, del orden de gravas, pues estas partículas introducen efectos restrictivos indeseables que afectan las relaciones de pesos húmedos-contenido de agua; en estos casos es mucho más conveniente usar un molde de mayor volumen, cuyo diámetro sea de unos 15.2 cm. (6 pulgadas), que puede usarse en materiales cuyo tamaño máximo no sobrepase el correspondiente a la malla de 19.1 mm. (3/4 pulgadas). Independientemente del tamaño del molde, el número de capas, el número de golpes, el peso y la altura de caída del pisón deben correlacionarse para producir la misma energía de compactación. Cuando esto se cumpla, el tamaño del molde no ejerce, de por sí, influencia apreciable en la forma de las curvas de compactación, según ha demostrado la experiencia. Sin embargo, un detalle que debe cuidarse cuando se hacen todas las combinaciones necesarias es el que se conserve en todos los casos aproximadamente la relación entre el espesor de las capas compactadas y el diámetro del pisón empleado para ello.

2.6.2.2 Pruebas de compactación proctor estándar y modificada

2.6.2.2.1 Equipo necesario

Para la realización de la prueba se requiere el siguiente equipo:

Molde de 100 cm. De diámetro nominal con una capacidad de 0.944 ± 0.008 lt, con un diámetro interno de 101.6 ± 0.4 mm. y una altura de 116.4 ± 0.1 mm.

Molde de 150 mm. De diámetro nominal con una capacidad de 2124 ± 0.021 lt, con un diámetro interno de 152.4 ± 0.1 mm.

Pisón metálico de 50 ± 0.2 mm. De diámetro, con un peso de 2500 ± 10 g. Se ocupa en el método Standard.

Pisón metálico de 50 ± 2 mm. De diámetro con un peso de 4.500 ± 10 g. Se ocupa en el método modificado.

Probetas graduado con capacidad de 500 cm³ graduada a 2.5 cm³.

Una balanza con una capacidad de 10 kg y una precisión de 5 g y otra con 1 kg de capacidad y una precisión de 0.1 g.

Regla de acero de 300 mm. De largo, tamices de 50; 20 y 5 mm. De abertura, cápsulas, pailas, poruñas.

2.6.2.3 Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra de ensayo se obtiene de acuerdo a la tabla mostrada a continuación:

Tabla 7 Tamaño de muestra de ensayo

Molde	Método	Masa mínima de muestra (g)	Masa aprox. de fracción de muestra para cada determinación (g)
100	1	15000	3000
150	2	30000	6000

Fuente: Relaciones humedad-densidad-compactación (2020)

2.6.2.4 Procedimiento de la prueba

El procedimiento de prueba se ajustará a lo siguiente:

Se describe solo el método uno, Proctor Standard, ya que los demás siguen el mismo procedimiento variando solo las características indicadas.

- Para permitir un mínimo de 4 determinaciones de punto de la curva de compactación, dos bajo la humedad óptima y dos sobre ellas, se procede a secar al aire una cantidad suficiente de suelo.
- Se selecciona el material haciéndolo pasar por la malla N°4, se pesa el material retenido por ella y el que pasa. Se utiliza en el ensaye solo el material que pase bajo esta malla.
- Se mezcla cada porción de suelo, con agua para llevarla al contenido de humedad deseado, considerando el agua contenido en la muestra.

- Para permitir que el contenido de humedad se distribuya uniformemente en toda la muestra, se guardan las proporciones de suelo en envases cerrados.
- Se pesa el molde y su base. Se coloca el collar ajustable sobre el molde.
- Colocar una capa de material aproximadamente 1/3 de la altura del molde más el collar. Compactar la capa con 25 golpes uniformemente distribuidos en el molde de 100 mm de diámetro con un pisón de 2.5 kg con una altura de caída de 30.5 cm.
- Repetir 2 veces la operación anterior, escarificando ligeramente la superficie compactada antes de agregar una nueva capa. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde, el que debe sobresalir de ¼ a ½ pulgada.
- Retirar cuidadosamente el collar ajustado y enrasar la superficie del molde con una regla metálica. Pesar el molde (con la placa) y el suelo y restar la masa del primero, obteniendo así la masa del suelo compactado (M). Registrar aproximado a 1 g.
- Retirar el material del molde y extraer dos muestras representativas del suelo compactado. Obtener la humedad de cada uno de ellos y registrar la humedad del suelo compactado como el promedio de ambas.
- Repetir las operaciones anteriores, hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo. El ensayo se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda
- Dibujar los resultados obtenidos en una gráfica que tenga como abscisas, los diferentes contenidos de agua resultantes y como ordenadas los pesos específicos secos.

2.6.2.5 Errores posibles

Los errores más comunes que pueden afectar los resultados de estas pruebas son los siguientes:

- El mezclado incompleto del suelo con el agua o la incompleta destrucción de grumos en el suelo.
- El no repartir uniformemente los golpes del pisón sobre la superficie de la muestra.

- El que las muestras tomadas para determinación del contenido de humedad no sean representativas del material compactado. En caso de duda al respecto puede determinarse la humedad de todo el material del molde.
- El no determinar el número suficiente de puntos cómo definir correctamente la curva de compactación.
- Al no realizar la compactación en las capas correspondientes iguales los puntos determinados de la curva se mostrarán erráticos.
- El molde de compactación debe de colocarse sobre una base firme que evite su vibración durante el proceso de compactación.
- El uso continuado de la misma muestra.

2.6.2.6 Propiedades de suelo afectadas por la compactación

Generalmente el esfuerzo de compactación imparte al suelo:

- Un incremento a la resistencia la corte
- Un incremento en el potencial de expansión
- Un incremento en la densidad $\gamma = f(e)$
- Una disminución de la contracción
- Una disminución de la permeabilidad $\kappa = f(e)$
- Una disminución de la compresibilidad $S = f(e)$

De esta lista de propiedades afectadas por la compactación, se ve claramente que el problema de especificar la compactación es algo más que simplemente el requerimiento de incrementar la densidad del suelo. También es importante considerar los efectos colaterales; afortunada mente el problema no es tan grave como parecía a primera vista dividido al método de estipular o especificar compactación utilizando más comúnmente X% de patrón de compactación modificada según el método Aashto.

Es sin embargo muy importante especificar el tipo de suelos al cual se aplican los criterios de compactación en un proyecto dado con fin de eliminar, por ejemplo, problemas con el cambio de volumen. Se reconoce hoy en día que la estructura resultante de la masa de suelos especialmente cuando hay suelos finos presentes se asocia íntimamente con el

proceso de compactación y el contenido de humedad a la cual se compacta la masa de suelo.

Este concepto es importante en extremo para compactar los núcleos de arcilla de represas (por ejemplo), donde asentamientos fuertes pueden causar fracturas de dicho núcleo.

Se ha encontrado que la estructura dispersa del suelo obtenida al compactarlo en el lado húmedo del óptimo de la humedad resulta en un suelo que tiene resistencia la corte algo menor pero que puede resistir grandes deformaciones sin falla (fracturas) y las consiguientes filtraciones y falla total de la presa.

La compactación de suelos en el lado húmedo del óptimo reduce igual mente su permeabilidad, comparada con la permeabilidad obtenida al compactar en el lado seco del óptimo (Chema Hernández 2013).

2.6.3 Consideraciones sobre el significado de los términos “humedad óptima” y “densidad seca máxima”

En esta parte del trabajo de grado se hace una breve discusión sobre el significado de los términos humedad óptima y densidad seca máxima.

Desde hace mucho tiempo atrás y como consecuencia de los estudios de Proctor sobre compactación de suelos, los ingenieros de todo el mundo han llegado a estar familiarizados con las expresiones humedad óptima y densidad seca máxima. Desafortunadamente, con frecuencia han sido mal entendidos y es común ver que muchos ingenieros los manejan como si fueran constantes básicas fundamentales del suelo, al modo que en Física se manejan constantes tales como la de gravitación universal o el punto de ebullición del agua. En realidad, hoy es evidente que se trata de conceptos relativos variables, que pueden cambiar con el método que se utilice para compactar el suelo y con otros factores, como ya se ha hecho notar en el cuerpo de este capítulo. Para ilustrar la variación de la densidad seca máxima y de la humedad óptima con el método de compactación, científicos presenta los resultados obtenidos en varios suelos, que cubren la gama desde piedra triturada que pasa la malla 4 hasta arcilla limosa. Estos suelos se estudiaron según varios procedimientos de compactación que incluyen el Proctor Estándar (AASHO estándar), el Proctor Modificado (AASHO modificado), el método de

compactación por impacto de California y un método que usa un compactador mecánico. Aunque todos estos métodos compactan al suelo por el impacto de un pistón, existen diferencias en el peso y altura de caída libre del mismo, así como en el número y espesor de las capas de suelo. De los resultados obtenidos es evidente que hay diferencias notorias en los pesos específicos secos máximos obtenidos por estos métodos que son estándar en varias instituciones. También es evidente que al procedimiento que da los mayores pesos específicos secos máximos corresponde una menor humedad óptima. Dicho en otras palabras, la humedad óptima es una variable que depende de la energía de compactación. En el campo la humedad óptima es una variable que depende del tipo y peso de los rodillos usados en la compactación. Los resultados obtenidos muestran diferencias del orden de 10% para arena limpia y del 5% para arena limosa en los pesos específicos secos máximos. Desde el punto de vista práctico surge, entonces, la pregunta: ¿Cuál método de laboratorio duplica mejor los pesos específicos secos que pueden obtenerse en el campo con los rodillos modernos de construcción? Se tiene la experiencia, hasta cierto punto contradictoria, de que las gravas arenosas se compactan fácilmente a la densidad seca especificada con unas cuantas pasadas de un rodillo neumático y a veces hasta con el paso del equipo usual de construcción, mientras que los suelos arcillosos y limosos sujetos a numerosas pasadas de los rodillos no llegan en ocasiones a compactarse a la densidad seca especificada para una obra dada. También es evidente de los resultados obtenidos en la práctica que el acomodo de las partículas de suelo que se logra por impacto en el espacio confinado del molde en el laboratorio no es, necesariamente, el mismo que producen los rodillos lisos o los rodillos neumáticos en el campo, en que el suelo no está confinado. Mientras que algunos procedimientos de laboratorio producen compactaciones similares a las obtenidas en el campo en ciertos suelos, lo cierto es que ningún método, de los ahora en uso, duplica en forma completa la compactación lograda en el campo en todos los tipos de materiales. Especulando un poco sobre las relaciones entre los resultados obtenidos de los diversos procedimientos de compactación y el grado de compactación que normalmente puede lograrse en una obra se hace notar que si se especifica un grado de compactación del 90% del AASHO modificado, es frecuente que la densidad seca así especificada corresponda a un 95% de compactación del AASHO estándar en un tipo de

material, mientras que en otro tipo de suelo puede corresponder al 100% del AASHO estándar. (Cardenas Villegas 2001)

Estas son las diferencias que debe conocer todo ingeniero encargado del control de la compactación de una obra dada.

Lo anterior se acentúa aún más con el desarrollo durante los últimos años del equipo de compactación, tanto en cuanto a que los nuevos rodillos lisos y neumáticos son mucho más pesados cuanto que nuevos tipos, como los rodillos segmentados o los vibratorios, han hecho su aparición en este equipo especializado.

Mientras que el grado de compactación aumenta con la energía de compactación en un procedimiento dado, esto no es necesariamente cierto cuando se varía el método de compactación, pues un cierto procedimiento puede ser más eficiente que otro. Por ejemplo, los rodillos lisos no vibratorios. Así, con un rodillo vibratorio apropiado puede compactarse adecuadamente la arena con muy poca energía, sin haber ejecutado un fuerte trabajo de compactación.

Por último, se comenta sobre la diferencia entre un suelo adecuadamente compactado con un ligero trabajo de compactación y otro inadecuadamente compactado con un fuerte trabajo de compactación.

En otros términos: ¿Qué significado tiene la compactación lograda con el equipo especializado de construcción? Hveem hace notar que mientras la mayoría de los ingenieros parecen estar interesados en controlar únicamente la densidad seca como tal, se ha descuidado la atención a lo realmente importante, a saber, la mejor estabilidad estructural del suelo compactado.

En cierto tipo de suelos puede lograrse una adecuada estabilidad estructural con un ligero trabajo de compactación, mientras que en otros esta estabilidad estructural (características de resistencia, compresibilidad y de esfuerzo-deformación) puede ser inadecuada, aunque se haya efectuado un fuerte trabajo de compactación y se haya aun obtenido la compactación especificada, fijada con el criterio simplista e ingenuo de llegar a un 90% densidad seca máxima de un método estándar de laboratorio. El aumentar el grado de compactación o peso volumétrico seco de un suelo puede ser o no benéfico, dependiendo

del tipo de suelo, de su grado de compactación y de su contenido de agua principalmente. Por lo tanto, los términos densidad seca máxima y humedad óptima carecen de significado a menos que todas las condiciones y circunstancias del suelo estén claramente definidas. Existen, en efecto, casos en que inclusive una sobre compactación puede ser peligrosa, en el sentido de que se harán empeorar con ella las características de comportamiento mecánico de los suelos.

Por ejemplo, la espuma de basalto (tezontle), que se usa frecuentemente cuando se desea tener un material ligero, al ser compactada más allá de un cierto límite comienza a disgregarse produciendo gran cantidad de finos que perjudican las características de resistencia del conjunto; en otros casos, ciertos limos y arcillas expansivos aumentan mucho su peligrosidad por esta propiedad al ser compactados fuertemente sobre todo en climas húmedos. En resumen, la compactación de los suelos es un tratamiento mecánico que se da a 138 éstos en el campo a fin de mejorar sus características de comportamiento mecánico y su permanencia ante el ataque de ciertos agentes del intemperismo.

Como tal trabajo cuesta esfuerzo y dinero y ha de quedar bien hecho, está ligado a problemas de control de calidad de la obra terminada; para hacer posible tal control, se han desarrollado hoy las pruebas de compactación (Bañon, 1999).

2.6.3.1 Características del equipo de compactación proctor modificado

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en laboratorio las condiciones dadas de compactación en terreno. El más empleado, actualmente, es la denominada prueba Proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está mas de acuerdo con las sollicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo. Todos ellos consisten en compactar el suelo, con condiciones variables que se especifican a continuación:

Tabla 8 Especificación para la prueba Proctor Modificado (basadas en las 698-91 de la ASTM).

Concepto	Método a	Método b	Método c
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del Pisón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del Pisón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas	5	5	5

Fuente: Manual de ensayos y materiales de suelos ABC

Figura 4 Compactación de suelo fino



Fuente: Elaboración propia

2.7 Teoría de la correlación.

2.7.1 Relación entre variables

En la práctica encontramos a menudo que existen relaciones entre dos (o más) variables. Por ejemplo, los pesos de las personas dependen en cierta medida de sus alturas, las circunferencias de los círculos dependen de los radios, y la presión de una masa de gas dada depende de su volumen y de su temperatura.

Suele ser deseable expresar tales relaciones en forma matemática determinando una ecuación que conecte a las variables (Marisel Carvajal 2011).

2.7.1.1 Ajuste de curvas

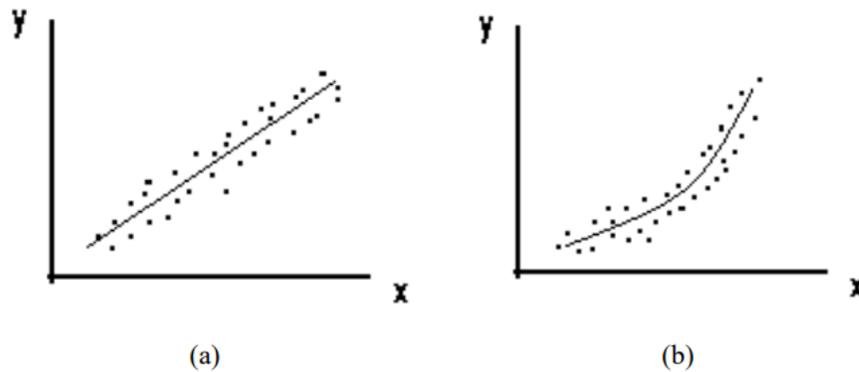
Para hallar una ecuación que relacione las variables, el primer paso es recoger datos que muestren valores correspondientes de las variables bajo consideración.

Así por ejemplo, supongamos que X e Y denotan, respectivamente, la altura y el peso de personas adultas; entonces una muestra de N individuos revelaría las alturas $X_1, X_2 \dots, X_n$ y los pesos correspondientes $Y_1, Y_2 \dots, Y_n$. El próximo paso es marcar los puntos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ sobre un sistema de coordenadas rectangulares. El conjunto de puntos resultante se llama a veces un diagrama de dispersión.

A partir del diagrama de dispersión es posible, con frecuencia visualizar una curva suave que aproxima los datos. Tal curva se llama una curva aproximante.

En la Figura 2.8 (a) por ejemplo, los datos parecen aproximarse bien a una línea recta, y decimos que hay una relación lineal entre las variables. En la Figura 2.6.1.1(b), sin embargo, aunque existe una relación entre las variables, no es lineal, y se dice que es una relación no lineal

Figura 5 Diagrama de dispersión



Fuente: Análisis de correlación (2015)

El problema general de hallar ecuaciones de curvas aproximantes que se ajusten a un conjunto de datos se llama ajuste de curvas.

2.7.1.2 Ecuaciones de curvas aproximantes

Varios tipos comunes de curvas aproximantes y sus ecuaciones se presentan en la lista adjunta para facilitar posteriores referencias. Todas las letras excepto X e Y representan constantes. Las variables X e Y se llaman variable independiente y dependiente, respectivamente, aunque estos papeles se pueden intercambiar.

- Línea recta $Y = a_0 + a_1x$
- Parábola o curva cuadrática $Y = a_0 + a_1x + a_2x^2$
- Curva cúbica $Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$
- Curva cuadrática $Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4$
- Curva de grado (n) $Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n$

Los lados derechos de las ecuaciones anteriores se llaman polinomios de grado uno, dos, tres, cuatro y n, respectivamente. Las funciones definidas por las cuatro primeras ecuaciones se llaman a veces funciones lineal, cuadrática, cúbica y cuártica, respectivamente.

He aquí algunas otras de las muchas ecuaciones que se utilizan frecuentemente en la práctica:

- Hipérbola

$$Y = \frac{1}{a_0 + a_1x}$$

- Curva exponencial

$$Y = ab^x$$

- Curva geométrica

$$Y = ab^b$$

- Curva exponencial modificada

$$Y = ab^x + g$$

- Curva geométrica modificada

$$Y = ab^b + g$$

Para decidir qué curva usar, es útil obtener diagramas de dispersión de variables transformadas. Por ejemplo, si un diagrama de dispersión de $\log Y$ versus X indica una relación lineal, la ecuación tiene la forma curva exponencial, mientras que, si $\log Y$ versus $\log X$ es lineal, la ecuación tiene la forma curva geométrica.

2.7.2 Regresión

A menudo deseamos estimar, basados en datos de una muestra, el valor de una variable Y correspondiente a un valor dado de la variable X .

Ello se puede hacer estimando el valor de Y mediante una curva de mínimos cuadrados que ajuste los datos.

La curva resultante se llama una curva de regresión de Y sobre X , ya que Y se estima a partir de X . Si queremos estimar el valor de X a partir de un valor dado de Y , hemos de usar una curva de regresión de X sobre Y , que viene a ser un intercambio de las variables en el diagrama de dispersión de modo que X sea la variable dependiente e Y la

independiente. Eso equivale a sustituir las desviaciones verticales en la definición de la curva de mínimos cuadrados desviaciones horizontales.

En general, la recta o curva de regresión de Y sobre X no es la misma que la de X sobre Y.

Anteriormente hemos considerado el problema de la regresión o estimación de una variable (la variable dependiente) de una o más variables relacionadas (las variables independientes). En esta parte tratamos el problema cercano de la correlación, o grado de interconexión entre variables, que intenta determinar con qué precisión describe o explica relación entre variables una ecuación lineal o de cualquier otro tipo.

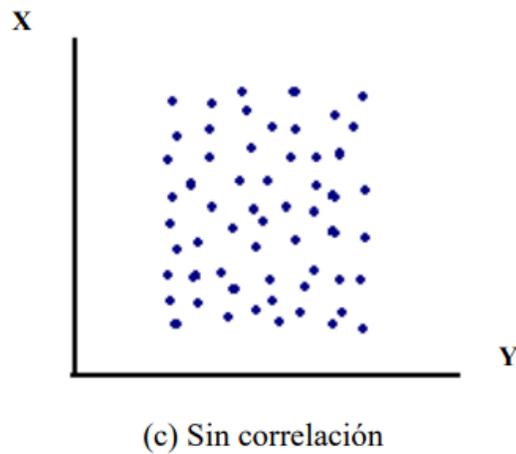
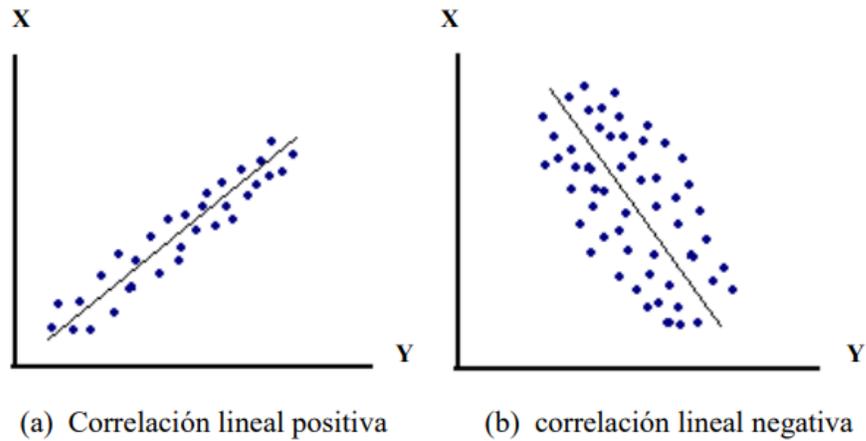
Si todos los valores de las variables satisfacen una ecuación exactamente, decimos que las variables están perfectamente correlacionadas o que hay correlación perfecta entre ellas. Así, las circunferencias C y los radios r de todos los círculos están perfectamente correlacionados porque $C = 2\pi r$. Si se lanzan dos dados 100 veces, no hay relación entre las puntuaciones de ambos dados (a menos que estén trucados) es decir, no están en correlación. Variables tales como el peso y la altura de las personas tienen una cierta correlación. Cuando sólo están en juego dos variables, hablamos de correlación simple y regresión simple. En otro caso, se habla de correlación múltiple y regresión múltiple (Estadística II 2010).

2.7.3 Correlación lineal

Si X e Y son las dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas.

Si todos los puntos del diagrama de dispersión parecen estar en una recta, como en las Figuras 2.6.2(a) y 2.6.2(b), la correlación se llama lineal. En tales casos, como ya hemos visto anteriormente, una ecuación lineal es adecuada a efectos de regresión (o estimación) (Estadística II 2010).

Figura 6 Diagramas de dispersión



Fuente: Análisis de correlación (2015)

Si Y tiende a crecer cuando X crece, como en la Figura 2.9 (a), la correlación se dice positiva, o directa. Si Y tiende a decrecer cuando X crece, como en la Figura 2.9 (b), la correlación se dice negativa, o inversa. Si todos los puntos parecen estar sobre una cierta curva, la correlación se llama no lineal, y una ecuación no lineal será apropiada para la regresión. Es claro que la correlación no lineal puede ser positiva o negativa. $X X X Y Y$ 152 Si no hay relación entre las variables, como en la Figura 2.9 (c), decimos que no hay correlación entre ellas.

2.7.3.1 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación es aquel que me indica que tanto dos variables están relacionadas linealmente. Si la variación explicada es cero (o sea, toda la variación es variación inexplicada), ese cociente es 0. Si la variación inexplicada es cero (o sea, toda la variación es explicada), el cociente es 1. En los demás casos, está entre 0 y 1. Como nunca es negativo, denotaremos ese cociente por r . La cantidad r , llamada coeficiente de correlación, viene dada por:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{variación - explicada}}{\text{variación - total}}}$$

Este coeficiente varía entre -1 y +1. Se usan los signos + y - para las correlaciones positivas y negativas, respectivamente. Nótese que r es una cantidad adimensional, es decir, no depende de las unidades empleadas.

Hay que insistir en que en todo caso el valor calculado de r mide el grado de relación con referencia al tipo de ecuación que se adopta.

Así pues, si se supone una ecuación lineal y dan un valor de r próximo a cero, eso significa que no hay apenas correlación lineal entre las variables.

No obstante, no quiere decir que no haya correlación en absoluto, pues puede haber una fuerte correlación no lineal entre ellas.

En otras palabras, el coeficiente de correlación mide la bondad del ajuste. Hemos de hacer constar que un coeficiente de correlación alto (o sea, cercano a 1 ó - 1) no indica necesariamente una dependencia directa de las variables. Puede haber una alta correlación entre el número de libros publicados cada año y el número de tormentas cada año. Tales ejemplos constituyen lo que se llama correlaciones sin sentido.

Para la interpretación del coeficiente de correlación se utilizará la siguiente tabla:

Tabla 9 Interpretación del coeficiente de correlación

Valor de r (+/-)	Interpretación
+0,91 a +1	Correlación positiva perfecta
+0,76 a +0,90	Correlación positiva muy fuerte
+0,51 a 0,75	Correlación positiva considerable
+0,11 a +0,50	Correlación positiva media
+0,01 a +0,10	Correlación positiva débil
0,00	No existe correlación alguna entre variables
-0,01 a -0,10	Correlación negativa débil
-0,11 a -0,50	Correlación negativa media
-0,51 a 0,75	Correlación negativa considerable
-0,76 a -0,90	Correlación negativa muy fuerte
-0,91 a -1,00	Correlación negativa perfecta

Fuente: Metodología de la investigación 6ta edición

2.7.3.2 Correlación múltiple

El grado de correlación existente entre tres o más variables se llama correlación múltiple los principios fundamentales implicados en los problemas de correlación múltiple son análogos a los de la correlación simple, tratados anterior mente.

Notación de subíndices Para permitir generalizaciones a números grandes de variables, conviene adoptar una notación de subíndices.

Denotaremos por X_1, X_2, X_3, \dots las variables bajo consideración. Entonces denotaremos por $X_{11}, X_{12}, X_{13} \dots$ los valores que toma la variable X_1 , y X_{21}, X_{22}, X_{23} los que toma la variable X_2 .

Con esta notación, una suma tal como $X_{21} + X_{22} + X_{23} \dots X_{2n}$ se escribirá $\sum X$.

2.7.3.3 Coeficiente de correlación múltiple

El coeficiente de correlación múltiple se define por extensión de la ecuación vista a continuación.

En el caso de dos variables independientes, por ejemplo, el coeficiente de correlación múltiple viene dado por

$$R_{123} = \sqrt{1 - \frac{s_{123}^2}{s_1^2}}$$

Cuando se usa una ecuación de regresión lineal, el coeficiente de correlación múltiple se llama coeficiente de correlación múltiple lineal. Salvo que se especifique lo contrario, siempre que nos refiramos a correlación múltiple queremos decir correlación múltiple lineal.

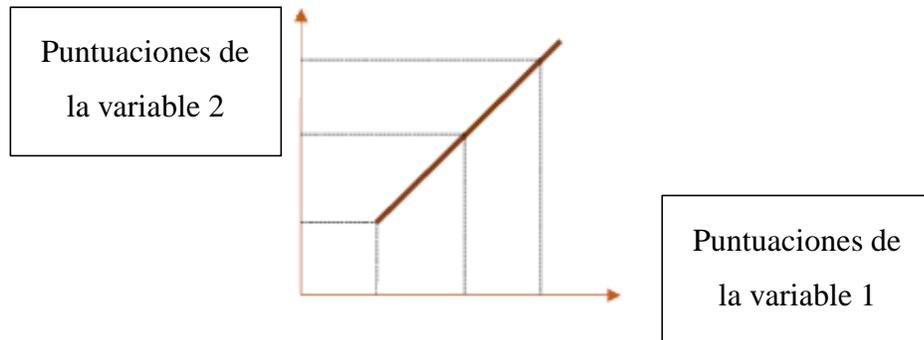
Un coeficiente de correlación múltiple, tal como R_{123} está entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1, más precisa es la relación lineal entre las variables. Cuanto más cerca de 0, peor es la relación lineal. Si el coeficiente de correlación múltiple es 1, la correlación se dice perfecta. Aunque un coeficiente de correlación igual a 0 indica que no hay relación lineal entre las variables, puede haber una relación no lineal

Una correlación es una medida del grado en que dos variables se encuentran relacionadas.

Un estudio correlacional puede intentar determinar si individuos con una puntuación alta en una variable también tiene puntuación alta en una segunda variable y si individuos con una baja puntuación en una variable también tiene baja puntuación en la segunda. Estos resultados indican una relación positiva.

Una manera de representar las relaciones enunciadas puede ser gráficamente. Mediante un eje de coordenadas podemos representar en el eje de abscisas las puntuaciones en la primera variable, y en el de coordenadas las de la segunda variable. Así una relación positiva perfecta se representaría del siguiente modo.

Figura 7 Relación positiva perfecta



Fuente: Elaboración propia

Las relaciones lineales entre variables pueden ser expresadas por estadísticos conocidos como coeficientes de correlación.

2.7.4 Coeficiente de determinación (R cuadrado)

El coeficiente de determinación es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. El coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar.

Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar. De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será.

2.7.4.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que decimos "variables relacionadas linealmente". Esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson.

Por ejemplo, la relación entre la ansiedad y el rendimiento tiene forma de U invertida igualmente, si relacionamos población y tiempo la relación será de forma exponencial. En estos casos (y en otros muchos) no es conveniente utilizar la correlación de Pearson.

Insistimos en este punto, que parece olvidarse con cierta frecuencia.

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice de fácil ejecución e, igualmente, de fácil interpretación. Digamos, en primera instancia, que sus valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Esto es, si tenemos dos variables X e Y, y definimos el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos variables como r_{xy} entonces:

$$0 \leq r_{xy} \leq 1$$

Hemos especificado los términos "valores absolutos" ya que en realidad si se contempla el signo el coeficiente de correlación de Pearson oscila entre -1 y $+1$. No obstante ha de indicarse que la magnitud de la relación viene especificada por el valor numérico del coeficiente, reflejando el signo la dirección de tal valor. En este sentido, tan fuerte es una relación de $+1$ como de -1 . En el primer caso la relación es perfecta positiva y en el segundo perfecta negativa.

2.7.4.2 Coeficiente de Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman es una medida no paramétrica, es decir que se utiliza para variables no paramétricas esto nos indica que estas variables no cumplen con la prueba de normalidad de gauss, se utiliza principalmente para el análisis de datos.

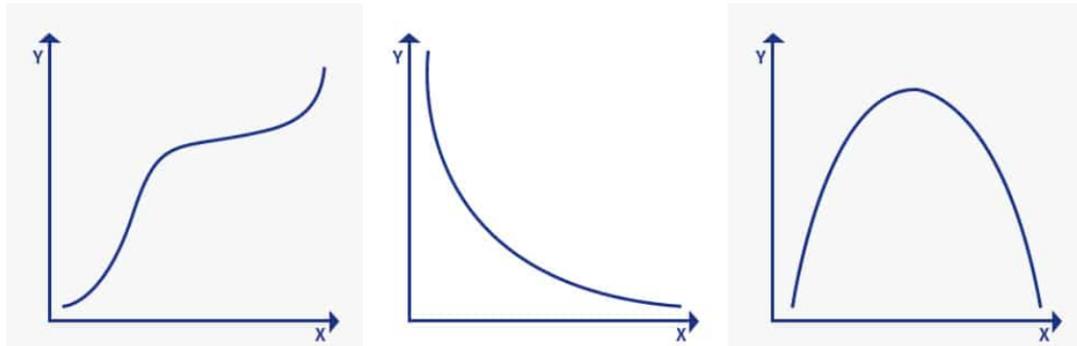
Para el cálculo y la prueba de significación de la variable de ranking, se requiere que las siguientes suposiciones de datos sean ciertas:

- ✓ Nivel de intervalo o ratio
- ✓ Relación lineal
- ✓ Bivariante distribuido

Si los datos no cumplen con las suposiciones anteriores, necesitarás el coeficiente de correlación de Spearman. Para esto, es necesario saber qué función monótona es para entenderlo.

Una función monótona es aquella que nunca disminuye o nunca aumenta, ya que es un incremento variable independiente. Puede ser explicada usando la imagen de abajo:

Figura 8 Función monótona



Fuente: Estadística II (2020)

La imagen explica tres conceptos de la función monótona:

1. Monotónicamente en aumento: Cuando la variable “x” aumenta y la variable “y” nunca disminuye.
2. Disminuye monótonamente: Cuando la variable “x” aumenta, pero la variable “y” nunca aumenta.
3. No monótono: Cuando la variable “x” aumenta y la variable “y” a veces aumenta y a veces disminuye.

La relación monótona es menos restrictiva cuando se compara con una relación lineal que se utiliza en el coeficiente de correlación de Pearson. Aunque la monotonidad no es el último requisito, no será significativo perseguirla sin determinar realmente la fuerza y dirección de una relación monótona si ya se sabía que la relación entre la variable no es monótona.

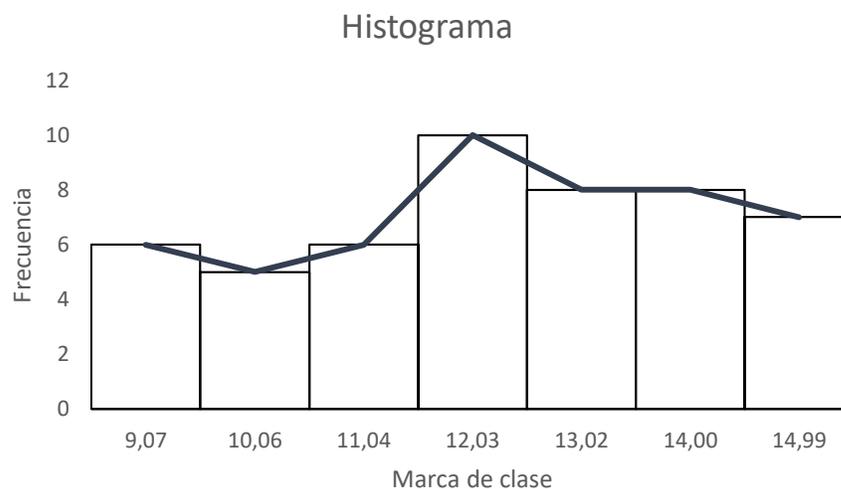
2.8 Prueba de normalidad

La importancia de verificar la normalidad de las muestras en un estudio es fundamental en estadística porque si las muestras son normales se pueden aplicar métodos estadísticos paramétricos, en el caso contrario se deben o bien transformar los datos o bien utilizar métodos no paramétricos (Risk 2003). El paso inicial entonces, es determinar si las variables en estudio pueden ser representadas por una distribución normal. Es decir, si las

variables medidas en la muestra pueden ser descritas con parámetros de tendencia central y dispersión alrededor de dichos parámetros.

Los métodos de la estadística descriptiva nos pueden ayudar a verificar en una primera instancia la normalidad de las variables, un histograma, y un gráfico de boxplot, nos representa en dos formas distintas la distribución de los datos. Para el ejemplo del Cuadro podemos decir por la forma del histograma y por los espacios intercuantiles similares del gráfico de boxplot que las muestras parecen tener una distribución normal.

Figura 9 12 Histograma de la forma de la campana de Gauss



Fuente: Ingenio empresa (2016)

Las pruebas de normalidad más formales son las pruebas de Shapiro-Wilk y de Kolmogorov-Smirnov (Dalgaard 2008; Zar 2010). En las pruebas de normalidad se busca aceptar la H_0 dado que la mayoría de los métodos estadísticos es necesaria la suposición de la distribución normal de la variable de interés. Púes siendo así es posible conocer los parámetros que describen por completo (la media, su desviación estándar). Un valor *de* $P \geq 0.05$ en los test de normalidad indican que no hay prueba suficiente para rechazar la normalidad de la variable, es decir que la variable cumple con la prueba de normalidad. *Y si* $P < 0.05$ nos indica que no hay normalidad.

2.8.1 Prueba de shapiro wilk

La prueba de Shapiro–Wilk se usa para contrastar la normalidad de un conjunto de datos. Se plantea como hipótesis nula que una muestra proviene de una población normalmente distribuida. Fue publicado en 1965 por Samuel Shapiro y Martin Wilk.¹Se considera uno de las pruebas más potentes para el contraste de normalidad (Charlyereales 2019).

Esta prueba se aplica para una cantidad de datos menores a 50 muestras.

2.8.2 Prueba de kolmogorov-smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

En el caso de que queramos verificar la normalidad de una distribución, la prueba de Lilliefors conlleva algunas mejoras con respecto a la de Kolmogórov-Smirnov; y, en general, el test de Shapiro–Wilk o la prueba de Anderson-Darling son alternativas más potentes (Pedrosa 2015).

Conviene tener en cuenta que la prueba Kolmogórov-Smirnov es más sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución. La prueba de Anderson-Darling proporciona igual sensibilidad con valores extremos.

Esta prueba se aplica para una cantidad de datos mayores a 50.

2.9 Statgraphics

Statgraphics es un software estadístico considerado como estándar, que presenta los resultados de una forma entendible para personas que no tenga grandes conocimientos de estadística, además de no utilizar programación y, por tanto, simplificar el trabajo.

Una de las aportaciones de este software es el intérprete de resultados o StatAdvisor. Esta utilidad permite interpretar estadísticamente los resultados de cualquier procedimiento, siendo de gran ayuda si no tenemos previos conocimientos de estadística y nos resulta difícil su interpretación.

Statgraphics permite realizar gran variedad de estudios estadísticos, como estadística descriptiva, modelos econométricos, análisis multivariante, diseño de experimentos, control estadístico de la calidad, etc., aunque la aportación utilizada para este estudio fue aplicar Statgraphics a la regresión no paramétrica y las predicciones (CB Bernabéu 2000)

CAPÍTULO III
APLICACIÓN
PRACTICA

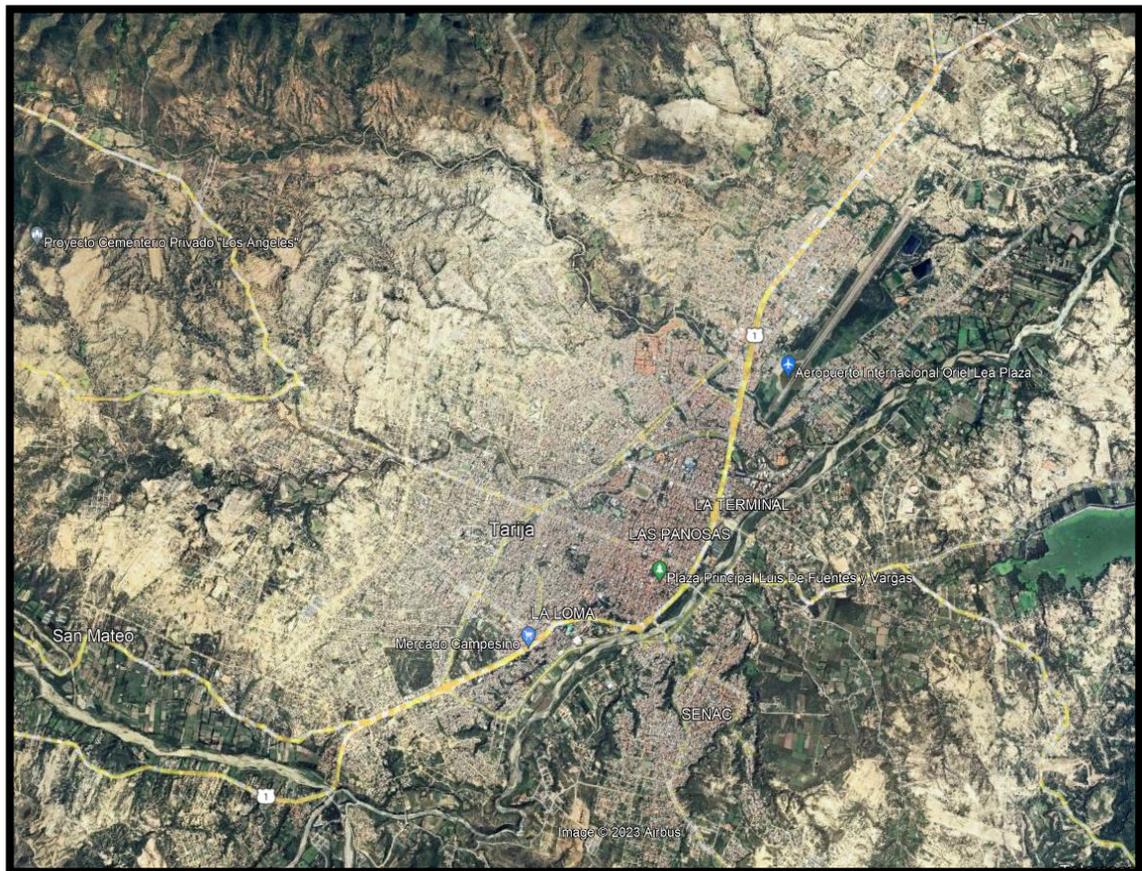
CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRACTICA

3.1 Zona de estudio

El estudio que presenta en esta investigación, toma en cuenta los diferentes barrios que pertenecen a la provincia cercado del departamento de Tarija.

Figura 10 Delimitación de la provincia Cercado-Tarija

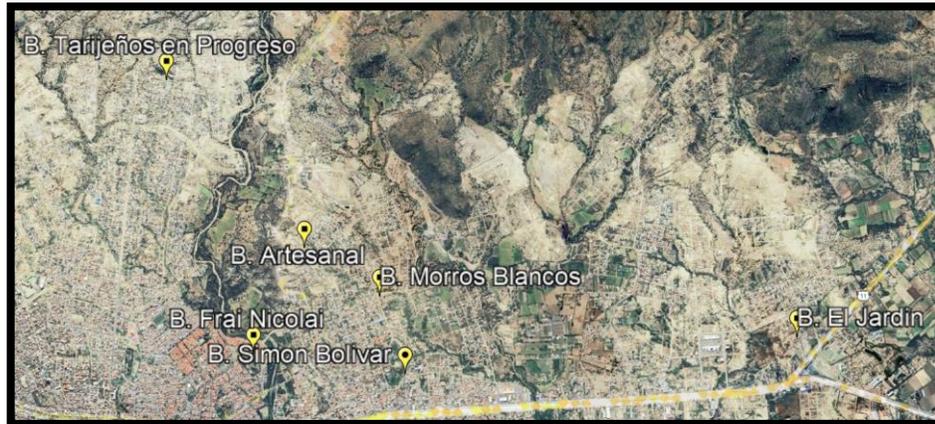


Fuente: Imagen satelital google Earth

3.1.1 Criterio de selección de Muestras

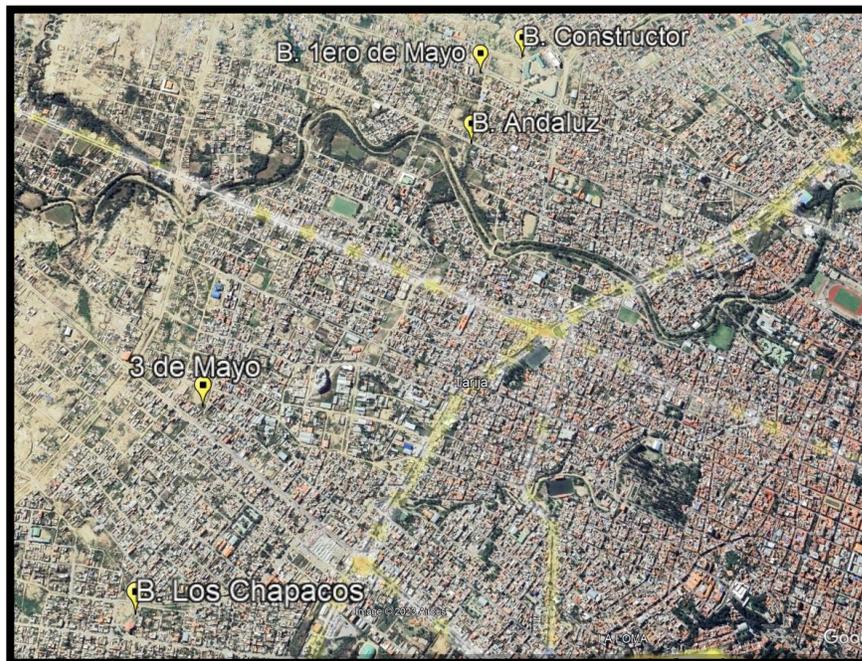
Para la selección de muestras se tomó en cuenta 30 muestras las cuales fueron extraídas de 30 barrios de la provincia cercado.

Figura 11 Ubicación Geográfica de los 30 diferentes barrios de Tarija



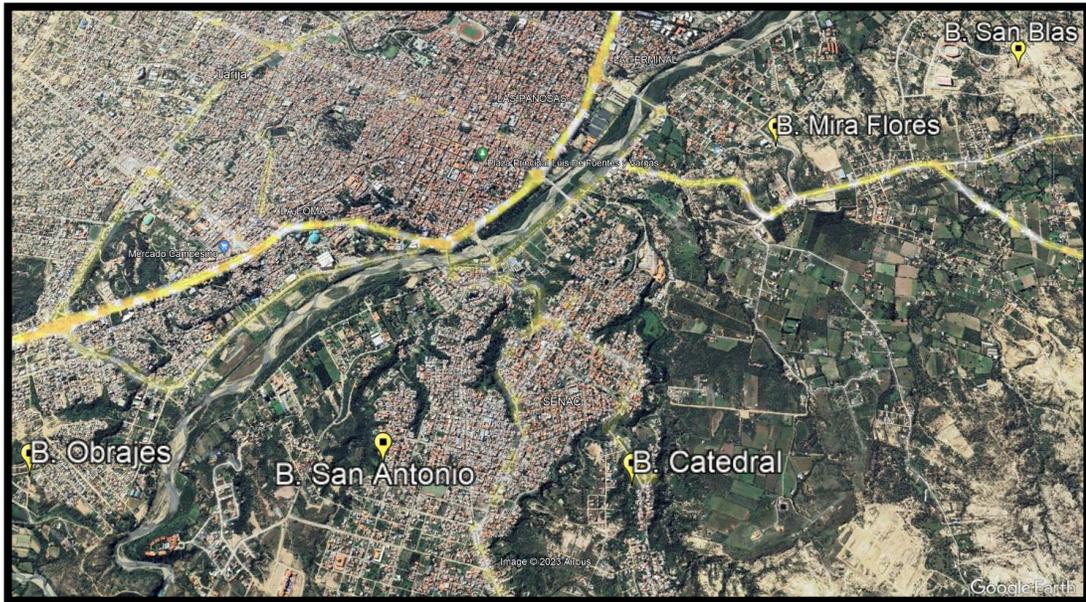
Fuente: Imagen satelital google Earth

Figura 3.3 Barrio 1ero de Mayo, Constructor, Andaluz, 3 de Mayo, los Chapacos



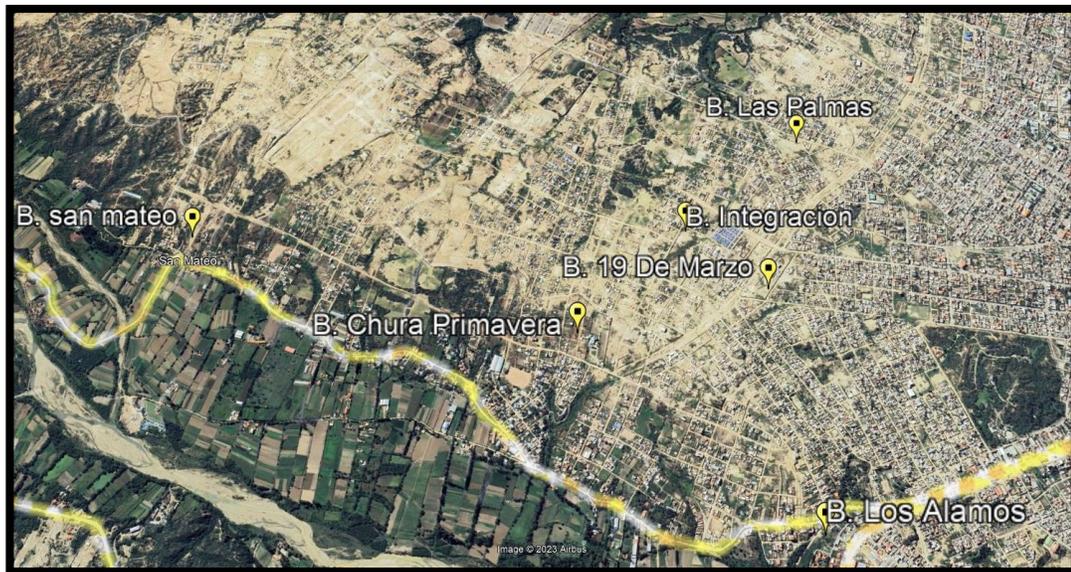
Fuente: Imagen satelital google Earth

Figura 12 Barrios: San Blas, Mira Flores, Obrajes, San Antonio, Catedral



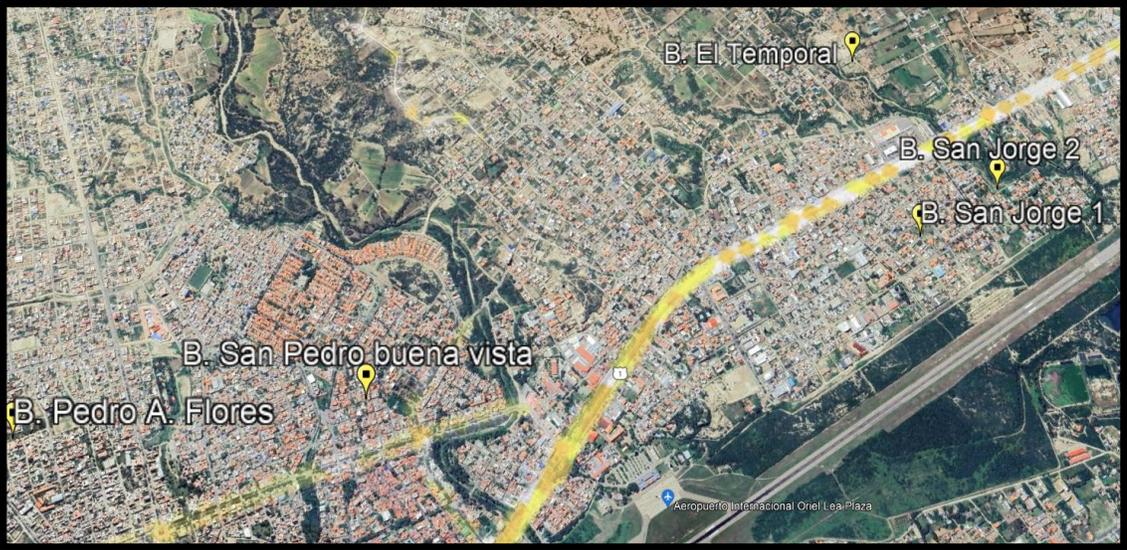
Fuente: Imagen satelital google Earth

Figura 13 Barrios: San Mateo, Las Palmas, Chura Primavera, 19 de Marzo, Integración, Los Álamos



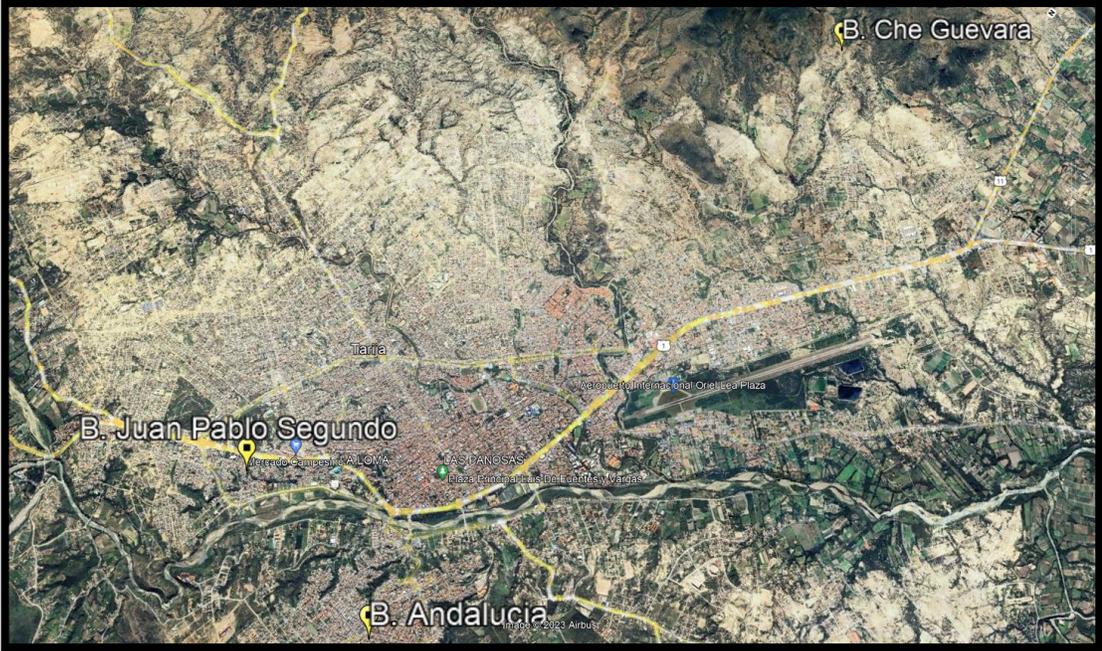
Fuente: Imagen satelital google Earth

Figura 14 Barrios: Pedro Antonio Flores, San Pedro de Buena Vista, San Jorge 2, San Jorge 1, El Temporal



Fuente: Imagen satelital google Earth

Figura 15 Che Guevara, Juan Pablo Segundo, Andalucía



Fuente: Imagen satelital google Earth

3.1.2 Selección de los puntos de estudio

La selección de cada muestra esta seleccionada en diferentes barrios de la provincia cercado, en este caso se toma en cuenta coordenadas geográficas, las cuales están representadas en la siguiente tabla:

Tabla 10 Coordenadas de los 30 puntos en los barrios elegidos.

Numero	Barrio	Latitud	Longitud
1	San mateo	21°28'17.19"S	64°44'31.50"O
2	Miraflores	21°33'7.82"S	64°43'55.09"O
3	Los Chapacos	21°30'22.10"S	64°44'23.42"O
4	1ero de Mayo	21°31'2.43"S	64°42'55.65"O
5	Morros Blancos	21°32'21.28"S	64°41'35.35"O
6	Constructor	21°31'8.55"S	64°42'52.38"O
7	Andaluz	21°31'1.83"S	64°43'7.84"O
8	3 de Mayo	21°30'27.46"S	64°43'53.36"O
9	Simón Bolívar	21°32'43.24"S	64°41'45.36"O
10	Obrajes	21°30'41.99"S	64°45'26.10"O
11	Ch Guevara	21°32'26.35"S	64°39'28.69"O
12	Tarijeños en P.	21°30'51.86"S	64°41'40.97"O
13	San Blas	21°34'3.59"S	64°43'28.16"O
14	Artesanal	21°31'56.09"S	64°41'43.09"O
15	Frai Nicolai	21°32'9.61"S	64°42'16.87"O
16	Jardín	21°33'50.98"S	64°42'16.87"O
17	Catedral	21°32'39.69"S	64°45'17.86"O
18	San Antonio	21°31'50.67"S	64°45'17.78"O
19	S.P. Buena Vista	21°32'12.17"S	64°42'37.90"O
20	Los Álamos	21°29'57.66"S	64°45'13.24"O
21	Juan P. Segundo	21°31'1.49"S	64°44'50.49"O
22	Temporal	21°32'57.86"S	64°41'14.77"O
23	Pedro A. F.	21°31'32.99"S	64°43'2.66"O

24	San Jorge 1	21°33'15.67"S	64°41'39.60"O
25	Andalucía	21°32'20.57"S	64°45'11.08"O
26	Chura Primavera	21°29'20.36"S	64°44'43.65"O
27	Integración	21°29'36.84"S	64°44'22.82"O
28	Las Palmas	21°29'55.49"S	64°44'2.83"O
29	19 de Marzo	21°29'50.05"S	64°44'32.94"O
30	San Jorge 2	21°33'24.69"S	64°41'26.23"O

Fuente: Elaboración propia

3.2 Extracción de muestras

Para la extracción de muestras y técnica de muestreo se siguió el procedimiento indicado por las normas (ASTM D2488), (ASTM D4220), (AASHTO T248)

3.2.1 Ensayo de granulometría para suelos finos ASTM D422

Este método se usa para material que pasa el tamiz Nro 10, donde también se puede realizar con una representación menor al peso total. Esto quiere decir que se puede usar un peso de 300gr aproximadamente.

Se deja reposar el suelo totalmente saturado durante 24hrs o más, logrando que el suelo forme una pasta suave, con características similares al barro o lodo.

Sin que se pierda el material se introduce la muestra en la malla Nro 200 luego con la ayuda del agua procedemos a lavarlo hasta que el suelo tome aspectos claros sin sedimentación.

Posteriormente se procede a guardar en el horno el suelo retenido en la malla Nro 200 en un recipiente durante 24hrs para luego ser tamizado en las mallas Nro 40 y Nro 200.

Figura 16 Método de tamizado por lavado para suelos finos



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17 Tamizado de suelos finos



Fuente: Elaboración propia.

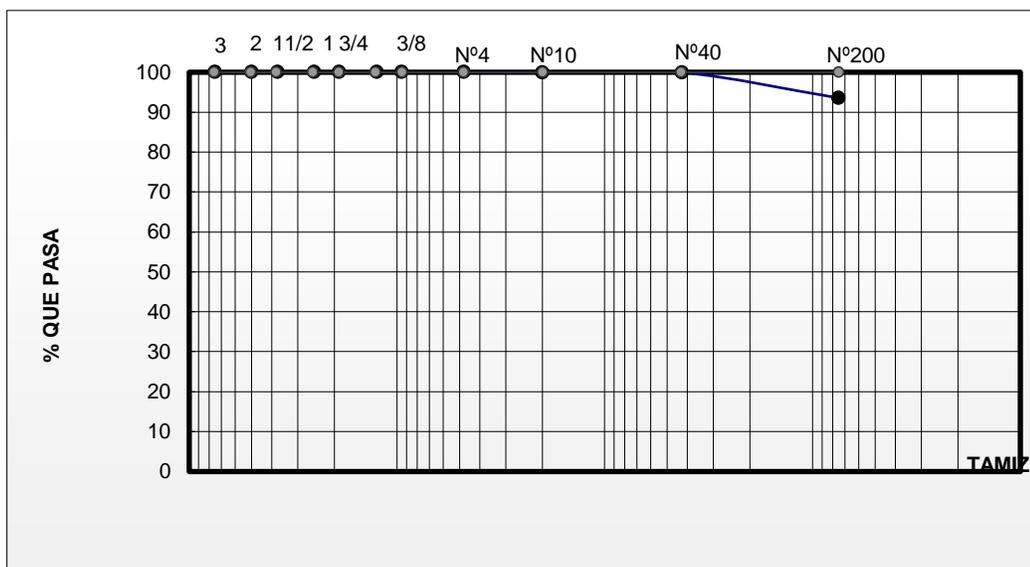
3.2.1.1 Granulometría del barrio San Mateo

Tabla 11 Granulometría barrio San Mateo

Tamices	Tamaño	Peso retenido	Retenido. acumulado	% Retenido	% Que pasa
	(mm)	(gr)	(gr)		del total
3"	75	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº4	4,75	0,00	0,00	0,00	100,00
Nº10	2,00	0,90	0,90	0,05	99,96
Nº40	0,425	1,20	2,10	0,11	99,90
Nº200	0,075	127,90	130,00	6,50	93,50

Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Curva granulométrica del barrio San Mateo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Resumen de Granulometría para los 30 suelos

Numero	Barrio	% Pasa Nro 10	% Pasa Nro 40	% Pasa Nro 200
1	San mateo	99,96	99,9	93,5
2	Miraflores	99,94	99,82	96,3
3	Los Chapacos	99,49	98,88	96
4	1ero de Mayo	99,44	99,36	92,76
5	Morros Blancos	99,49	99,07	94,07
6	Constructor	99,53	99,29	95,93
7	Andaluz	99,88	99,33	93,01
8	3 de Mayo	99,39	98,22	95,33
9	Simón Bolívar	99,38	97,61	94,4
10	Obrajes	98,03	96,91	95,02
11	Che Guevara	98,44	97,28	94,21
12	Tarijeños en Progreso.	99,44	98,82	95,31
13	San Blas	99,7	98,98	94,11
14	Artesanal	99,38	97,61	93,98
15	Frai Nicolai	98,83	97,71	92,5

16	Jardín	99,25	97,17	94,33
17	Catedral	99,7	98,69	92,48
18	San Antonio	99,3	98,75	98,2
19	San Pedro de Buena Vista	99,5	99,39	96,3
20	Los Álamos	99,39	98,73	97,92
21	Juan Pablo Segundo	99,96	99,51	93,43
22	Temporal	99,4	98,22	97,71
23	Pedro Antonio Flores	99,85	99,55	92,13
24	San Jorge 1	99,96	99,51	95,92
25	Andalucía	98,92	97,19	94,12
26	Chura Primavera	99,38	98,12	93,3
27	Integración	99,7	98,34	97,82
28	Las Palmas	98,82	98,74	97,13
29	19 de Marzo	98,83	97,73	96,42
30	San Jorge 2	99,38	98,67	95,43

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Ensayo para determinar la consistencia del suelo

La obtención de la consistencia que tiene un suelo se lo realiza por el método de los límites de Atterberg, esto se realizó para los 30 suelos extraídos de los barrios de la provincia cercado.

3.3.1 Ensayo de limite liquido ASTM D4318

Las muestras en primer lugar deben estar en estado seco, y se utilizara la cantidad de muestra que haya pasado el tamiz Nro 40 con una cantidad mínima de 100gr.

Se pesa 4 taras y se enumera cada una para colocar las muestras.

Se debe colocar el equipo Casagrande en un lugar firme y plano, y posteriormente proceder a nivelarlo con una altura de caída igual a 1cm.

En un recipiente se coloca la muestra que pasa el tamiz Nro 40, se mezcla con la cantidad de agua necesaria para lograr que se forme una pasta, con ayuda de una espátula se coloca de manera horizontal la muestra en la cuchara Casagrande.

Figura 19 Formación de la pasta para realizar el limite liquido



Fuente: Elaboración propia

Figura 20 Proceso de colocar la muestra en el equipo Casagrande



Fuente: Elaboración propia

Figura 21 Muestra de suelo en equipo Casagrande



Fuente: Elaboración propia.

Con el ranurador se procede a ranurar de manera firme en una sola pasada, tratando de que en el fondo de la ranura se encuentre visible el color de la copa a lo largo de toda la muestra.

Una vez realizada la ranura, se debe accionar la copa Casagrande al ritmo de dos golpes por segundo, no perdiendo el número de golpes accionando hasta que la ranura se produzca una unión de aproximadamente 1,27 cm.

Figura 22 Ranuración de la muestra en equipo Casagrande



Fuente: Elaboración propia

Se debe anotar en una planilla el número de golpes, con la espátula y en forma perpendicular a la ranura, realizar dos cortes a la muestra, estos deben pasar por los extremos de la parte que se unió. luego extraer la porción de suelo entre los cortes y se procede en depositarla en las taras que enumeramos en un principio, se realiza este procedimiento 4 veces, para una cantidad de golpes que va desde 15-20, 20-25, 25-30 y 30-35 golpes cada uno se pesa y se anota en una planilla de datos.

Realizado los 4 ensayos para un mismo suelo se guarda durante 24hrs en el horno para posteriormente proceder a pesarlo.

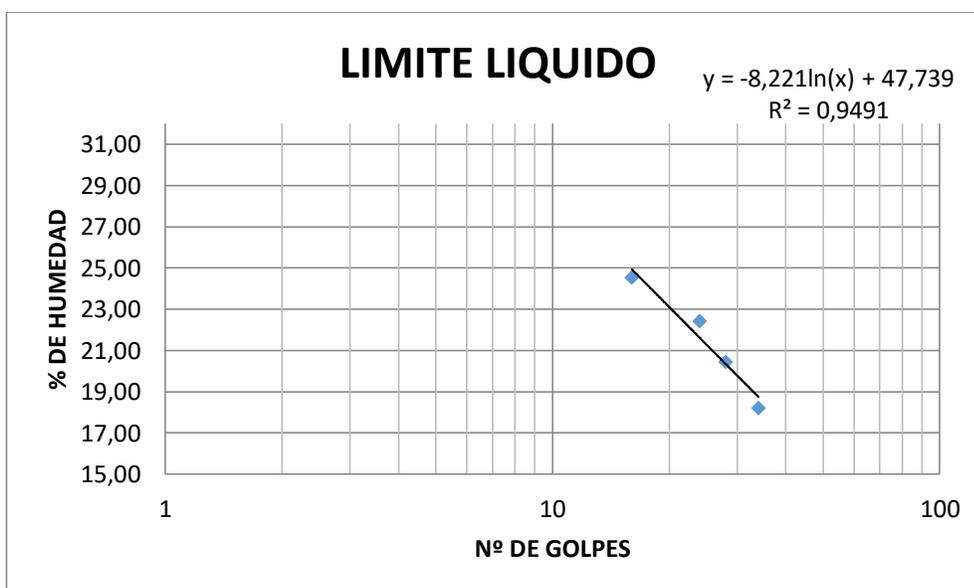
3.3.1.1 Determinación del límite líquido de la muestra Nro. 1 Barrio San Mateo

Figura 23 Limite liquido de la muestra 1 barrio San Mateo

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	16	24	28	34
Suelo Húmedo + Cápsula	46,36	37,51	40,38	39,83
Suelo Seco + Cápsula	41,22	34,06	36,45	36,39
Peso del agua	5,14	3,45	3,93	3,44
Peso de la Cápsula	20,27	18,68	17,21	17,50
Peso Suelo seco	20,95	15,38	19,24	18,89
Porcentaje de Humedad	24,54	22,43	20,45	18,23

Fuente: Elaboración propia

Figura 24 Grafica de limite liquido barrio San Mateo



Fuente: Elaboración propia

Límite líquido (LL)
21,28

Figura 25 Resumen del límite líquido para las 30 muestras

Numero	Barrio	Ll
1	San mateo	21,28
2	Miraflores	30,10
3	Los Chapacos	29,45
4	1ero de Mayo	21,13
5	Morros Blancos	22,02
6	Constructor	29,14
7	Andaluz	20,05
8	3 de Mayo	29,13
9	Simón Bolívar	26,93
10	Obrajes	27,01
11	Che Guevara	23,81
12	Tarijeños en Progreso.	29,76
13	San Blas	22,40
14	Artesanal	22,14
15	Frai Nicolai	20,00
16	Jardín	24,82
17	Catedral	21,10
18	San Antonio	31,87
19	San Pedro de Buena Vista	28,09
20	Los Álamos	30,11
21	Juan Pablo Segundo	22,18
22	Temporal	21,62
23	Pedro Antonio Flores	20,82
24	San Jorge 1	29,48
25	Andalucía	26,13
26	Chura Primavera	22,53
27	Integración	30,34
28	Las Palmas	30,22
29	19 de Marzo	30,32
30	San Jorge 2	28,56

Fuente: Elaboración propia

3.3.2 Ensayo de limite plástico ASTM D4318

A la muestra preparada con agua, debe agregarse material seco que pase por el tamiz Nro 40, y mezclar homogéneamente, se notará que la consistencia será más plástica.

Se dispone a colocar la base de vidrio en una superficie plana y limpia.

Pesar 3 capsulas limpias e identificarlas, registrar en la planilla de datos.

Se agarra con las manos una porción de material y se procede a amasarlo, hasta que el mismo pueda ser manipulado plásticamente.

Se hace una pelotita de material, para luego transformarlo en un pequeño rollito, rodándolo sobre un vidrio, hasta que el mismo tenga un diámetro aproximadamente de 3mm, si el rollito forma grietas a ese diámetro entonces nos servirá para proceder a pesarlos.

Figura 26 formación de rollitos para limite plástico



Fuente: Elaboración propia

Figura 27 Forma de rollitos igual a 3mm



Fuente: Elaboración propia

Con la espátula cortar pequeños trocitos del material y seleccionando aquellos que se encuentren

Figura 28 Selección de rollitos para limite plástico



Fuente: Elaboración propia

Se procede a guardar en el horno junto a los límites plásticos durante 24 hrs para luego ser pesados. Este procedimiento se lo realiza para los 30 suelos extraídos para la investigación.

Figura 29 Preparación de muestras para llevar a secar al horno



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.1 Determinación del límite plástico del barrio San Mateo

Tabla 13 Limite plástico barrio San Mateo

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula	23,59	20,38	21,44
Peso de suelo seco + Cápsula	23,27	20,10	21,08
Peso de cápsula	20,90	17,99	18,33
Peso de suelo seco	2,37	2,11	2,75
Peso del agua	0,32	0,28	0,36
Contenido de humedad	13,54	13,32	13,21

Fuente: Elaboración propia

Límite Plástico (LP)
13,36

Tabla 14 Resumen del límite plástico para las 30 muestras

NUMERO	BARRIO	LP
1	San mateo	13,36
2	Miraflores	20,26
3	Los Chapacos	19,44
4	Iero de Mayo	12,28
5	Morros Blancos	13,20
6	Constructor	18,49
7	Andaluz	12,39
8	3 de Mayo	20,30
9	Simón Bolívar	15,98
10	Obrajes	18,89
11	Che Guevara	16,78
12	Tarijeños en Progreso.	18,44
13	San Blas	13,60
14	Artesanal	14,30
15	Frai Nicolai	12,50
16	Jardín	15,59
17	Catedral	11,66
18	San Antonio	19,82
19	San Pedro de Buena Vista	17,61
20	Los Álamos	18,56
21	Juan Pablo Segundo	14,29
22	Temporal	12,77
23	Pedro Antonio Flores	12,99
24	San Jorge 1	20,59
25	Andalucía	12,40
26	Chura Primavera	13,45
27	Integración	20,88
28	Las Palmas	20,28
29	19 de Marzo	20,59
30	San Jorge 2	18,72

Fuente: Elaboración propia

3.4 Ensayo para determinar la humedad óptima y densidad máxima seca de las muestras.

Las muestras en primer lugar deben estar en estado seco, el molde que es usado debe ser medido con ayuda del vernier sus dimensiones de interior para calcular su volumen.

Antes de realizar la práctica debemos conocer el tipo de suelo que se está realizando para usar porcentajes de humedad aleatorios, de esa manera determinaremos su humedad óptima de las muestras.

Se debe mezclar la muestra de suelo con cada porcentaje de humedad dado de acuerdo al peso del suelo con el que se procederá a compactar.

Figura 30 Proceso de mezcla par la muestra de compactación



Fuente: Elaboración propia

La compactación debe hacerse en cinco capas tomando en cuenta los 25 golpes que recibe cada una,

Figura 31 Compactación de la muestra barrio San Mateo



Fuente: Elaboración propia

Una vez compactada la muestra 5 capas de 25 golpes se procede a realizar el enrazado del molde para luego ir a pesarlo.

Figura 32 Enrazado de muestra



Fuente: Elaboración propia

Figura 33 Peso del molde más la muestra



Fuente: Elaboración propia

Se debe realizar 4 puntos para cada muestra de compactación es decir se debe trabajar a cuatro diferentes humedades para cada muestra, luego se procede a desmoldar la muestra y sacar de la parte intermedia una pequeña fracción de muestra la cual será puesta en una tara para luego ser pesada y guardada en el horno durante 24hrs y ser pesadas nuevamente.

3.4.1.1 Compactación de la muestra Nro 16 B. Jardín

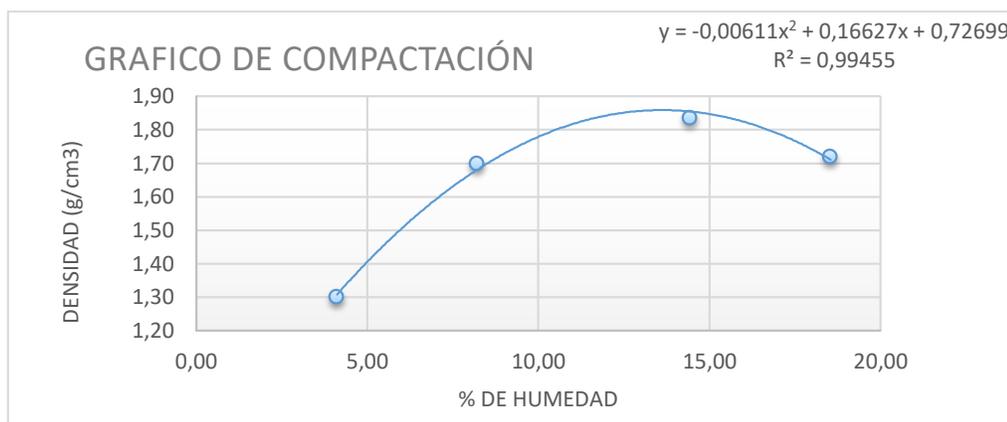
Tabla 15 Compactación punto1 Barrio San Mateo

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	5436,4	5894,7	6140,8	6082,1
Peso del molde	4160,0	4160,0	4160,0	4160,0
Peso suelo húmedo	1276,4	1734,7	1980,8	1922,1
Volumen de la muestra	943,0	943,0	943,0	943,0
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1,35	1,84	2,10	2,04
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	45,86	58,82	62,58	70,94
Peso suelo seco + cápsula	44,52	55,34	56,52	61,99
Peso del agua	1,34	3,48	6,06	8,95
Peso de la cápsula	12	13	14,5	13,7

Peso suelo seco	32,52	42,34	42,02	48,29
Contenido de humedad (%h)	4,12	8,21	14,43	18,54
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,30	1,70	1,84	1,72

Fuente: Elaboración propia

Figura 34 Compactación barrio San Mateo



Fuente: Elaboración Propia

Densidad Máxima	1,85	gr/cm³
Humedad Óptima	13,61	%

Tabla 16 Resumen de Dmaxsec y CHO para las 30 muestras

Numero	Barrio	Cho	Dmaxsec
1	San mateo	13,61	1,85
2	Miraflores	15,95	1,78
3	Los Chapacos	12,55	1,79
4	1ero de Mayo	14,19	1,81
5	Morros Blancos	12,88	1,8
6	Constructor	15,88	1,79
7	Andaluz	12,85	1,76
8	3 de Mayo	12,46	1,78
9	Simón Bolívar	13,23	1,77
10	Obrajes	13,79	1,76
11	Che Guevara	13,49	1,75

12	Tarijeños en Progreso.	13,86	1,79
13	San Blas	13,83	1,82
14	Artesanal	12,78	1,81
15	Frai Nicolai	12,51	1,86
16	Jardín	13,51	1,8
17	Catedral	12,04	1,84
18	San Antonio	15,97	1,76
19	San Pedro de Buena Vista	15,26	1,86
20	Los Álamos	15,41	1,77
21	Juan Pablo Segundo	12,61	1,79
22	Temporal	12,26	1,8
23	Pedro Antonio Flores	11,77	1,85
24	San Jorge 1	15,81	1,76
25	Andalucía	15,17	1,79
26	Chura Primavera	13,35	1,85
27	Integración	15,5	1,75
28	Las Palmas	15,7	1,75
29	19 de Marzo	15,2	1,76
30	San Jorge 2	14	1,84

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV
CORRELACIÓN Y
ANÁLISIS DE
RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Datos obtenidos en laboratorio.

Según las practicas realizadas en laboratorio se obtuvo los siguientes datos de granulometría, limite líquido, limite plástico y compactación, de 30 barrios de la provincia cercado.

Tabla 17 Resumen de datos obtenidos en laboratorio

Numero	Ll	lp	Cho	Dmaxsec
1	21,28	13,36	13,61	1,85
2	30,1	20,26	15,95	1,78
3	29,45	19,44	12,55	1,79
4	21,13	12,28	14,19	1,81
5	22,02	13,2	12,88	1,8
6	29,14	18,49	15,88	1,79
7	20,05	12,39	12,85	1,76
8	29,13	20,3	12,46	1,78
9	26,93	15,98	13,23	1,77
10	27,01	18,89	13,79	1,76
11	23,81	16,78	13,49	1,75
12	29,76	18,44	13,86	1,79
13	22,4	13,6	13,83	1,82
14	22,14	14,3	12,78	1,81
15	20	12,5	12,51	1,86
16	24,82	15,59	13,51	1,8
17	21,1	11,66	12,04	1,84
18	31,87	19,82	15,97	1,76
19	28,09	17,61	15,26	1,86
20	30,11	18,56	15,41	1,77
21	22,18	14,29	12,61	1,79
22	21,62	12,77	12,26	1,8
23	20,82	12,99	11,77	1,85
24	29,48	20,59	15,81	1,76
25	26,13	12,4	15,17	1,79
26	22,53	13,45	13,35	1,85
27	30,34	20,88	15,5	1,75
28	30,22	20,28	15,7	1,75
29	30,32	20,59	15,2	1,76
30	28,56	18,72	14	1,84

Fuente: Elaboración propia

4.2 Pruebas de normalidad.

Esta prueba es realizada para ver si las variables son o no paramétricas, esto servirá para ver con cual coeficiente de correlación trabajar si es Pearson o Spearman.

Prueba de normalidad para la variable limite liquido

Tabla 18 Prueba de normalidad para la variable limite liquido

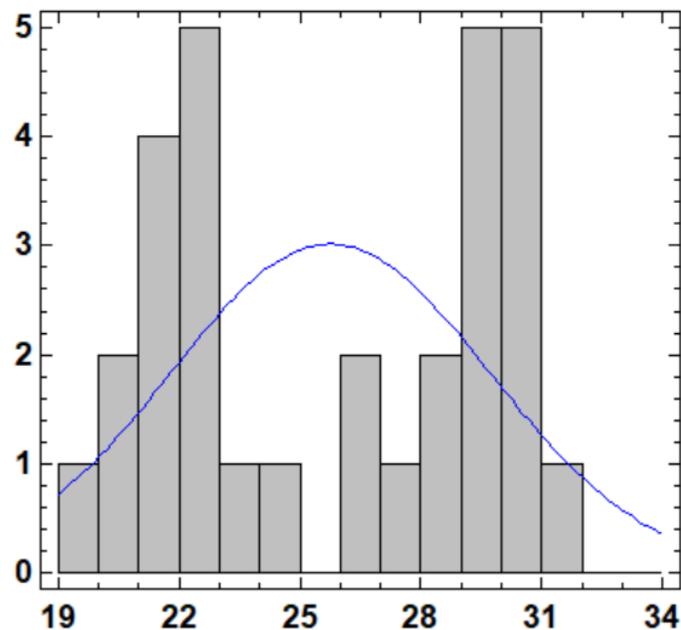
Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,872192	0,00161177

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Debido a que la cantidad de muestras es menor a 50 e realiza la prueba de normalidad mediante Shapiro-Wilk.

Debido a que el valor-P es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que LL proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 19 Histograma-limite liquido



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Como se puede ver en el histograma representado gráficamente los datos de limite liquido no presentan una distribución normal.

Prueba de normalidad para la variable limite plástico.

Tabla 20 Prueba de normalidad para la variable limite plástico

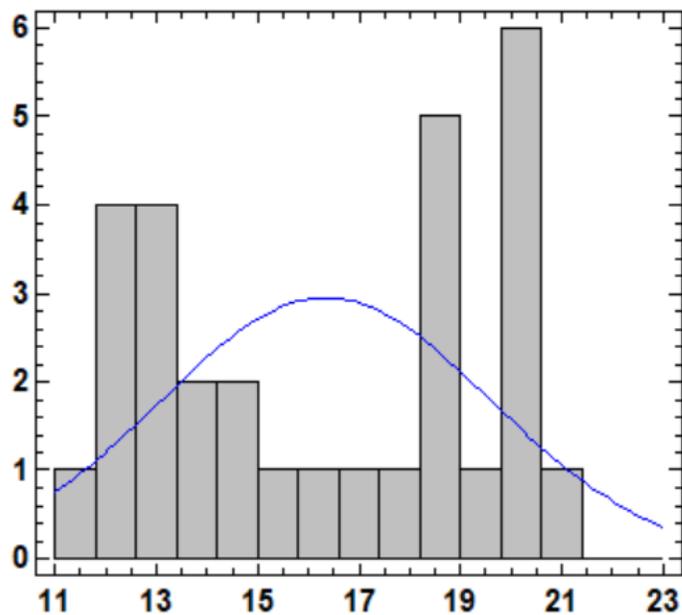
Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,873199	0,00171055

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Esta tabla muestra los resultados de diversas pruebas realizadas para determinar si LP puede modelarse adecuadamente con una distribución normal. La prueba de Shapiro-Wilk es utilizada para muestras menores 50.

Debido a que el valor-P más pequeño de las pruebas realizadas es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que LP proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Figura 35 Histograma-limite Plástico



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Como se puede ver en el histograma representado gráficamente los datos de Limite Plástico no presentan una distribución normal.

Prueba de normalidad para la densidad máxima seca

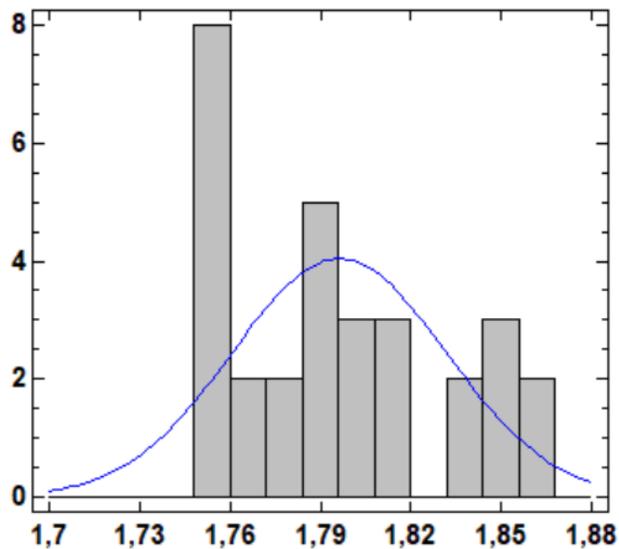
Tabla 21 Prueba de normalidad-densidad máxima seca

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,905851	0,0124629

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Debido a que el valor P es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que Dmaxsec proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Figura 36 Histograma-densidad máxima seca



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Como se puede ver en el histograma representado gráficamente los datos de densidad máxima seca no presentan una distribución normal.

Prueba de normalidad para contenido de humedad optimo

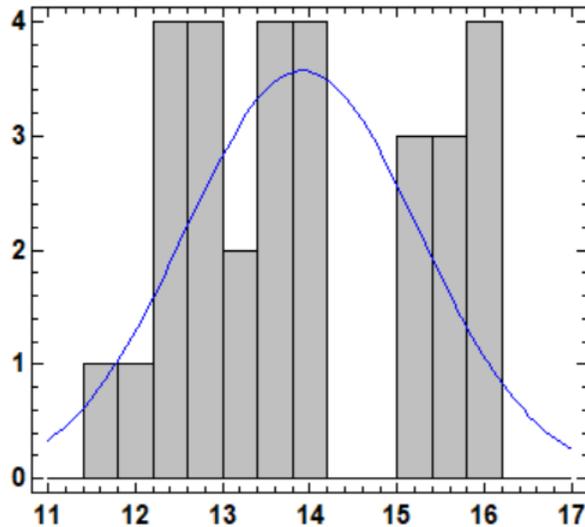
Tabla 22 Prueba de normalidad-contenido de humedad optimo

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,905851	0,0124629

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Debido a que el valor-P es menor a 0,05, se puede rechazar la idea de que CHO proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Figura 37 Histograma-densidad máxima seca



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Como se puede ver en el histograma representado gráficamente los datos de contenido de humedad optimo no presentan una distribución normal.

4.3 Correlación de variables.

4.3.1 Correlación simple entre densidad máxima seca vs limite liquido

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos.

De los modelos ajustados, el modelo inversa-Y cuadrado-X es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 29,59%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

Tabla 23 Modelos ajustados a los datos Dmaxsec vs LL

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	0,5439	29,59%
Log-Y Cuadrado-X	-0,5431	29,49%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0,5426	29,44%
Inversa de Y	0,5425	29,43%
Cuadrado de X	-0,5421	29,39%
Exponencial	-0,5418	29,35%

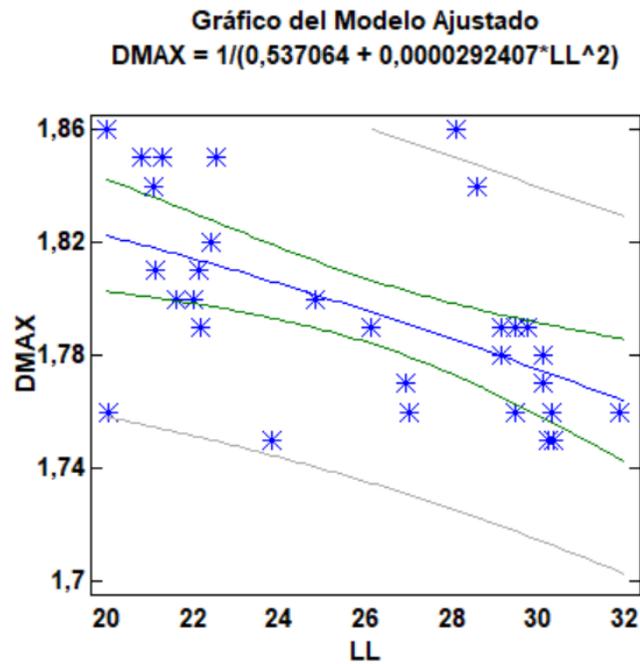
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	0,5416	29,33%
Raíz Cuadrada de Y	-0,5414	29,31%
Cuadrado Doble	-0,5412	29,29%
Lineal	-0,5410	29,27%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0,5409	29,26%
Raíz Cuadrada Doble	-0,5406	29,22%
Inversa-Y Log-X	0,5405	29,22%
Raíz Cuadrada de X	-0,5402	29,18%
Cuadrado de Y	-0,5401	29,17%
Multiplicativa	-0,5399	29,15%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0,5396	29,11%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0,5394	29,09%
Logaritmo de X	-0,5392	29,08%
Cuadrado-Y Log-X	-0,5385	29,00%
Doble Inverso	-0,5378	28,92%
Curva S	0,5373	28,87%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0,5371	28,84%
Inversa de X	0,5368	28,81%
Cuadrado-Y Inversa de X	0,5362	28,75%
Logístico	<sin ajuste>	

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Variable dependiente: Dmaxsec

Variable independiente: LL

Figura 38 Modelo ajustado Dmaxsec vs LL



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Tabla 24 Valores de coeficientes para la ecuación Dmax sec vs LL

	Estimado	Error	Valor-P
Coefficiente 1	0,537064	0,00602913	0,0000
Coefficiente 2	0,0000292407	0,0000085252	0,0019

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Coefficiente de Correlación = 0,5439

R-cuadrada = 29,585 porciento

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$Dmaxsec = \frac{1}{0,537064 + 0,0000292407 * LL^2}$$

Donde:

Dmaxsec = Densidad máxima seca

LL = Limite liquido

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Dmaxsec y LL con un nivel de confianza del 95,0%.

El coeficiente de determinación r^2 indica que el modelo ajustado explica 29,585% de la variabilidad en Dmaxsec. El coeficiente de correlación es igual a 0,5439, indicando una relación positiva considerable entre las variables.

4.3.2 Correlación simple entre densidad máxima seca vs limite plástico.

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos.

De los modelos ajustados, el modelo Y-inversa X-cuadrada es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 33,99%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

Tabla 25 Modelos ajustados a los datos Dmaxsec vs LP

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Inversa-Y Cuadrado-X	0,5830	33,99%
Log-Y Cuadrado-X	-0,5812	33,78%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	-0,5802	33,67%
Cuadrado de X	-0,5793	33,56%
Cuadrado Doble	-0,5773	33,33%
Inversa de Y	0,5772	33,32%
Exponencial	-0,5754	33,11%
Raíz Cuadrada de Y	-0,5745	33,01%
Inversa-Y Raíz Cuadrada- X	0,5737	32,91%
Lineal	-0,5736	32,90%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	-0,5719	32,71%
Cuadrado de Y	-0,5717	32,68%
Raíz Cuadrada Doble	-0,5710	32,61%
Raíz Cuadrada de X	-0,5701	32,51%
Inversa-Y Log-X	0,5697	32,46%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	-0,5683	32,30%
Multiplicativa	-0,5680	32,27%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	-0,5672	32,17%
Logaritmo de X	-0,5663	32,07%
Cuadrado-Y Log-X	-0,5645	31,86%
Doble Inverso	-0,5607	31,43%
Curva S	0,5591	31,26%

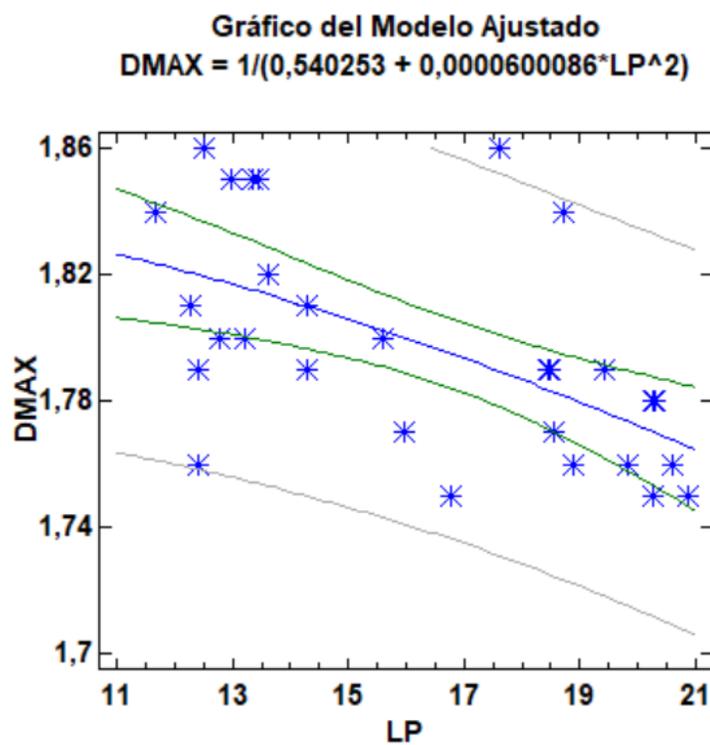
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	0,5582	31,16%
Inversa de X	0,5574	31,07%
Cuadrado-Y Inversa de X	0,5557	30,88%
Logístico	<sin ajuste>	

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Variable dependiente: Dmaxsec

Variable independiente: LP

Figura 39 Modelo ajustado Dmaxsec vs LP



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Figura 40 Valores de coeficientes para la ecuación Dmaxsec vs LP

	Estimado	Error	Valor-P
Coefficiente 1	0,540253	0,00468399	0,0000
Coefficiente 2	0,0000600086	0,0000158025	0,0007

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Coefficiente de Correlación = 0,5830

R-cuadrada = 33,99%.

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$D_{maxsec} = \frac{1}{0,540253 + 0,0000600086 * LP^2}$$

Donde:

Dmaxsec = Densidad máxima seca

LP = Limite plástico

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Dmaxsec y LL con un nivel de confianza del 95,0%.

El coeficiente de determinación r² indica que el modelo ajustado explica 33,99% de la variabilidad en Dmaxsec. El coeficiente de correlación es igual a 0,5830, indicando una relación positiva considerable entre las variables.

4.3.3 Correlación simple entre contenido de humedad óptimo vs LL

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo Cuadrado doble es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 53,62%. Este es el modelo actualmente seleccionado.

Tabla 26 Modelos que se ajustan a los datos contenido de humedad óptimo vs LL

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0,7323	53,62%
Cuadrado de X	0,7284	53,05%
Cuadrado de Y	0,7281	53,01%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,7260	52,71%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,7255	52,64%
Lineal	0,7250	52,57%
Log-Y Cuadrado-X	0,7234	52,33%
Raíz Cuadrada de Y	0,7231	52,29%

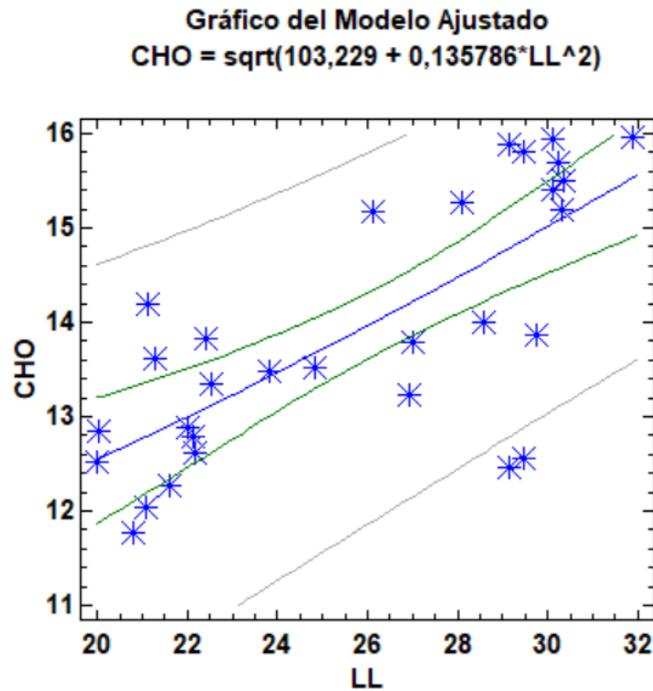
Raíz Cuadrada de X	0,7229	52,27%
Cuadrado-Y Log-X	0,7227	52,23%
Raíz Cuadrada Doble	0,7213	52,02%
Exponencial	0,7209	51,98%
Logaritmo de X	0,7206	51,92%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,7193	51,74%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,7191	51,71%
Multiplicativa	0,7174	51,46%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,7173	51,45%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,7163	51,30%
Inversa de Y	-0,7157	51,23%
Inversa de X	-0,7150	51,12%
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,7146	51,06%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,7140	50,98%
Inversa-Y Log-X	-0,7131	50,85%
Curva S	-0,7127	50,79%
Doble Inverso	0,7093	50,32%

Fuente: statgraphis

Variable dependiente: CHO

Variable independiente: LL

Figura 41 Modelo ajustado CHO vs LL



Fuente: Elaboración Software statgraphis

Tabla 27 Coeficientes para la ecuación contenido de humedad optimo vs limite liquido

	Estimado	Error	Valor-P
Constante 1	103,229	16,8785	0,0000
Constante 2	0,135786	0,0238662	0,0000

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Coefficiente de Correlación = -0,7323

R-cuadrada = 53,62 por ciento

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$CHO = \sqrt{103,229 + 0,135786 * LL^2}$$

Donde:

CHO = Contenido de humedad optimo

LL = Limite liquido

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre Dmaxsec y LL con un nivel de confianza del 95,0%.

El coeficiente de determinación r^2 indica que el modelo ajustado explica 53,62% de la variabilidad en Dmaxsec. El coeficiente de correlación es igual a -0,7323, indicando una relación negativa considerable entre las variables.

4.3.4 Correlación simple entre contenido de humedad optimo vs limite plástico

Esta tabla muestra los resultados de ajustar varios modelos curvilíneos a los datos. De los modelos ajustados, el modelo cuadrado doble es el que arroja el valor más alto de R-Cuadrada con 40,11%.

Tabla 28 Modelos ajustados a los datos de CHO vs LP

Modelo	Correlación	R-Cuadrada
Cuadrado Doble	0,6333	40,11%
Cuadrado de X	0,6292	39,59%
Cuadrado de Y	0,6274	39,36%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,6268	39,29%
Lineal	0,6242	38,97%
Log-Y Cuadrado-X	0,6242	38,96%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,6234	38,87%
Raíz Cuadrada de Y	0,6224	38,73%
Raíz Cuadrada de X	0,6208	38,54%
Exponencial	0,6203	38,48%
Raíz Cuadrada Doble	0,6192	38,34%
Cuadrado-Y Log-X	0,6189	38,30%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,6184	38,24%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,6174	38,12%
Logaritmo de X	0,6168	38,04%
Inversa de Y	-0,6156	37,90%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,6155	37,88%
Multiplicativa	0,6140	37,70%

Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	-0,6133	37,62%
Inversa-Y Log-X	-0,6104	37,26%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,6080	36,97%
Inversa de X	-0,6070	36,84%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,6062	36,75%
Curva S	-0,6053	36,64%
Doble Inverso	0,6029	36,35%

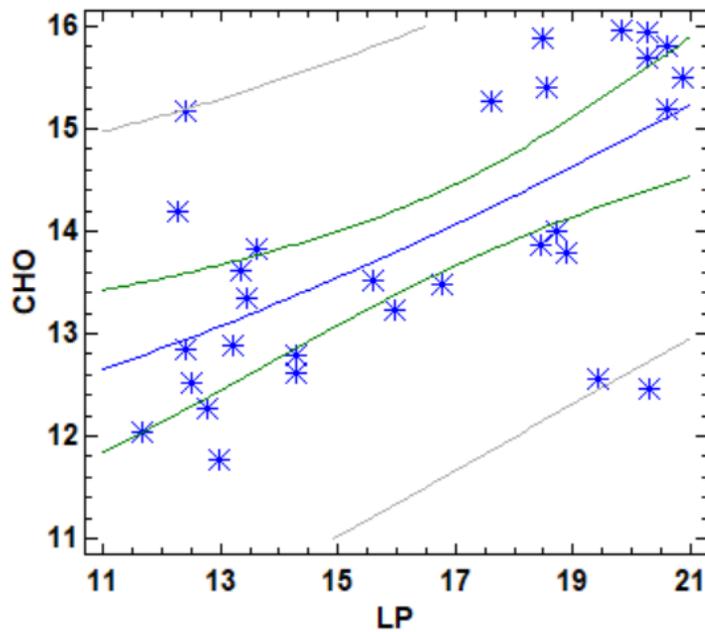
Fuente: statgraphis

Variable dependiente: CHO

Variable independiente: LP

Figura 42 Modelo ajustado CHO vs LP

Gráfico del Modelo Ajustado
 $CHO = \text{sqrt}(132,966 + 0,224852 \cdot LP^2)$



Fuente: statgraphis

Tabla 29 Coeficientes para la ecuación de CHO vs LP

	Estimado	Error	Valor-P
Constante 1	132,966	15,3898	0,0000
Constante 2	0,224852	0,0519208	0,0002

Fuente: Elaboración Software Statgraphis

Coefficiente de Correlación = 0,6333

R-cuadrada = 40,113 por ciento

La ecuación del modelo ajustado es la siguiente:

$$\text{CHO} = \sqrt{132,966 + 0,224852 * LP^2}$$

Donde:

CHO = Contenido de humedad optimo

LP = Limite plástico

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre CHO vs LP con un nivel de confianza del 95,0%.

El coeficiente de determinación r^2 indica que el modelo ajustado explica 40,113% de la variabilidad en Dmaxsec. El coeficiente de correlación es igual a 0,633, indicando una relación positiva considerable entre las variables.

4.3.5 Resultados obtenidos en el Statgraphis para una correlación simple entre Dmaxsec vs LL, LP y CHO vs LL, LP.

Según los datos introducidos al programa statgraphis se obtuvo los siguientes resultados para una correlación simple entre las variables analizada

Tabla 30 Resumen de resultados obtenidos por el programa Statgraphis para una correlación simple entre las variables analizadas

Tabla resumen entre correlación Dmaxsec vs LL, LP						
Variables	modelo ajustado	coeficiente de correlación	observación de correlación	R-cuadrada	nivel de significancia	observación de significancia
Dmaxsec vs LL	inversa-Y cuadrado-X	0,5439	Relación positiva considerable	29,59%	0,0019	existe una relación estadísticamente significativa entre variables.
Dmaxsec vs LP	inversa-Y cuadrado-X	0,583	Relación positiva considerable	33,99%	0,0007	existe una relación estadísticamente significativa entre variables.
Tabla Resumen de correlación entre CHO vs LL, LP						
Variables	modelo ajustado	coeficiente de correlación	observación de correlación	R-cuadrada	nivel de significancia	observación de significancia
CHO vs LL	cuadrado doble	0,7323	Relación positiva considerable	53,62%	0,0000	existe una relación estadísticamente significativa entre variables.
CHO vs LP	cuadrado doble	0,6333	Relación positiva considerable	40,11%	0,0002	existe una relación estadísticamente significativa entre variables.

Fuente: Elaboración propia

según los resultados obtenidos mediante una correlación simple entre las variables analizadas se logra concluir que el coeficiente de correlación más alto es el de las variables Dmaxsec (densidad máxima seca) vs LP (limite plástico) con un modelo ajustado de inversa-Y cuadrado-X cuya ecuación es la siguiente:

$$D_{maxsec} = \frac{1}{0,540253 + 0,000600086 * LP^2}$$

Según los resultados obtenidos mediante una correlación simple entre las variables analizadas se logra concluir que el coeficiente de correlación más alto es el de las variables CHO (contenido de humedad optimo) vs LL (limite liquido), con un modelo ajustado de inversa-Y cuadrado-X cuya ecuación es la siguiente:

$$CHO = \sqrt{103,229 + 0,135786 * LL^2}$$

4.4 Correlación múltiple

Para el mejor ajuste de datos se realiza una correlación múltiple en la cual se introducen la variable dependiente vs todas las variables independientes formando una sola ecuación.

4.4.1 Correlación múltiple Densidad máxima seca vs limite liquido "LL", limite plástico LP.

Tabla 31 Correlación múltiple Dmaxsec vs LL,LP,IP

Parámetro	Estimación	coeficiente de correlación	R cuadrada	Valor-P
Constante	1,92681			0,009
LL	- 0,00115721	0,5439	59,59%	
LP	- 0,00424499	0,7231	78,951%	

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Coefficiente de correlación= 0,7231

R-cuadrada = 78,9513 por ciento

En la tabla se muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Dmaxsec y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\mathbf{Dmaxsc = 1,90223 - 0,000425837 * LL - 0,0058075 * LP}$$

Donde:

Dmaxsec = Densidad máxima seca

LL = Limite liquido

LP = Limite plástico

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 78,9513% de la variabilidad en Dmaxsec, el coeficiente de correlación es igual a 0,723 indicando una correlación positiva considerable.

Correlación múltiple CHO vs LL,LP

Tabla 32 Correlación múltiple CHO vs LL,LP,IP

Parámetro	Estimación	coeficiente de correlación	R cuadrada	Valor-P
Constante	7,06574			0,0003
LL	0,369883	0,7323	53,62%	
LP	-0,163743	0,7531	73,674%	

Fuente: Elaboración Software statgraphis

Coefficiente de correlación = 0,7531

R-cuadrada = 73,674 por ciento

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre CHO y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{CHO} = 7,06574 + 0,369883 * \text{LL} - 0,163743 * \text{LP}$$

Donde:

CHO = Contenido de humedad optimo

LL = Limite liquido

LP = Limite plástico

Debido a que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 73,6744% de la variabilidad en CHO, el coeficiente de correlación es igual a 0,7531 lo que indica que hay una correlación positiva considerable entre variables.

4.5 Diagnóstico de la correlación.

Debido a que los coeficientes de correlación más altos se dieron mediante la correlación múltiple se utilizara estas ecuaciones para la validación de cada ecuación.

Los puntos que se utilizaron para la validación de datos, son de las siguientes coordenadas Geográficas visualizadas en la siguiente tabla.

Tabla 33 coordenadas geográficas de los puntos para la validación

Nro	Latitud	Longitud
1	21°31'01"S	64°43'28"O
2	21°30'56"S	64°43'26"O
3	21°30'58"S	64°43'04"O
4	21°30'57"S	64°43'54"O
5	21°31'01"S	64°43'51"O

Fuente: Elaboración propia

Cada muestra tiene que cumplir con los rangos establecidos para poder utilizar las ecuaciones.

Tabla 34 Rangos máximos y mínimos para la validación

Variables	Rangos	
	Máximo	Mínimo
limite liquido	31,87	20
limite plástico	20,88	11,66

Los datos obtenidos de los diferentes puntos para la validación son los siguientes:

Tabla 35 Datos de los puntos para la validación

Nro	LL	LP	Dmaxsec	CHO
1	20,39	13,36	1,8	13,21
2	29,75	18,19	1,79	15,79
3	29	17	1,76	14
4	28,18	19,22	1,79	14,75
5	20,52	12,57	1,82	12,77
Máximo	29,75	19,22	1,82	15,79
Mínimo	20,39	12,57	1,76	12,77

Fuente: Elaboración propia

4.5.1 Validación para la ecuación mediante correlación múltiple de datos observados vs datos predicho

Tabla 36 Validación de las ecuaciones Dmaxsec vs LL,LP y CHO vs LL,LP.

Nro	LL	LP	valores observados		valores predichos		Variación Dmaxsec	Variación CHO	% de Variación Dmaxsec	% de Variación Cho
			Dmaxsec	CHO	Dmaxsec	CHO pre.				
1	20,39	13,36	1,8	13,21	1,82	12,42	-0,016	0,790	0,89%	5,98%
2	29,75	18,19	1,79	15,79	1,78	15,09	0,006	0,699	0,34%	4,43%
3	29	17	1,76	14	1,79	15,01	-0,031	-1,009	1,77%	7,21%
4	28,18	19,22	1,79	14,75	1,78	14,34	0,011	0,408	0,64%	2,77%
5	20,52	12,57	1,82	12,77	1,82	12,60	0,000	0,173	0,03%	1,35%
			Coef. de correlación		0,7231	0,7531				
			Coef. de regresión		78,951%	73,674%				

Fuente: Elaboración propia

Según la tabla 4.5.1 podemos observar que la variación va entre $\pm 1,77\%$ para la Dmaxsec y $\pm 7,21\%$ para el CHO. Obteniendo un coeficiente de correlación positiva considerable.

4.6 Hipótesis de la investigación

Una comprobación de la hipótesis para la investigación se realizaría con el resultado del coeficiente de correlación de los datos de los Observados vs. Predicho.

Tabla 37 Interpretación del coeficiente de correlación

Valor de r (+/-)	Interpretación
+0,91 a +1	Correlación positiva perfecta
+0,76 a +0,90	Correlación positiva muy fuerte
+0,51 a 0,75	Correlación positiva considerable
+0,11 a +0,50	Correlación positiva media
+0,01 a +0,10	Correlación positiva débil
0,00	No existe correlación alguna entre variables
-0,01 a -0,10	Correlación negativa débil
-0,11 a -0,50	Correlación negativa media
-0,51 a 0,75	Correlación negativa considerable
-0,76 a -0,90	Correlación negativa muy fuerte
-0,91 a -1,00	Correlación negativa perfecta

Fuente: Metodología de la investigación 6ta edición

Coficiente de correlación densidad máxima seca vs LL, LP = 0,72

Coficiente de correlación contenido de humedad optimo vs LL, LP = 0,75

De acuerdo a la tabla, existe una correlación positiva considerable entre las variables analizadas de Dmaxsec vs LL, LP y una correlación positiva considerable entre CHO vs LL, LP.

Según lo analizado se determina que la hipótesis de la investigación no se llega a cumplir para las variables: CHO (contenido de humedad optimo) vs LL (limite liquido), LP (limite plástico). y Dmaxsec vs LL (limite liquido), LP (limite plástico) obteniendo una correlación positiva considerable entre variables y no así una correlación positiva muy fuerte.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se establece que las 30 muestras caracterizadas pertenecen a una clasificación CL lo cual indican que son suelos arcillosos de baja plasticidad.
- Se determina que los límites de Atterberg realizados mediante ensayos de laboratorio pertenecen a suelos CL.
- Se determina los valores de densidades máximas secas y humedades óptimas mediante los ensayos de laboratorio normados.
- Se establece que si existe una relación entre las variables analizadas de límites líquido y plástico con las densidades máximas secas y humedades óptimas dando como resultado coeficientes de correlación de 0,72 y 0,75 respectivamente.
- Se establece dos ecuaciones para estimar valores de densidades máximas secas y humedades óptimas las cuales son las siguientes:

$$D_{maxsc} = 1,90223 - 0,000425837 * LL - 0,0058075 * LP$$

$$CHO = 7,06574 + 0,369883 * LL - 0,163743 * LP$$

Ambas ecuaciones están en función de los límites de Atterberg

- Las ecuaciones que se establecen solo pueden ser utilizadas para suelos cohesivos de baja plasticidad pertenecientes a la ciudad de Tarija.
- Con los coeficientes de correlación obtenidos mediante el programa Statgraphics se establece que para la correlación múltiple entre D_{maxsc} vs LL y LP pertenece a una correlación positiva considerable y para la correlación entre el CHO vs LL y LP pertenece a una correlación positiva considerable.
- La ecuación solo predice los valores teóricos de las densidades máximas secas y humedades óptimas con un rango de confianza verificado durante los cálculos.

5.2 Recomendaciones

- Se debe visualizar bien los valores de los datos obtenidos de las variables analizadas al momento de transcribir los datos al programa ya que un dato no apropiado será fatal para el cálculo correspondiente de correlación.
- Se recomienda realizar la correlación simple primero y luego la correlación múltiple ya que así se establecerá cual coeficiente de correlación es el más apropiado.
- Se debe tener conocimiento sobre el tema de correlación ya que en el programa se debe interpretar de manera apropiada.
- Las ecuaciones determinadas solo sirven para arcillas de baja plasticidad las cuales entren dentro el rango establecido en el capítulo IV.