

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1.Antecedentes

Un método alternativo para el mejoramiento de la capacidad de soporte en suelos arcillosos, agregando un aditivo natural como producto innovador con mezclas de diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz, de esa manera encontrar el porcentaje más óptimo.

El comportamiento de las arcillas con presencia del agua viene siendo un problema con una importancia relevante en el momento de diseños o mejoramientos de vías, presentando cambios en su estructura, logrando reducir la vida útil de carreteras y exigiendo mantenimientos frecuentes.

El objetivo principal de esta investigación es analizar la viabilidad técnica de utilizar ceniza de rastrojo de maíz como estabilizador en suelos arcillosos, específicamente analizando su impacto en el índice de Capacidad de Soporte California (CBR). Este enfoque busca aprovechar un residuo orgánico abundante, mientras se potencian las propiedades mecánicas y estructurales de los suelos, promoviendo prácticas más sostenibles en la construcción de carreteras.

Se pretende aplicar a porcentajes de 10%, 15%, 20% y 25% de ceniza de rastrojo de maíz para obtener un resultado óptimo y así conocer cuánto se puede mejorar la capacidad portante de la arcilla, para ello se ha tomado como apoyo la investigación de Edwin Walter Hurtado Flores(2020) en su trabajo de investigación para obtener el título de ingeniero civil titulada” Uso de cenizas de rastrojo de maíz en las propiedades físicas-mecánicas de suelos arcillosos en la carretera Pasacancha-Andaymayo ”sustentada en la Universidad Cesar Vallejo -LIMA-PERU, lo cual obtuvo el porcentaje óptimo de la ceniza de rastrojo de maíz para estabilizar una subrasante natural, así poder referenciar los resultados de dicha investigación.

En caso de que se presenten resultados positivos en los ensayos esto será muy útil para lograr una reducción de las deformaciones en lugares con presencias de arcillas, tomando en cuenta que no afectaría al ambiente natural ya que serían químicos orgánicos.

1.2. Diseño teórico

1.2.1. Situación problemática

En el campo de la ingeniería, uno de los principales retos en la construcción de infraestructuras viales es garantizar la estabilidad y resistencia de las capas de subrasante, especialmente en regiones donde predominan los suelos arcillosos. Este es el caso de muchas zonas de la ciudad de Tarija, donde se encuentran suelos clasificados como CH (arcillas de alta plasticidad) y CL (arcillas de baja plasticidad), los cuales presentan propiedades desfavorables para ser utilizados directamente como soporte estructural.

Los suelos CH, debido a su alta plasticidad, tienden a retener grandes cantidades de agua, lo que provoca una disminución considerable de su resistencia al corte y su estabilidad estructural. En estado húmedo, estos suelos se comportan de manera blanda, pegajosa y poco firme, generando condiciones inadecuadas para la construcción de capas estructurales en carreteras. Esta condición se refleja directamente en los bajos valores de CBR obtenidos durante los ensayos de laboratorio, revelando una escasa capacidad de soporte sin la intervención de técnicas de mejoramiento.

En el caso de los suelos CL, aunque presentan menor plasticidad que los CH, comparten muchas de sus desventajas fundamentales: baja permeabilidad, alta capacidad de retención de agua y una tendencia a deformarse bajo carga prolongada. En los ensayos CBR, los suelos CL también muestran resultados insatisfactorios, lo que limita su uso como material estructural sin estabilización previa. Su comportamiento es altamente sensible a los cambios de humedad y presenta un riesgo significativo de asentamientos diferenciales y fisuración en estructuras superficiales.

Tanto en suelos CH como CL, los problemas se agravan al considerar su comportamiento en estado natural, sin compactación. Los valores bajos de CBR implican que estos suelos no cumplen con los requisitos mínimos para servir como subrasantes estables en carreteras u otras obras civiles.

La falta de estabilidad mecánica de estos suelos, sumada a su comportamiento expansivo y a su pobre resistencia inicial, representa un obstáculo significativo para los proyectos de infraestructura rural. Esta problemática exige un análisis riguroso de alternativas para su

evaluación y posible mejoramiento, considerando tanto los costos como la disponibilidad de recursos locales. Sin embargo, mientras no se implementen dichas alternativas, los suelos CH y CL seguirán representando un desafío para la construcción segura, económica y sostenible de caminos rurales.

1.2.2. Problema

¿De qué manera influye la ceniza de rastrojo de maíz como aditivo estabilizante en prueba de CBR en suelos arcillosos tipo CH y CL aplicada a subrasantes?

1.2.3. Relevancia y factibilidad del problema

La relevancia de este problema radica en la necesidad de encontrar soluciones efectivas para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos, especialmente cuando se aplican a subrasantes en la construcción de carreteras u otras infraestructuras. Los suelos arcillosos pueden presentar problemas como la expansión y contracción debido a cambios en la humedad, lo que puede causar daños a las estructuras sobre ellos. Utilizar ceniza de rastro de maíz como adición estabilizante podría ser una opción prometedora, ya que puede ayudar a mejorar la estabilidad, la resistencia y la capacidad portante del suelo, reduciendo así los costos de mantenimiento y prolongando la vida útil de las carreteras u otras obras civiles.

La factibilidad del uso de ceniza de rastro de maíz como estabilizante en suelos arcillosos dependerá de varios factores, como la disponibilidad y costo de la ceniza, la cantidad adecuada para obtener los resultados deseados, los efectos sobre el medio ambiente y la viabilidad económica en comparación con otras técnicas de estabilización disponibles. Se necesitarían estudios específicos de laboratorio y campo para evaluar la eficacia y la viabilidad de esta técnica en diferentes condiciones y contextos geográficos. Sin embargo, dada la naturaleza renovable y potencialmente económica de la ceniza de rastro de maíz, podría ofrecer una solución prometedora para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos en subrasantes.

1.2.4. Delimitación temporal y espacial de la investigación

Delimitación temporal

La delimitación temporal de la investigación puede abarcar un período específico que incluya la recolección de datos, pruebas de laboratorio, y posiblemente estudios de campo para evaluar la efectividad de la ceniza de rastro de maíz como adición estabilizante en suelos arcillosos aplicados a subrasantes. Este período puede variar dependiendo de la duración del proyecto de investigación y la disponibilidad de recursos.

Espacial de la investigación

Este proyecto perteneciente al área de mecánica de suelos será desarrollado y analizado en la ciudad de Tarija provincia Cercado en el laboratorio de suelos e instalaciones de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho zona el Tejar y con material extraído de dos zonas de la ciudad como ser los barrios de Constructor y Fray Quebracho; dicho proyecto se aplicará a los trabajos de investigación en la deformación de suelos.

1.2.5. Justificación

Esta investigación se argumenta en los siguientes aspectos como social, económico y ambiental.

Justificación social se utilizó este material con el fin que se mejore la calidad aplicando en porcentajes de fibras en los suelos para mejorar su comportamiento, las fallas y las características de los suelos inestables ya que las cenizas rastrojo de maíz contiene un gran porcentaje de sílice.

Justificación económica se buscó la manera de beneficiar al sector constructivo y las comunidades utilizando este material como un costo módico ya que se encuentra en la misma localidad

Por último, justificación ambiental es muy esencial, ya que en este evalúa los posibles problemas que podrán causar en efecto a la naturaleza, lo cual se utilizó las cenizas de

rastrojos de maíz para la mejora de las carreteras pobres que tengan una baja capacidad portante, ya que estos productos desperdician en los botaderos o son también quemados, por esta razón generó un menor impacto ambiental.

Se justifica que el uso de las cenizas de rastrojo de maíz como aditivo estabilizante dieron buenos resultados que fue realizado por el estudiante Hurtado Flores Edwin Walter de la universidad Cesar Vallegos LIMA – PERU tuvo como resultados que el uso de cenizas de rastrojo de maíz permite disminuir a un 9.970% índice de plasticidad y en el ensayo de Proctor modificado aumento la máxima densidad seca a un 1.85 gr/cm³ con un balance 9.44% de optima humedad, y cuanto la capacidad portante aumento alcanzando 14.704% de CBR, con la adición de 21% de cenizas a la muestra natural.

1.2.6. Objetivos

1.2.6.1. Objetivo general

Analizar el efecto de la incorporación de distintos porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz como aditivo estabilizante en suelos arcillosos de tipo CH y CL, mediante ensayos de CBR, para determinar su viabilidad en el mejoramiento de la capacidad de soporte de estos suelos.

1.2.6.2. Objetivos específicos

- Recolectar y clasificar muestras de suelos arcillosos tipo CH y CL.
- Determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo natural.
- Determinar la dosificación optima del uso de cenizas de rastrojo de maíz.
- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado con ceniza de rastrojo de maíz.
- Analizar los resultados obtenidos del suelo natural y del suelo mejorado.

1.2.7. Hipótesis

Mediante la adición de un porcentaje optimo de ceniza de rastrojo de maíz se conseguirá el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos tipo CH y CL aplicada a subrasantes.

1.2.8. Operacionalización de las variables

1.2.8.1. Variable independiente

Es el porcentaje de cenizas de rastrojo de maíz en las mezclas con el suelo arcilloso.

Tabla 1. Variable independiente

Variables	Definición operacional	dimensiones	Indicadores	Instrumento
(Variable independiente) Cenizas de rastrojo de maíz.	Evaluar la influencia de cenizas de rastrojo de maíz teniendo en cuenta los porcentajes que se adicionará al suelo, los cuales están en relación de 10%,15%,20% y 25%.	Dosificación de la fibra natural “ceniza de rastrojos de maíz”.	Aplicación 10% de cenizas en relación al peso de la muestra de suelo.	Experimento utilizando el porcentaje de cenizas de rastrojo de maíz al volumen de suelos.
			Aplicación 15% de cenizas en relación al peso de la muestra de suelo.	
			Aplicación 20% de cenizas en relación al peso de la muestra de suelo.	
			Aplicación 25% de cenizas en relación al peso de la muestra de suelo.	

Fuente: Elaboración propia

1.2.8.2. Variable dependiente

Combinación y dosificación óptima entre subrasantes arcillosas con ceniza de rastrojo de maíz.

Tabla 2. Variable dependiente

Variables	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
(Variable dependiente) Propiedades físicas - mecánicas de suelos arcillosos.	Para mejorar la propiedad de suelos se hará combinaciones con la ceniza de rastrojo de maíz y se analizará las variaciones que tendrán en cuanto el índice de plasticidad, máxima densidad seca y capacidad portante.	Índice de plasticidad.	Límite líquido.	Ensayos con limite atterberg.
			Límite plástico.	
		Máxima densidad seca.	Proctor modificado.	Ensayos con proctor modificado.
		Capacidad portante.	CBR (California Bearing Ratio).	Ensayos con CBR.

Fuente: Elaboración propia

1.2.9. Identificación del tipo de investigación

La investigación es de tipo causal /explicativo por lo cual está compuesta por dos variables la cantidad de ceniza de rastrojo de maíz, combinación y valor del CBR es evidente que una de ellas es la variable independiente y la otra dependiente por lo que se verifica que existe una relación de causalidad entre ellas, resta manipular la primera para comprobar con pruebas empíricas la otra.

1.3. Diseño metodológico

1.3.1. Unidades de estudio y decisión muestral

1.3.1.1. Unidad de estudio

La unidad de estudio se orienta principalmente en la estabilización suelos arcillosos aplicada en subrasantes y para poder realizarlo, se efectuará una estabilización química como aditivo estabilizante se utiliza la ceniza de rastrojo de maíz.

1.3.1.2. Población

En el presente trabajo de investigación se delimita la población a un suelo arcilloso que existe en la provincia Cercado-Tarija, en lugares que no esté pavimentado y que se puede evidenciar las características del suelo.

1.3.1.3. Muestra

En esta investigación usaremos suelos arcillosos de CH y CL que presentan deficiencia en su capacidad de carga, el cual se extrajo del barrio Fray Quebracho y barrio Constructor.

1.3.1.4. Selección de las técnicas de muestreo

El muestreo que fue seleccionado es el sistemático.

Tabla 3. Ensayos para muestreo

N	Ensayo
1	Contenido de Humedad.
2	Granulometría.
3	Límites de Atterberg.
4	Compactación.
5	Regulación de soporte de california CBR.

Fuente: elaboración propia

1.3.2. Métodos y técnicas empleadas

1.3.2.1. Métodos

El método que se empleó en la presente investigación es el empírico, donde se basa en la observación percibiendo el comportamiento de los experimentos realizados con el suelo natural, incorporando diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz.

1.3.2.2. Técnicas

Se basa en la investigación donde se realizar ensayos con diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz con el suelo natural, donde se evaluará límites de Atterberg,

compactación y CBR para su respectivo análisis de su comportamiento en suelos CH y CL.

1.4. Procesamiento de la información

Se realizará los ensayos de laboratorio para suelos naturales y suelo con ceniza de rastrojo de maíz, después de realizar la parte práctica de la investigación se realizará un estudio de gabinete, cuyos resultados un análisis.

1.5. Alcance de la investigación

El alcance de este proyecto de investigación es mejorar la capacidad de soporte en subrasante arcillosas utilizando como aditivo la ceniza de rastrojo de maíz.

Se realizará toda la aplicación práctica utilizando suelos arcillosos que constituye los grupos CL y CH.

Se comienza con la localización y extracción del material de diferentes zonas ubicadas en el departamento de Tarja los cuales deben cumplir con los requisitos de ser suelos arcillosos CH y CL por lo que se desarrollara una serie de ensayos para caracterizar cada componente, como ser las características del suelo para así descartar aquellos suelos que no cumplen con este requisito teniendo así 2 muestras de suelos.

Los ensayos que se realizara en laboratorio son los siguientes:

- Contenido de humedad.
- Análisis granulométrico (ASTM D422 AASHTO T88).
- Determinación limite líquido de Atterberg (límite líquido, límite plástico).
- Clasificación del suelo (SUCS, AASHTO).
- Proctor modificado (ASTM D-1557 y AASHTO T-180).
- Regulación de soporte de california CBR (ASTM D1883-99).

Se realizará los ensayos mencionados primeramente al suelo natural, para así obtener sus propiedades físicas y mecánicas; una vez que se verifique que el suelo es arcilloso se procederá a realizar los ensayos mencionados, excepto clasificación, pero con la adición de los 4 porcentajes de 10%,15%,20% y 25% de aditivo.

Finalmente se realizará los resultados de cada molde y se hará una comparación tanto del suelo natural como del suelo estabilizado, para establecer las conclusiones de todo el trabajo de investigación y las recomendaciones respectivas.

Ensayos con suelos naturales:

Suelo CL: Granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

Suelo CH: Granulometría, límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

Ensayos con porcentajes de aditivo

Suelo CL:

10%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

15%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

20%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

25%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

Suelo CH:

10%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

15%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

20%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

25%: Límites de Atterberg, Proctor modificado, CBR.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

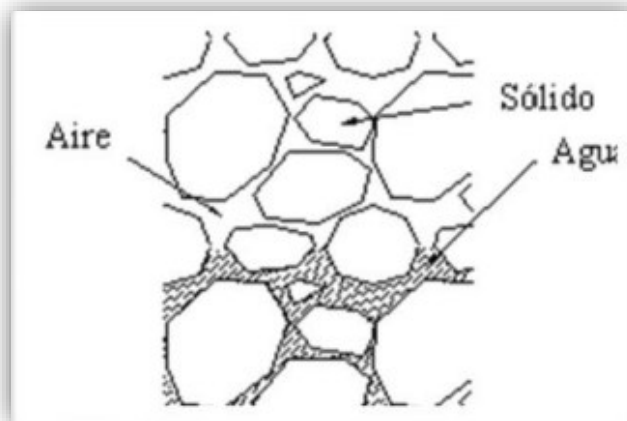
CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Definición de suelo

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por esto, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más.

Figura 1. Composición del suelo



Fuente: Proyecto y Apuntes Teóricos- Prácticos de Ingeniería Civil.

2.2. Suelos arcillosos

Las arcillas son cualquier sedimento o depósito mineral formado por partículas muy pequeñas cuyo tamaño es inferior a los 0,002mm, y que se componen principalmente de silicatos de aluminio hidratados. Se caracterizan por ser plásticas cuando se las humedecen y por la sonoridad y dureza al calentarla por encima de los 800°C. Como fue mencionado anteriormente, provienen de la alteración físico-química, por acción principalmente del agua, de minerales que forman parte de otras rocas preexistentes (feldespatos, piroxenos

y micas), surgiendo así los “minerales de la arcilla”, en función de que roca se altera y en qué grado. Cuando se refiere a la arcilla no se habla de un único material de composición simple, sino de uno muy diverso en origen y composición.

Muchos de los suelos arcillosos se hallan en zonas de alta precipitación, presentando deficiencias en el drenaje, este suelo se caracteriza por su alto contenido de agua y su baja resistencia in situ.

Los suelos arcillosos cuando experimentan cambios de humedad tienden a presentar cambios de volumen.

La constitución del suelo arcilloso es por los minerales activos como la montmorillonita en grandes proporciones y en pocas proporciones o casi nulas la clorita y la vermiculita. Y los minerales que no se consideran activas son las caolinitas y las illitas; éstos sin embargo, pueden contribuir a las propiedades expansivas de los suelos siempre y cuando se encuentren en cantidades apreciables. Existen propiedades físicas que influyen al cambio volumétrico y tienen incidencia tanto en sitio como en el laboratorio.

Su índice de plasticidad para característica de un suelo arcilloso.

Su peso específico varía entre los límites de 2,60 a 2,75 gramos por centímetro cúbico. Mientras más denso es el suelo es más solido; por lo tanto, presenta alta resistencia a la erosión. Su porosidad y humedad tienden a modificarse al incremento de la saturación, un suelo arcilloso puede pasar del estado sólido al líquido, debido al incremento de agua en su interior y provoca una disminución bruscamente de las fuerzas de cohesión apareciendo una fluidez de sus partículas. Los suelos arcillosos tienen una cohesión alta que va desde 0,25 kilogramos sobre centímetro cuadrado a 1,5 kilogramos sobre centímetro cuadrado, en ocasiones pasan el rango mencionado.

Tabla 4. Índice de Plasticidad para suelos

Índice de plasticidad	Características
IP>20	Suelos muy arcillosos.
20>IP>10	Suelos arcillosos.
10>IP>4	Suelos poco arcillosos.
IP=0	Suelos exentos de arcilla.

Fuente: Comunicaciones M. d., 2016

Tabla 5. Tamaño de partículas para diferentes materiales

Tipo de material	Tamaño de partículas
Grava	75mm-2mm.
Arena	Arena gruesa: 2mm-0.2mm.
	Arena fina: 0.2mm-0.05mm.
Limo	0.05mm-0.005mm.
Arcilla	Menor a 0.005mm.

Fuente: Comunicaciones M. d., 2016

2.2.1. Arcillas de Alta Plasticidad (CH)

Los suelos CH corresponden a arcillas inorgánicas con alta plasticidad, típicamente ricas en minerales como la montmorillonita. Estos suelos tienen una alta capacidad de retención de agua, lo que conlleva a una elevada expansividad y, por ende, a un comportamiento altamente compresible y deformable.

Las arcillas CH presentan una permeabilidad extremadamente baja, lo que limita el drenaje y prolonga los tiempos de consolidación. En proyectos de ingeniería, su presencia suele representar un reto debido a su comportamiento volumétrico variable, especialmente bajo condiciones climáticas cambiantes o cargas externas.

2.2.2. Arcillas de Baja Plasticidad (CL)

Los suelos clasificados como CL son arcillas inorgánicas con baja plasticidad, generalmente compuestas por minerales como la caolinita. Suelen tener una estructura granular más estable, presentan una menor capacidad de retención de agua y son menos susceptibles a cambios volumétricos. Por esta razón, los suelos CL tienden a mostrar un comportamiento más predecible bajo cargas mecánicas, lo que los hace relativamente favorables para la construcción.

Desde el punto de vista geotécnico, estos suelos exhiben una capacidad de carga moderada, baja expansividad y una permeabilidad relativamente baja. Sin embargo, pueden presentar problemas de consolidación lenta si se encuentran saturados.

2.2.3. Estructura de las arcillas

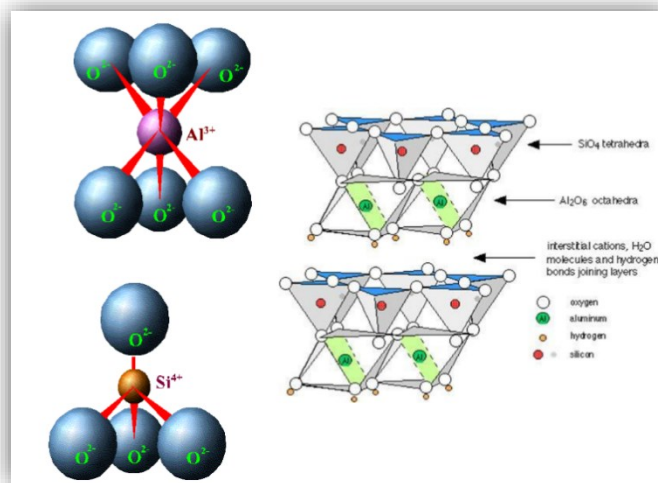
los minerales arcillosos son formados principalmente por la meteorización química de las rocas; es decir, que estos minerales son producto de la alteración de minerales preexistentes en la roca. Estos minerales son tan diminutos que sólo pueden ser vistos utilizando un microscopio electrónico.

Los principales elementos químicos constituyentes de estos minerales son átomos de: silicio, aluminio, hierro, magnesio, hidrógeno y oxígeno. Estos elementos atómicos se combinan formando estructuras atómicas básicas, que combinándose entre sí forman láminas, la que al agruparse forman estructuras laminares que finalmente al unirse por medio de un enlace forman un mineral de arcilla.

En ambos casos el metal con valencia positiva está situado en el interior, mientras que los iones no metálicos con valencia negativa forman el exterior.¹

Las estructuras laminares se forman cuando varias unidades atómicas básicas se enlazan covalentemente mediante los iones de oxígeno u oxidrilo. Entre las estructuras laminares se tiene la lámina tetraédrica y octaédrica.

Figura 2. Estructuras atómicas básicas de los minerales de arcilla



Fuente: ingenierocivilinfo, 2010

¹ (Whitlow, 1994)

2.2.4. Clasificación de las arcillas

Las arcillas se pueden clasificar de acuerdo con varios factores. Así, dependiendo del proceso geológico que las originó y a la ubicación del yacimiento en el que se encuentran, se pueden clasificar en:

- Arcilla primaria: se utiliza esta denominación cuando el yacimiento donde se encuentra es el mismo lugar en donde se originó. El caolín es la única arcilla primaria conocida.
- Arcillas secundarias: son las que se han desplazado después de su formación, por fuerzas físicas o químicas. Se encuentran entre ellas el caolín secundario, la arcilla refractaria, la arcilla de bola, el barro de superficie y el gres.

Si atendemos a la estructura de sus componentes, se distinguen las arcillas filitenses y las arcillas fibrosas.

También se pueden distinguir las arcillas de acuerdo a su plasticidad. Existen así las arcillas plásticas (como la caolinítica) y las poco plásticas (como la esméctica, que absorbe las grasas).

Por último, hay también las arcillas calcáreas, la arcilla con bloques (arcilla, grava y bloques de piedra de las morrenas), la arcilla de descalcificación y las arcillitas (esquistos arcillosos).

2.2.5. Suelos expansivos

Se llaman arcillas expansivas aquellas que presentan un gran cambio de volumen con la variación de la humedad. Estas se caracterizan por su elevado límite líquido (mayor a 40) y un alto índice de plasticidad (mayor a 15) como consecuencia de un alto contenido de minerales activos. Cuando se encuentran estos tipos de arcillas, es necesario efectuar pruebas de expansión y límites de consistencia, a fin de establecer el potencial expansivo de las mismas antes de emplazar cualquier obra sobre ellos.

En función de la proporción del material dominante en cada suelo, sus características estarán más o menos condicionadas por uno u otro material. Por ejemplo, cuando en un suelo la fracción condicionante es la de partículas arcillosas, sus propiedades físicas y mecánicas están dominadas por las características de estas partículas.

La clasificación de un suelo expansivo, se hace usualmente mediante el análisis de este comportamiento. Por ello se emplean para la identificación de suelos los ensayos en los que más influyen estas características, que indican casi de manera inequívoca el riesgo o la presencia de los fenómenos descritos.

Se denomina suelos expansivos aquellos que manifiestan, ante una modificación de su estado de humedad, un importante cambio de volumen como consecuencia de la generación de una tensión vertical en el seno de su estructura interna (tensión llamada de hinchamiento), estos suelos son generalmente todos los de grano fino (arcillas), que tienen la propiedad de incorporar moléculas de agua a su estructura.

Los suelos expansivos se caracterizan por tener el siguiente comportamiento físico y mecánico:

- Contracción de la arcilla debido al secado, mostrando grietas superficiales.
- Expansión de la arcilla al humedecerse.
- Tienen una consistencia pegajosa al ser mojados.
- Desarrollo de presiones de expansión cuando está confinada y no puede expandirse.
- Disminución de su resistencia al corte y de su capacidad de soporte al expandirse.
- Baja permeabilidad.

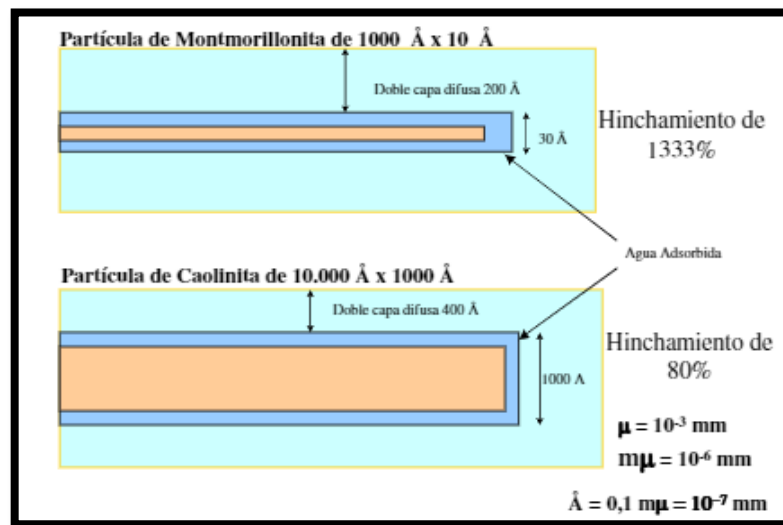
Al tratarse de suelos inestables ante la presencia del agua, requieren un tratamiento para su uso en la construcción. Dentro de las técnicas para modificar las propiedades expansivas del suelo podemos citar la estabilización química del mismo mediante el agregado de cal, cementos y sales, que modifican la plasticidad y la humedad principalmente.

Para mejorar el suelo existen diferentes técnicas y métodos y en caso de las arcillas expansivas están los siguientes:

- Estabilizar químicamente el suelo. Esto se logra alterando su composición mediante agregados de cal, cemento u otros aditivos químicos que reduzcan la capacidad de expansión y por tanto de retracción excesiva del suelo.

- Reemplazar el suelo expansivo. Se puede excavar para retirar el suelo no deseado y sustituir por otro material con mejores propiedades que se colocara compactado en reemplazo del suelo expansivo.
Este método generalmente es un tanto antieconómico cuando se trata de grandes volúmenes de suelo, por lo que es más aconsejado cuando el suelo que desea cambiarse es superficial y de reducido espesor.
- Drenar el suelo continuamente, utilizando drenantes. El inconveniente con este método es que es poco practicado y en exceso resulta económicamente costosa.
- Provocar la expansión antes de iniciar la obra, humedeciendo continuamente el suelo. Tiene el inconveniente de que los resultados son un tanto lentos y si posterior a la construcción sucede una época de sequía, se pueden producir asentamientos por retracción, lo que hace una solución poco confiable y no muy efectiva en obras como caminos.

Figura 3. Hinchamiento en arcillas



Fuente: Augusto José

2.2.5. Estructura laminar de las arcillas

Orientaciones paralelas de las láminas de arcillas, provocan una gran expansión al tomar contacto con el agua libre del terreno, tienen una menor relación de vacíos y es más compacta.

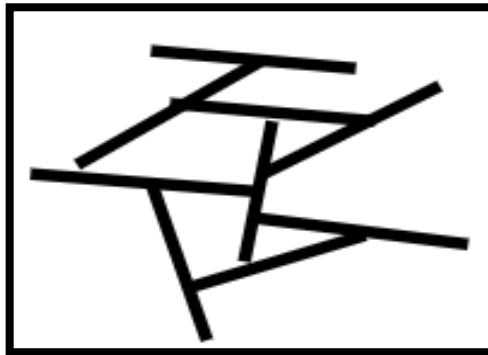
Figura 4. Orientación paralela de las arcillas



Fuente: Augusto José

Estructura panaloide, más abierta que la primera, con más relación de vacíos y que experimenta menos expansión de absorber agua libre.²

Figura 5. Estructura panaloide de las arcillas



Fuente: Augusto José

2.3. Estabilización de suelos

Llamamos estabilización de suelos al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.³

² <http://es.scribd.com/doc/53449679/4/Capacidad-de-adsorcion-de-las-arcillas>

³ (Mecánica de suelo en la ingeniería practica)

La estabilización persigue transformar los suelos de la traza que no reúnen las condiciones necesarias para su utilización como capas inferiores del paquete estructural, o carpetas de rodadura para vías con tráficos livianos, en materiales aptos para su uso. Para conseguirlo hay que recurrir a aditivos que modifiquen las propiedades de los suelos con dos fines principales: aumentar su capacidad portante y reducir su susceptibilidad al agua.⁴

Las propiedades más importantes que se deben mejorar con la estabilización son:⁵

- Resistencia. El incremento de resistencia aumenta la estabilidad y la capacidad de carga.
- Estabilidad del volumen. Proporciona el control de los procesos de hinchamiento-colapso causados por los cambios de humedad.
- Durabilidad. Una mayor durabilidad aumenta la resistencia a la erosión, responde de manera más eficaz a los cambios climáticos y al uso del tráfico.
- Permeabilidad. La reducción de la permeabilidad y por lo tanto de la circulación de agua, mejora la estabilidad.

2.3.1. Tipos de estabilización.

2.3.1.1. Estabilización física.

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como lo son:

Mezclas de suelos

Este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que le permite soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del paquete estructural de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino. Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable

⁴ (A.B.C. (2011))

⁵(Sherwood,1992)

en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.⁶

2.3.1.2. Estabilización química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso. Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal y cemento.

A. Estabilización con cal:

Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.

B. Estabilización con productos asfálticos:

Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

C. Estabilización con cloruro de sodio:

impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

D. Estabilización con cloruro de calcio:

Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

E. Estabilización con escorias de fundición:

Se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

F. Estabilización con polímeros:

Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

G. Estabilización con caucho de neumáticos:

Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

H. Estabilización con cenizas de bagazo caña de azúcar

⁶ (A.B.C. (2011))

Se define como un subproducto del reciclaje de la fabricación de azúcar y se usa como combustible para calentar las calderas de las fábricas, de tal manera ser usado como material puzolánico, que perfecciona las propiedades de los productos con los que se sustituye, además hay que conocer que la fibra de la caña de azúcar presenta un 40–50% de su volumen de toda la planta.⁷

I. Estabilización con cenizas de rastrojo de maíz

El uso de cenizas de rastrojo de maíz permite disminuir el índice de plasticidad en los suelos arcillosos y es muy económico.

La planta seca de maíz es rastrojo al ser carbonizado, obtiene un nivel de composición de caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3$, $\text{KCa}(\text{PO}_3)_3$; y sanidina ($\text{Na}, \text{K} \text{AlSi}_3\text{O}_8$); Las cenizas se obtienen de la quema de rastrojo de maíz, y para obtener la ceniza se queman los rastrojos en hornos al aire libre y que se va obteniendo la puzolana.⁸

Su composición química de las cenizas de rastrojos de maíz es el elemento más importante con el porcentaje de sílice en la ceniza, este producto es el que otorga la mayor capacidad puzolánicas.⁹

2.3.1.3. Estabilización mecánica.

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Compactación: esta mejora generalmente se hace en la sub-base, base y en las carpetas asfálticas.¹⁰

2.3.1.4. Estabilización mixta

La estabilización mixta (cal + cemento) es una opción muy interesante en la que primero, mediante un pequeño porcentaje de cal se logra mejorar la ligera plasticidad que puede presentar un material dejándolo en óptimas condiciones para, a continuación, tratarlo mejor con cemento. Aplicando este tipo de estabilización los porcentajes requeridos de conglomerante son menores, lo cual implica numerosas ventajas técnicas y económicas. También se puede recurrir a un tratamiento mixto en el caso de ejecutar capas tratadas con

⁷ Manterola H, Dina C, Mira J.

⁸ Galicia Pérez, M.A. y Velásquez Curo, M.A. (2016, pag.38)

⁹ Manterola. H, Dina. C, Mira. J.

¹⁰ (ABC(2011))

cemento en condiciones climatológicas adversas. En el caso de suelos con humedades excesivas, puede secarse previamente la capa mediante la aplicación de un pequeño porcentaje de cal viva que, además de reducir rápidamente la humedad, eleva la temperatura del material, lo cual favorece las posteriores reacciones de hidratación del cemento. Esto puede ser muy útil en la ejecución de obras durante los meses de invierno.

Hay que tener en cuenta que los suelos y materiales disponibles, en cada proyecto u obra, serán diversos. Por lo tanto, debe realizarse un estudio que analice todos los tipos de suelos y materiales susceptibles de ser estabilizados. Debido a ello, será frecuente que se tengan suelos aptos para cal, suelos aptos para cemento, y suelos aptos para estabilizaciones mixtas. Incluso, dentro de un mismo conglomerante, la dosificación requerida por cada tipo de material será distinta.

Esto, con las máquinas estabilizadoras de suelos disponibles en el mercado, no supone ningún problema, sino, al contrario, pues permite optimizar el empleo de los distintos tipos de materiales que tengamos disponibles, pudiéndolos emplear donde resulte más interesante. También se puede plantear el caso de que un mismo tipo de suelo interese estabilizarlo con cal o cemento, o con distintos porcentajes de alguno de ellos, en función del tipo de capas en que se vaya a emplear, como parte también de la optimización del movimiento de materiales a lograr en cualquier obra lineal.¹¹

La adecuada elección del conglomerante, o la combinación de conglomerantes, es un factor clave en el éxito.

2.4. Ensayos fundamentales para la caracterización

2.4.1. Determinación del contenido de humedad de un suelo

El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en

¹¹ ((ABC), 2011)

porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas Sólidas, o sea:¹²

$$w (\%) = \frac{W_w}{W_{ss}} * 100$$

Donde;

W=Contenido de humedad, en %.

Ww = Peso del agua presente en el suelo.

Wss = Peso del suelo después de secado al horno.

2.4.2. Determinación de la granulometría

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo.

Tabla 6. Escala granulométrica

Escala granulométrica	
Partícula	Tamaño
Arcillas	<0.002 mm.
Limos	0.002-0.06 mm.
Arenas	0.06-2 mm.
Gravas	2-60 mm.
Cantos rodados	60-250 mm.
Bloques	>250 mm.

Fuente : Texto guía de la Ing. Lura Karina Soto Salgado

Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de suelo, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños

¹² (texto guía de laboratorio)

y el porcentaje que se calcula está basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica, ya que de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande.¹³

Tabla 7. Abertura de tamices tamaños.

Tamices	Tamaño(mm)
1 ½	38.10.
1	25.40.
¾	19.05.
3/8	9.50.
Nº4	4.80.
Nº10	2.00.
Nº40	0.43.
Nº100	0.15.
Nº200	0.075.

Fuente: Texto guía de la Ing. Lura Karina Soto Salgado

Método del lavado

- Este método, se usa para el material que pasa el Tamiz Nº10, donde también se puede realizar con una representación menor del peso total. Esto quiere decir que se puede usar un peso de 300 gramos aproximadamente.
- La muestra se debe dejar reposar en agua hasta que esta sature completamente, logrando con el suelo una pasta suave, con características similares al barro o lodo. Generalmente se usa un tiempo de 24 horas o más, si es que se quiere un tiempo más corto utilizar 5 horas.
- Sin perder material se introduce la muestra en la malla Nº200, Luego con ayuda del agua se puede lavar el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

¹³ Texto guía de la Ing Lura Karina Soto Salgado

- Luego el material que se retiene en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo y proceder a tamizar por las mallas N°40 y N°200.
- Pesar el material retenido en cada malla dispuesta para el fino.
- De la misma manera se tiene que corregir los porcentajes que pasan de acuerdo a la formula mencionada en el párrafo anterior.

Figura 6. Método del lavado



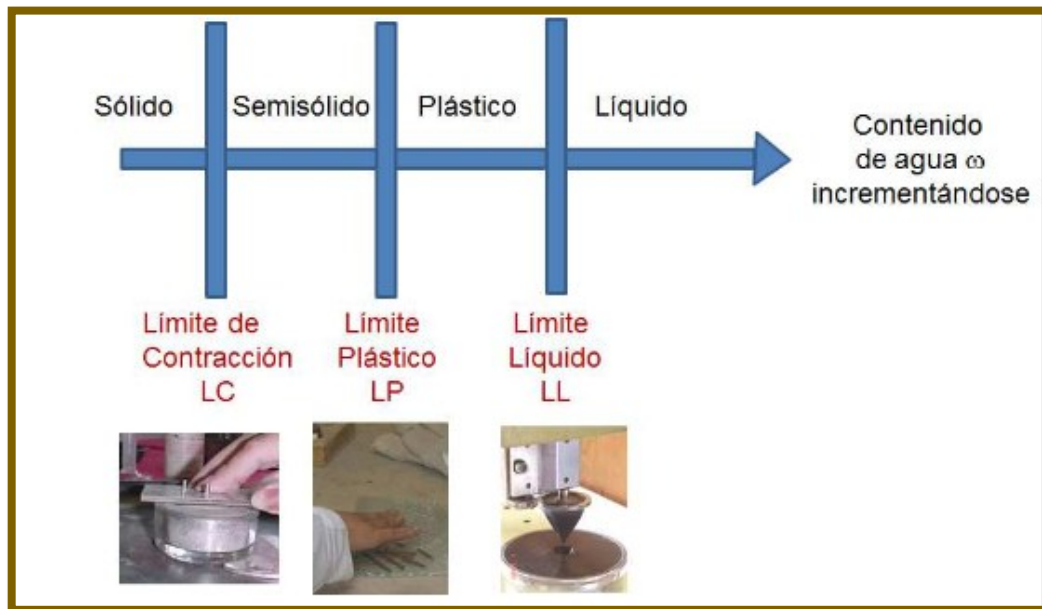
Fuente: Elaboración propia

2.4.2. Límites de Consistencia

Cuando un suelo tiene presencia de arcilla y un contenido de humedad favorable, el suelo puede ser removido sin derrumbarse, este fenómeno llamado consistencia del suelo trata de ser explicado por el científico Albert Mauritz Atterberg en 1900, cuando estableció un método para describir la consistencia de los suelos, mientras más contenido de humedad tenga, el suelo y el agua pueden fluir como un líquido y cuando menor sea el contenido de humedad el suelo tiende a ser quebradizo. Según el contenido de humedad del suelo se puede dividir en cuatro estados: sólido, semisólido, plástico y líquido.¹⁴

¹⁴ (Das, 2015, pág. 64)

Figura 7. Límites de Atterberg



Fuente: Elaboración propia

A medida que, el contenido de humedad aumenta en un suelo arcilloso, este podrá mejorar sus propiedades plásticas, se puede observar cuatro estados, de los cuales se tienen tres límites para cuantificar sus propiedades plásticas.¹⁵

a) Límite Líquido (LL)

“Se puede definir como límite líquido al porcentaje de humedad que contiene un suelo, bajo el cual, se comportará como un material plástico, sin embargo, a este punto el suelo está al límite de actuar como un fluido viscoso.”¹⁶

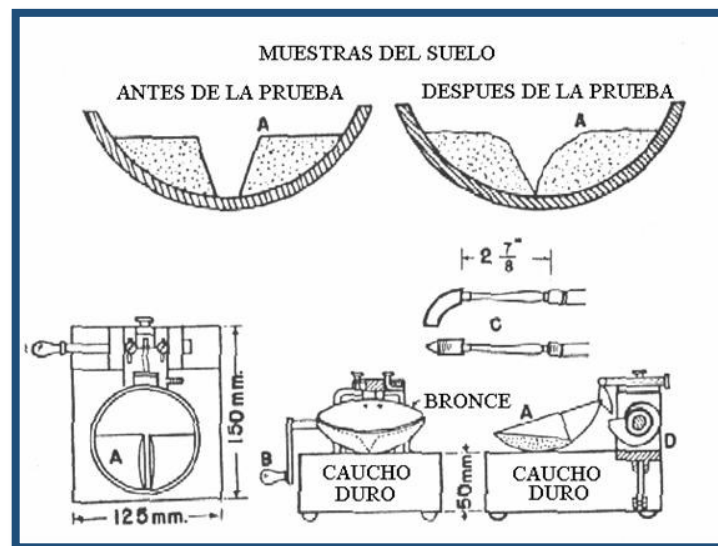
Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado en que una mezcla de suelo y agua, capaz de ser moldeada, se deposita en la Cuchara de Casagrande o Copa de Casagrande, y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre en una longitud de 12 mm (1/2"). Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco)

¹⁵ Límites de Atterberg [Imagen], DAS,2015.

¹⁶ (Bowles, 1981, pág. 16)

corresponde al límite líquido. Dado que no siempre es posible que el surco se cierre en la longitud de 12 mm exactamente con 25 golpes, existen dos métodos para determinar el límite líquido: - trazar una gráfica con el número de golpes en coordenadas logarítmicas, contra el contenido de humedad correspondiente, en coordenadas normales, e interpolar para la humedad correspondiente a 25 golpes. La humedad obtenida es el límite líquido. - según el método puntual, multiplicar por un factor (que depende del número de golpes) la humedad obtenida y obtener el límite líquido como el resultado de tal multiplicación.¹⁷

Figura 8. Ensayo para determinar el Límite líquido



Fuente: A.B.C. Geotechnical Consulting

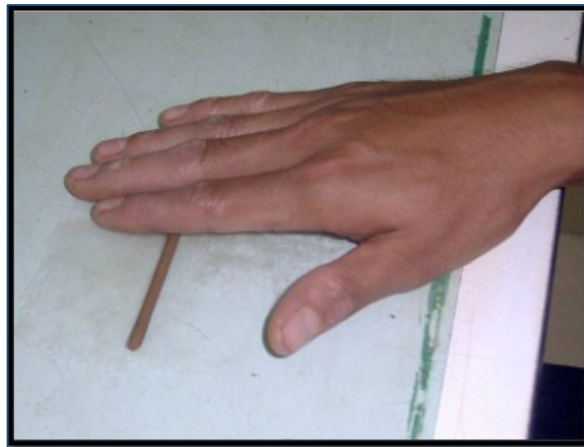
b) Límite plástico (LP)

Esta propiedad se mide en laboratorio mediante un procedimiento normalizado pero sencillo consistente en medir el contenido de humedad para el cual no es posible moldear un cilindro de suelo, con un diámetro de 3 mm. Para esto, se realiza una mezcla de agua y suelo, la cual se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente

¹⁷ Texto guía de la Ing Lura Karina Soto Salgado

un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad) o se vuelve pulverulento. Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpretación o medición.

Figura 9. Ensayo de Límite Plástico



Fuente: A.B.C. Geotechnical Consulting

c) Índice de Plasticidad (IP)

El índice de plasticidad es la diferencia del Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), y su resultado expresa la cantidad de arcilla que un suelo posee, un IP alto significa que el suelo es muy arcilloso, mientras un IP bajo significará que es suelo pobremente arcilloso.¹⁸

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de Plasticidad.

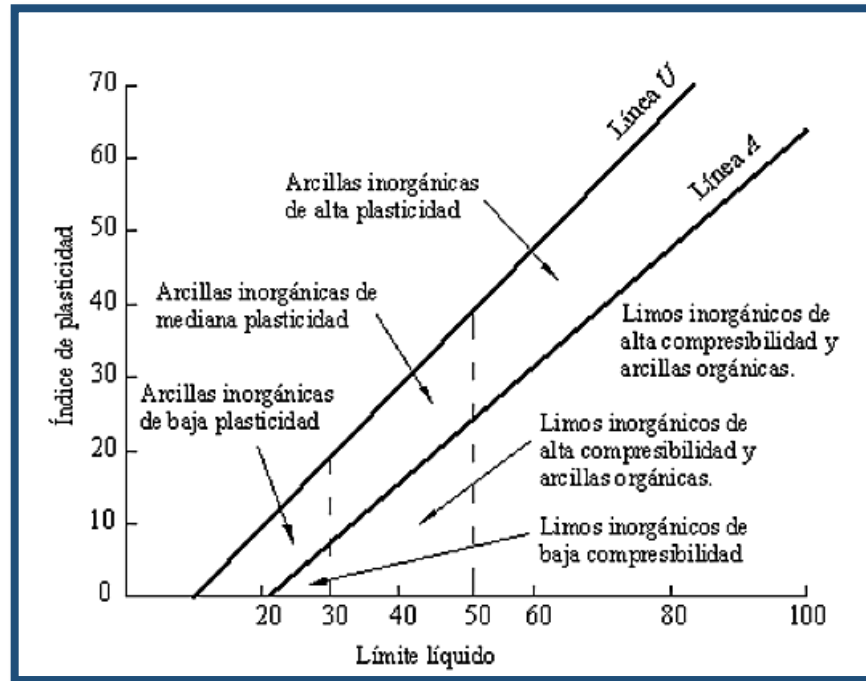
LL = Límite Líquido.

LP = Límite Plástico.

¹⁸ (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013)

Los resultados obtenidos se pueden interpretar en la tabla realizada por Casagrande (1932) y es de suma importancia para clasificar los suelos finos.

Figura 10. Carta de Plasticidad



Fuente: Tomado de Límites de Atterberg [Imagen], DAS, 2015

Nota. La carta de plasticidad permite determinar el IP (Índice Plástico) mediante los ensayos previos, que fueron cuantificados.

2.4.4. Clasificación de suelos

De acuerdo a las propiedades que posea un suelo, pueden ser clasificados en grupos y subgrupos, estas denominaciones que reciben no necesariamente tienen por fin tener una explicación detallada del suelo, más al contrario, buscan definir las principales características del suelo en un lenguaje común y entendible, actualmente hay dos sistemas de clasificación que son usados con frecuencia en Ingeniería Civil, uno de ellos es, American Association of State Highway Officials (AASHTO) y el segundo, Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), ambos clasifican según la granulometría y plasticidad del suelo.

2.4.4.1. Sistema de Clasificación AASHTO

El sistema de clasificación fue desarrollado en 1929 como el sistema de Clasificación de la oficina de Caminos Públicos y ha sufrido varias revisiones, con la versión actual propuesta por el Comité para la clasificación de Materiales para Sub-rasante y caminos Tipo Granulares del consejo de investigaciones Carreteras en 1945.

De acuerdo con este tipo, el suelo se clasifica en siete grupos mayores: A-1 al A-7. Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla N° 200. Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla N°200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

Grupo A-1: Son mezclas bien graduadas, compuestas por piedra, grava, arena y poco o casi nada de material fino, (denominado material ligante).

Subgrupo A – 1 – a: Es bien graduado, predomina la piedra y grava, casi no tiene ligante.

Subgrupo A – 1 – b: Es bien graduado, predomina las arenas gruesas, casi no tiene ligante. Estos materiales generalmente se encuentran en ríos y quebradas.

Grupo A – 2: Contiene menos del 35% de material fino.

Subgrupo A - 2 – 4 y A – 2 – 5: El contenido de material fino es menor o igual al 35%, la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta igual a los grupos A – 4 y A – 5 respectivamente. Son gravas y arenas (arenas gruesas), que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas, cuya plasticidad es baja, pero que excede al Grupo A – 1, también incluye la arena fina con limos no plásticos que se describirán en el grupo A – 3.

Subgrupo A - 2 – 6 y A – 2 – 7: La única diferencia de los anteriores, es que la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta en plasticidad igual a los grupos A – 5 y A – 7.

Grupo A – 3: Son arenas finas conteniendo limos no plásticos, algunas veces pueden contener poca grava y arena gruesa. Material limo arcillosos, más del 35% del total pasa el tamiz N°200.

Grupo A – 4: Son suelos limosos, poco o nada plásticos, puede contener más de un 75% del material que pasa el tamiz N° 200.

Grupo A – 5: Son muy similares al anterior, pero contiene un material micáceo, que hace que el límite líquido a veces sea elevado, además de aparecer una propiedad elástica rara en los suelos.

Grupo A – 6: Predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz N° 200, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

Grupo A – 7: Se parecen mucho al grupo A – 6. Pero estos tienen propiedades elásticas, además su límite líquido casi siempre es elevado.

Subgrupo A - 7 – 5: Sus índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupo A - 7 – 6: Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados seco y húmedo.

Índice de Grupo. Es un factor de evaluación, que determina la calidad del suelo a través de características similares en grupos de suelos, el índice de grupo es muy importante en el diseño de espesores, inclusive un método lleva el mismo nombre.

La siguiente fórmula determina el índice de grupo

$$IG = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd$$

Donde:

a = %pasa N°200 - 35% (Si %N°200>75, se anota 75, si es < 35, se anota 0).

b = %pasa N° 200 - 15% (Si %N°200>55, se anota 55, si es < 15, se anota 0).

c = Límite líquido - 40 % (Si LL>60, se anota 60, si es < 40, se anota 0).

d = Índice de plasticidad - 10% (Si IP>30, se anota 30, si es < 10, se anota 0).

Condicionando que cualquier factor que pudiere salir negativo, este se asume con el valor de cero. Los máximos valores del índice de grupo se encuentran en la tabla de clasificación.

Tabla 8. Clasificación de suelos según AASHTO

CLASIFICACIÓN	MATERIALES GRANULARES (35% O MENOS DEL TOTAL PASA EL TAMÍZ N° 200)							MATERIALES LIMO ARCILLOSOS (MAS DEL 35 % DEL TOTAL PASA EL TAMÍZ N° 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 A-7-6
Porcentaje de material que pasa el tamiz											
N° 10	50 máx.										
N° 40	30 máx.	50 máx.	51min								
N° 200	15 máx.	25 máx.	10máx	35máx	35máx	35máx	35máx	36min	36min	36min	36min
Características de la Fracción que pasa el tamiz N° 40											
LL:				40máx	41min	40máx	40min	40máx	41min	40máx	41min
IP:	6 máx		NP	10máx	10máx	11min	11min	10máx	10máx	11min	11min
Índice de grupo	0		0	0		4 máx		8 máx	12máx	16 máx	20máx

Fuente:Manual para el diseño de caminos no pavimentados de bajo volumen de tránsito

2.4.4.2. Sistema de clasificación SUCS

Fue Casagrande quien en 1942 ideó este sistema genérico de clasificación de suelos, que fue empleado por el Cuerpo de Ingenieros del ejército de los EE.UU. para la construcción de pistas de aterrizaje durante la II Guerra Mundial.

Diez años más tarde, y vista la gran utilidad de este sistema en Ingeniería Civil, fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, naciendo el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.

Dicha clasificación se vale de unos símbolos de grupo, consistentes en un prefijo que designa la composición del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades.

En el siguiente esquema se muestran dichos símbolos y su significación.¹⁹

¹⁹ (ABC., 2012)

Tabla 9. Prefijos y sufijos del suelo.

Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien Gradada	W
Arena	S	Mal gradada	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Limite Liquido alto (>50)	L
Turba	Pt	Limite Liquido bajo (<50)	H

Fuente: ABC. (2012)

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen uno y otro tipo de suelo:

Tabla 10. Combinaciones en función de los prefijos y sufijos del suelo

Símbolo	Características generales		
GW	Gravas (>50% en tamiz N 4 ASTM)	Limpias (Fino<5%)	Bien gradada
GP			Mal gradada
GM		Con finos (Finos >12%)	Componente Limoso
GC			Componentes arcillosos
SW	Arenas (<50% en tamiz N 4 ASTM)	Limpias (Finos <5%)	Bien gradada
SP			Mal gradada
SM		Con finos (Finos>12%)	Componente Limoso
SC			Componentes arcillosos
ML	Limos	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	Suelos orgánicos	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	Turva	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: ABC. (2012)

Como puede deducirse de la anterior Tabla, existe una clara distinción entre tres grandes grupos de suelos:

Suelos de grano grueso (G y S). Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, empleando el tamiz N° 200 ASTM ²⁰

Clasificación de las gravas

²⁰ (ABC., 2012)

Para el caso en que el contenido de finos sea menor al 5% y mayor al 12%, se pueden tener 4 posibles dobles símbolos:

GW-GM. Grava bien gradada con limo.

GW-GC. Grava bien gradada con arcilla.

GP-GM. Grava mal gradada con limo.

GP-GC. Grava mal gradada con arcilla.

Clasificación de las arenas

Se sigue un procedimiento análogo al de las gravas. Así, si la fracción fina es del 5% o menos, ésta ya no tiene influencia, pero si es mayor al 12%, la influencia es decisiva.

Nacen los grupos de arenas limpias y arenas sucias.²¹

SW-SM. Arena bien gradada con limo.

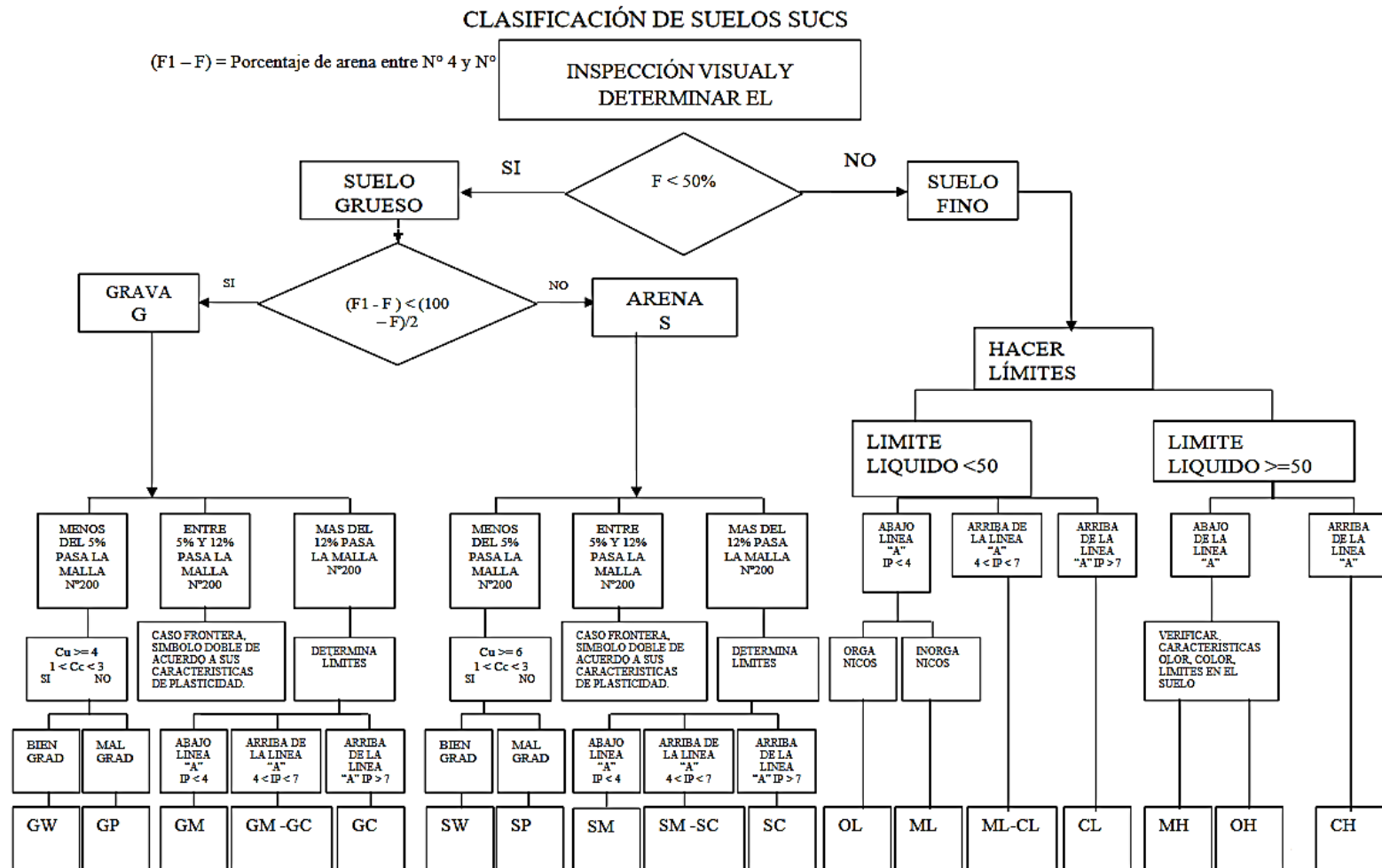
SW-SC. Arena bien gradada con arcilla.

SP-SM. Arena mal gradada con limo.

SP-SC. Arena mal grada con arcilla.

²¹ (ABC., 2012)

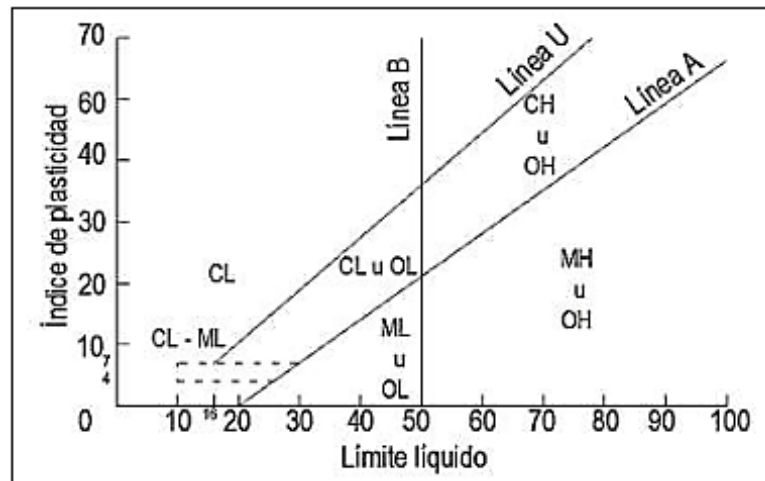
Figura 11. Clasificación de suelos SUCCS.



Fuente: ABC. (2012)

Clasificación de los suelos finos. La carta de plasticidad de Casagrande tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelos de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:²²

Figura 12. Carta de plasticidad Casagrande



Fuente: ABC. (2012)

2.4.5. Proctor modificado

La compactación de los suelos, es importante como medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos, no fue reconocida ampliamente sino hasta la aparición del rodillo pata de cabra en 1906. Sin embargo, fue hasta 1933, año en el que R. R. Proctor publicó sus investigaciones sobre este tema, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación.

²² (Sandino, 2015)

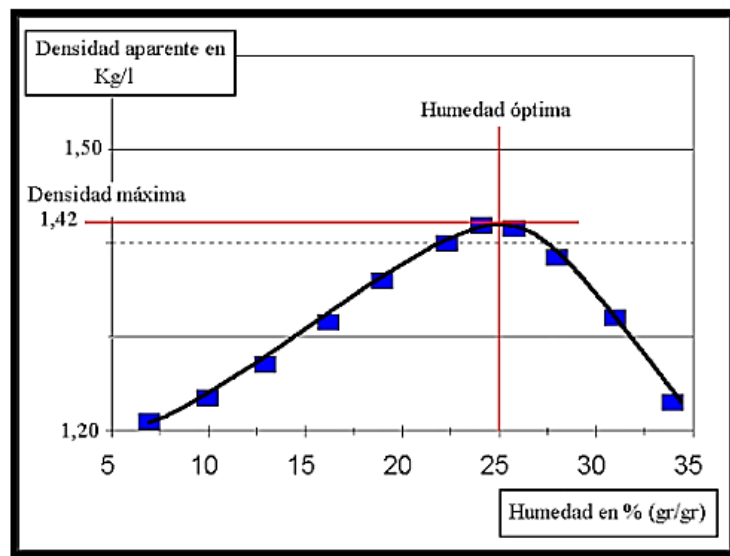
Las características que se pretenden mejorar, con la compactación son:²³

- Resistencia.
- Compresibilidad.
- Relación esfuerzo-deformación.
- Permeabilidad.
- Flexibilidad.
- Resistencia a la erosión.

“Este ensayo consiste en compactar una muestra de suelo, en un molde (el tamaño varía dependiendo del método a usar), dicho molde es cilíndrico y de metal. En el caso del Proctor modificado, se compactarán 5 capas de muestra, cada una con 25 golpes y con un pistón de 10 lbs.”²⁴

Los resultados se expresan en una gráfica de densidad/humedad, donde se busca determinar el contenido de humedad óptimo, el cual identifica cuando la gráfica represente la mayor densidad.

Figura 13. Gráfica del contenido de humedad óptimo

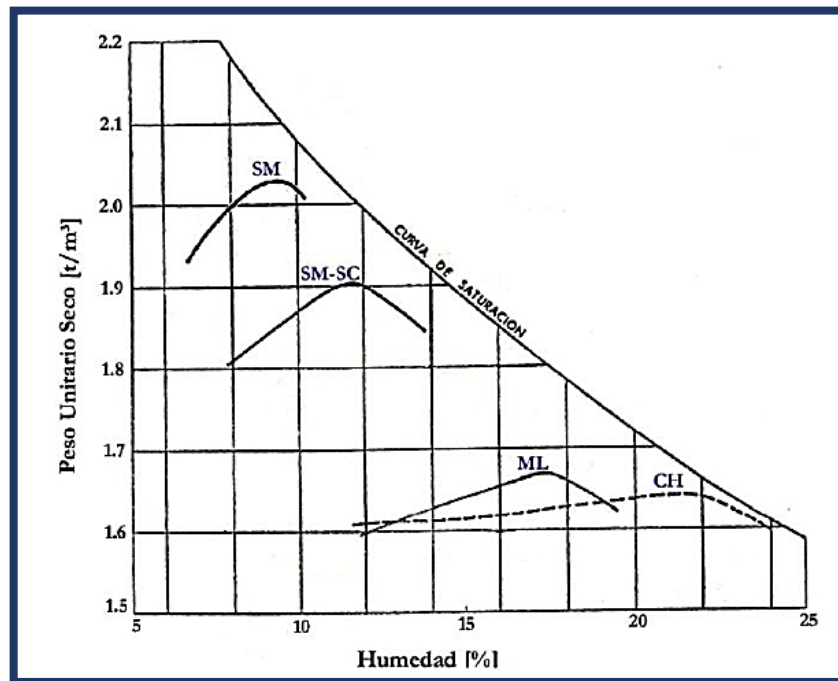


Fuente: Elaboración propia

²³ INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS (Ing Alfonso Montejo Fonseca)

²⁴ (Duque-Escobar & Escobar, 2002, pág. 154)

Figura 14. Rangos de compactacion para difentes tipos de suelos



Fuente: Guía de laboratorio

2.5. Determinación de la relación de soporte del suelo (CBR)

La Relación de Soporte de California (California Bearing Ratio), conocida comúnmente como C.B.R., es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad cuidadosamente controladas, que tiene aplicaciones principalmente en el diseño de pavimentos flexibles. Este ensayo se denomina simplemente como “Relación de soporte” y está normado con el número D 1883-73 de la ASTM.

El ensayo C.B.R., fue propuesto por los ingenieros T. E. Stanton y O . J . Porter del Departamento de Carreteras del Estado de California en el año de 1929 como una forma de clasificación de la capacidad de un suelo para ser utilizado como sub- rasante o material de base en construcción de carreteras. Durante la segunda guerra mundial, el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos adoptó este ensayo para utilizarlo en la construcción de aeropuertos. Desde esa fecha, tanto en Europa como en América este método se ha generalizado y es hoy en día uno de los más usados en pavimento flexible. El mismo, mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

El valor C.B.R., es una relación entre la resistencia a la penetración del suelo ensayado y su capacidad soporte como base de sustentación, teniendo como patrón la resistencia que ofrece la piedra picada de California, cuyo valor de soporte es del 100%.

Se establece en este método una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo, y su capacidad de soporte como base de sustentación para pavimentos flexibles. Si bien este método es empírico, se basa en un sinnúmero de trabajos de investigación llevados a cabo tanto en los laboratorios de ensayo de materiales, como en el terreno, lo que permite considerarlo como uno de los mejores métodos prácticos sugeridos hasta hoy.

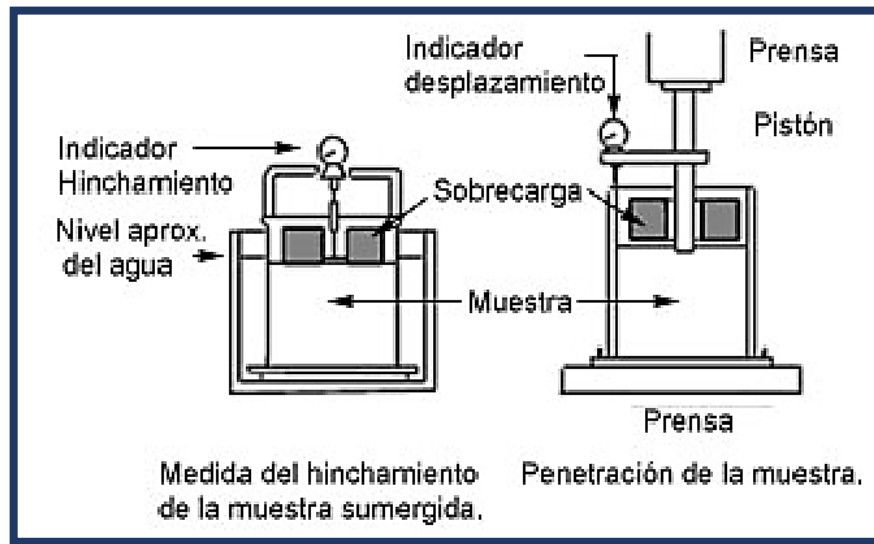
Por medio de este método se determinan la relación humedad - peso unitario seco, las propiedades expansivas del suelo, y la relación resistencia - penetración, utilizando muestras compactadas al contenido óptimo de humedad obtenido en el ensayo Próctor Modificado. El procedimiento a seguir para la realización de este ensayo es como lo especifica la norma A.S.T.M.

Por lo tanto, el C.B.R. se define como la relación entre el esfuerzo requerido para introducir un pistón normalizado dentro del suelo que se ensaya y el esfuerzo requerido para introducir el mismo pistón hasta la misma profundidad en una muestra patrón de piedra triturada. Esta relación se expresa en porcentaje.

El ensayo C.B.R. mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días y de haber medido su hinchamiento. El hecho de sumergir la muestra se debe a que así podemos prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

Por tanto, después de haber compactado el suelo y de haberlo sumergido, lo penetramos con un pistón, con los resultados nos genera una gráfica donde se nos representa la carga respecto la profundidad a la que ha penetrado el pistón dentro de la muestra. Esta gráfica suele ser una curva con el tramo inicial recto y el tramo final cóncavo hacia abajo (si el tramo inicial no es recto, se corrige). Una vez tenemos la gráfica miramos los valores de la carga que soportaba el suelo cuando el pistón se había hundido 2.5 mm y 5mm y los expresamos en tanto por ciento, tomando como índice C.B.R. el mayor de los porcentajes calculados.

Figura 15.Prensa Hidráulica



Fuente: (Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas)

El ensayo C.B.R. mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, la A.S.T.M. denomina a este ensayo, simplemente como “Relación Soporte” y está normado con el número A.S.T.M. D1883-73. Este ensayo puede realizarse tanto en laboratorio como en terreno, aunque este último no es muy practicado.

El número C.B.R. (o simplemente, C.B.R.) se obtiene como la relación de la carga unitaria (en kilogramo por centímetro cuadrado) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerido para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. En forma de ecuación esto es:

$$CBR = \frac{\text{carga unitaria del ensayo}}{\text{carga unitaria patron}} * 100$$

Los ensayos de C.B.R. se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación Próctor estándar (o modificada).

2.5.1. Aplicaciones del CBR

Se aplica para evaluación de la calidad relativa de suelos de subrasante, algunos materiales de sub-bases y bases granulares, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 mm, y que es retenido en el tamiz de 20 mm. Se recomienda que la fracción no exceda del 20%.

El C.B.R. establece una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y subrasantes bajo el pavimento de carreteras y aeropistas. La siguiente tabla da una clasificación típica:

Tabla 11. Clasificación de los suelos de acuerdo al valor de C.B.R.

CBR	Clasificación General	Usos	Sistema de Clasificación	
			Unificado	AASHTO
0-3	Muy pobre	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A5, A6, A7
3-7	Pobre a regular	Subrasante	OH, CH, MH, OL	A4, A5, A6, A7
7-20	Regular	Subbase	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20-50	Bueno	Base, Subbase	GM, GC, W, SM, SP, GP	A1b,A2-5,A3,A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1-a,A2-4.A3

Fuente: Joseph E. Bowles – Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil

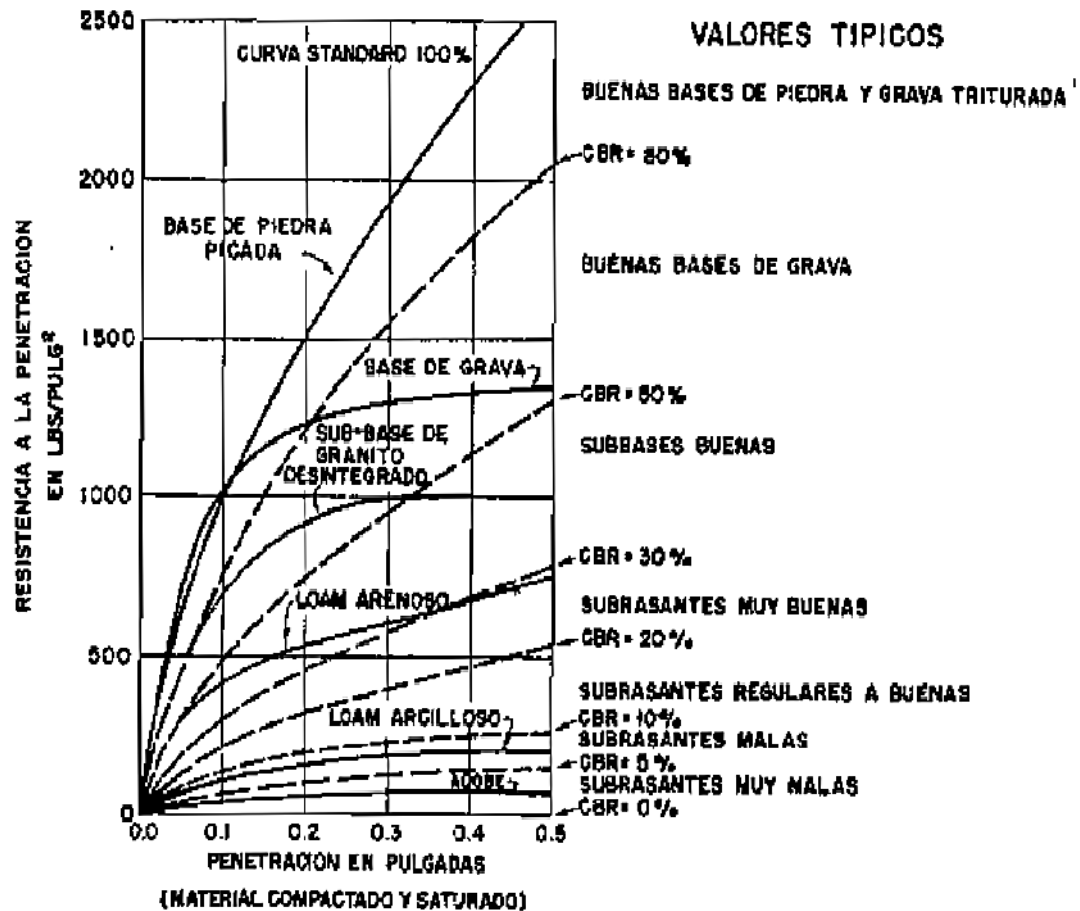
Con el resultado del C.B.R. se puede clasificar la subrasante, base o subbase:

Tabla 12. Clasificación de la subrasante de acuerdo al valor de C.B.R.

C.B.R.	Clasificación
0-5	Subrasante muy mala.
5-10	Subrasante mala.
10-20	Subrasante regular a buena.
20-30	Subrasante muy buena.
30-50	Subbase buena.
50-80	Base buena.
80-100	Base muy buena.

Fuente: Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Rodas

Figura 16. Clasificación de la subrasante de acuerdo al valor de C.B.R.



Fuente: Carreteras, calles y autopistas – Raúl V. Roda

2.5. Capa de fundación o Subrasante.

Generalmente es el terreno natural en la cual se apoya toda la estructura del pavimento, es decir, que no forma parte de la estructura en sí. Sin embargo, la capacidad soporte de la subrasante es un factor básico que afecta directamente la selección de los espesores totales de las capas de pavimento. Su finalidad es resistir las cargas que el tránsito transmite al pavimento, transmitir y distribuir las cargas al cuerpo de la carretera, evitar que los materiales finos plásticos del cuerpo de la carretera contaminen el pavimento y economizar los espesores de pavimento.

Su CBR debe ser $\geq 3\%$, no debe tratarse de materiales orgánicos, ni excesivamente cohesivos.

Trabajos que consisten en escarificar, homogenizar, mezclar, uniformizar, humedecer, conformar y compactar la subrasante de una vía a ser pavimentada, previamente construida para adecuar su superficie a la sección típica y elevaciones del proyecto, establecidas en los planos u ordenadas por el Supervisor, efectuando cortes y rellenos con un espesor no mayor de 200 milímetros, con el objeto de regularizar y mejorar mediante estas operaciones las condiciones de la subrasante como cimiento de la estructura del pavimento. Se consideran materiales inadecuados para subrasante, los clasificados en el grupo A-8 A.A.S.H.T.O M 145 que son suelos altamente orgánicos, constituidos por materiales vegetales parcialmente carbonizados o fangosos. Su clasificación está basada en una inspección visual y ni depende del porcentaje que pasa el tamiz 0.075 mm. (N 200), del límite líquido, ni del índice de plasticidad. Están compuestos principalmente de materia orgánica parcialmente podrida y generalmente tienen una textura fibrosa de color café oscuro o negro y olor a podredumbre. Son altamente compresibles y tienen baja resistencia. Además, basuras o impurezas que puedan ser perjudiciales para la estructura del pavimento. Materiales adecuados para subrasante, son suelos de preferencia granulares con menos de 3 % de hinchamiento de acuerdo con el ensayo A.A.S.H.T.O T 193 (CBR), que no tengan características inferiores a los suelos que se encuentren en el tramo o sección que se esté reacondicionando y que, además, no sean inadecuados según el literal anterior.

La subrasante reacondicionada debe ser compactada en su totalidad con un contenido de humedad dentro de ± 3 % de la humedad óptima hasta lograr el 90 % de compactación respecto a la densidad máxima, A.A.S.H.T.O T.²⁵

2.7. Planta de maíz

La planta de maíz es una planta anual, originaria de América, explotada desde la época en que los aborígenes regían gran parte de Centro y Sudamérica, para aprovechar su valor alimenticio y sufrir de alimentos a personas y animales del reino. A diferencia de otro tipo de plantas, este cultivo puede ser usado como alimento o materia prima de las distintas

²⁵ ((ABC), 2011)

fases del desarrollo de la misma, incluso después de la cosecha sigue manteniendo un gran valor.²⁶

“Es un alimento que tiene muchos carbohidratos por su mayor productividad y se ha convertido alimento con más productividad a nivel mundial considerando la taralla que representa el 61.5% y su grano constituye el 60%, además los sobrantes de tallos y hojas que se queda en la chacra tras cortar el cultivo, eso se conoce como rastrojos, esta fibra nutricionalmente es bajo proteína (5.04%), alto en fibra (73%) como un producto de fibra neutro detergente”.²⁷

Figura 17.Planta de maiz en floracion



Fuente: Elaboración propia

Descripción botánica

La planta de maíz, al pertenecer a la familia de las gramíneas posee características definidas, las cuales podemos denotar a continuación:

Raíces

Fasciculadas y robustas, permite un anclaje perfecto y aporte adecuado de nutrientes.

²⁶ (Partesdel.com, 2018)

²⁷ (Galicia Pérez, M.A y Velásquez Curo, M.A. (2016. Pág.37.))

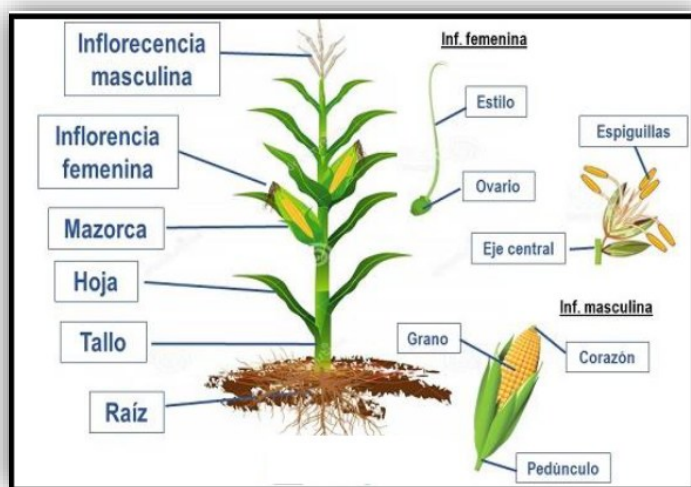
Tallo

Posee aspecto de caña, con entrenudos rellenos de una médula esponjosa, erecto, sin ramificaciones, de aproximadamente de 1 pulgada de diámetro y una altura media entre los 2 metros.

Hojas

Son alternas, paralelinervias, abrazadas al tallo y provistas de vellosidades con extremos afilados y cortantes; el número de hojas depende de la variedad, del ciclo y la época de siembra llega a poseer de 1025 hojas.

Figura 18. Partes de una planta de maíz.



Fuente: Elaboración propia

2.8. Producción de rastrojos de maíz en Bolivia

La producción de rastrojos de maíz en Bolivia es una parte significativa de la agricultura en diversas regiones del país, especialmente en áreas rurales donde el maíz se cultiva tanto para consumo humano como para alimentar al ganado. Los rastrojos de maíz, que son los restos vegetales generados tras la cosecha, incluyen tallos, hojas y cáscaras de las mazorcas. Aunque no siempre se les da un uso adecuado, los rastrojos son aprovechados como forraje animal y abono orgánico.

2.8.1. Principales zonas de producción en Bolivia

“Con excepción del departamento de Oruro, la producción de maíz en Bolivia se encuentra distribuida en todos los otros departamentos. Sin embargo, existe una importante concentración de la producción en las zonas de valle y trópicos de los departamentos de Santa Cruz, Cochabamba, Chuquisaca y Tarija.

Figura 19.Rastrajo de maíz



Fuente: centro de investigación y promoción del campesino

A continuación, se mencionan algunas de las cifras más relevantes:

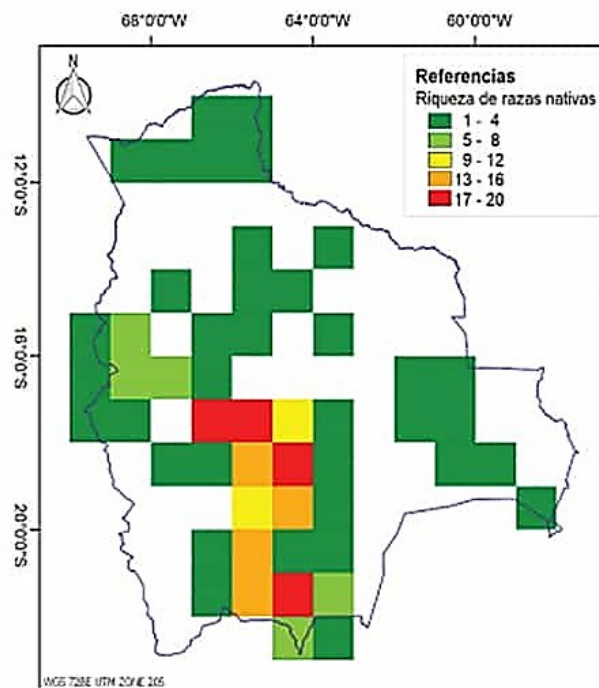
- Santa Cruz es el principal productor de maíz en Bolivia, con aproximadamente 650,000 hectáreas dedicadas a este cultivo, según el Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras de Bolivia.²⁸
- En Cochabamba, se estiman más de 100,000 hectáreas de maíz sembradas.
- Chuquisaca tiene una producción de 54.000 hectáreas.
- Tarija tiene una importancia destacada a nivel nacional. En términos de superficie, se siembran alrededor de 45.224 hectáreas, lo que genera aproximadamente 170.257 toneladas métricas anuales, con el cultivo concentrado en áreas como la región autónoma del Chaco y las provincias de O'Connor y Padcaya.

²⁸ Ministerio de Desarrollo Rural y Tierras de Bolivia

Además, en Tarija se cultivan alrededor de 25 variedades de maíz, aunque 12 de ellas son las más comúnmente sembradas. Entre estas, destacan las variedades criollas como el "romano" y el "moroch", junto con nuevas variedades híbridas desarrolladas por el Instituto Nacional de Innovación Agropecuaria y Forestal (INIAF), que han incrementado el rendimiento por hectárea.²⁹

- En La Paz, especialmente en el área de Sorata, el maíz también se cultiva de manera significativa, pero en menor escala comparado con otros departamentos. Se han identificado aproximadamente 5,000 hectáreas de maíz en la región es un cultivo fundamental tanto para la seguridad alimentaria como para la economía de muchas familias bolivianas, siendo una fuente importante de sustento en áreas rurales. Sin embargo, el rendimiento varía dependiendo de factores como la altitud, el tipo de suelo y las prácticas agrícolas.

Figura 20. Riqueza de razas de maíz en Bolivia.



Fuente: Revista de información veterinaria, medicina y zootécnica, especializada en los sectores de avicultura, porcicultura, rumiantes y acuicultura

²⁹ (Ana Isabel Ortiz (Compiladora))

2.9. Ceniza de rastrojo de maíz

El estudio se trabajará con plantas de maíz (tallos, hojas y espiga) cultivadas en el departamento de Tarija provincia de Cercado. La chala de maíz se llama en si a la planta seca; esta planta tiene un crecimiento rápido; el tallo es simple, rígido y sólido. Presenta hojas de aproximadamente 1m de longitud y hasta 10cm de ancho, ásperas al tacto.³⁰

Figura 21.Rastrojo de maíz



Fuente: Elaboración propia

Figura 22.Rastrojo de maíz

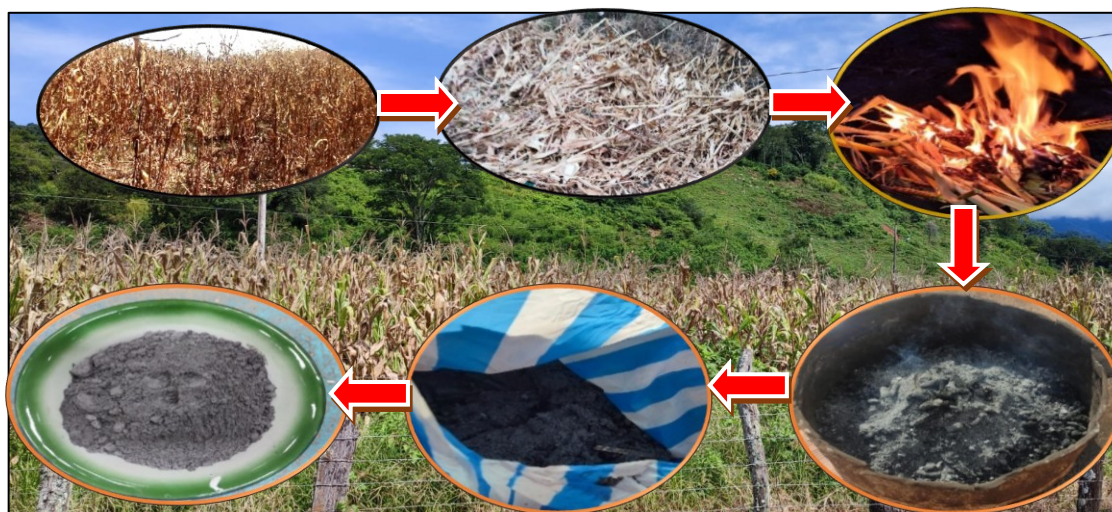


Fuente: Elaboración propia

³⁰ (Galicía & Velásquez, 2016)

La chala de maíz se llama en sí a la planta seca; al ser calcinado entre 400°C 600°C, por un tiempo de aproximado de 4 horas y 30 minutos, generan cenizas puzolánicas que posee un alto contenido de óxido de sílice y óxido de aluminio los cuales juntos con el hidróxido de calcio generan un material cementante.

Figura 23.Proceso de incineración



Fuente: Elaboración propia

2.9.1. Caracterización de la ceniza de rastro de maíz

La ceniza de rastrojo de maíz es rica en silicio, principalmente en forma de dióxido de silicio (SiO_2), debido a la forma en que las plantas de maíz absorben y acumulan este elemento durante su crecimiento.

El silicio absorbido se deposita en las paredes celulares, especialmente en las hojas, tallos y cáscaras, donde actúa como un refuerzo estructural natural. Esto ayuda a la planta a tener mayor resistencia mecánica, protección contra plagas, y tolerancia al estrés ambiental.

Cuando el rastrojo se quema para producir ceniza, los componentes orgánicos se descomponen, y lo que queda son los minerales inorgánicos, especialmente el dióxido de silicio en forma amorfa (no cristalina), que es mucho más reactiva. Esta forma amorfa es clave, porque tiene propiedades puzolánicas, lo que significa que puede reaccionar químicamente con compuestos del suelo en presencia de agua.

Por eso, la ceniza de rastrojo de maíz tiene una composición con alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2), en mayor proporción que otros elementos como calcio (Ca), potasio (K) y magnesio (Mg), que también está presente, pero en menos cantidad. Estos minerales tienen roles más específicos, como en la nutrición de la planta, pero no tienen la misma reactividad o capacidad para modificar las propiedades físicas de los suelos de la manera en que lo hace el silicio.

Figura 24. Ceniza de rastrojo de maíz



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

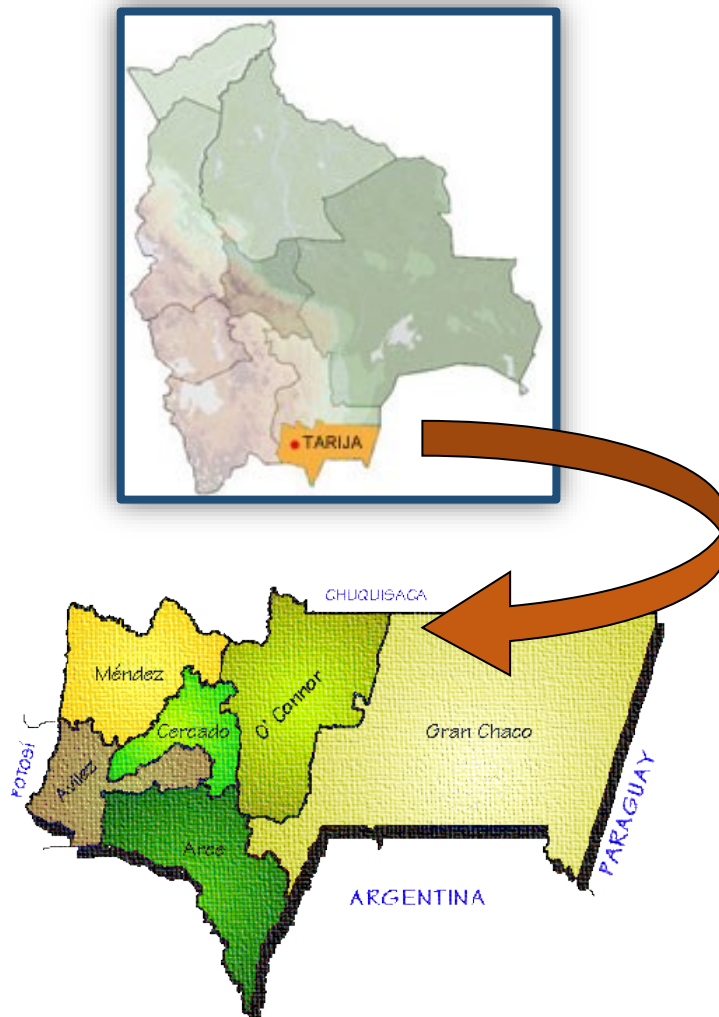
CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

3.1. Ubicación del proyecto

El departamento de Tarija se encuentra en el sur de Bolivia. Limita al norte con los departamentos de Chuquisaca y Potosí, al este y sureste con la República Argentina, al oeste con el departamento de Potosí y al sur con la República Argentina. Su capital es la ciudad de Tarija. El departamento tiene una geografía variada, que incluye zonas montañosas, valles y llanuras.

Figura 25.Departamento de Tarija- Geografía



Fuente: Google imágenes

3.2. Ubicación de la zona de estudio

El área en estudio de esta investigación, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija ubicada al sur del país de Bolivia, más específicamente en plena capital del departamento de Tarija perteneciente a la provincia cercado, el muestreo se realizó en dos zonas o barrios de la ciudad en mención los cuales son: barrio Fray Quebracho y el barrio del Constructor.

Figura 26. Ubicación de las zonas de estudio



Fuente: Google Earth

3.3. Muestreo de materiales

En la selección de la muestra de los suelos se tomó en cuenta especialmente suelos arcillosos que por su composición sean inestables y expansivas.

3.4. Determinación de las zonas de muestreo de estudio

Barrio Fray Quebracho

El barrio se encuentra en Tarija provincia Cercado ubicada en el distrito 7, limita al sur con el barrio 20 de enero, en el norte con monte sur y al oeste con el barrio el Rosal, del Tejar hasta el barrio se tarda 1h.

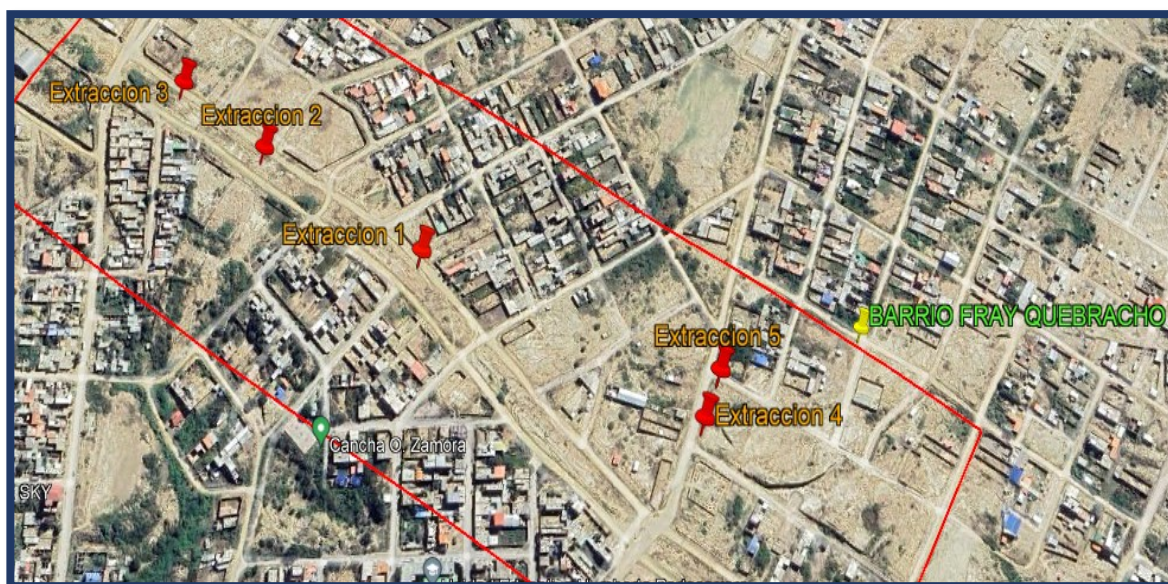
Ubicación de las muestras.

Tabla 13. Coordenadas de las muestras de Fray Quebracho

Coordenadas UTM			
Muestras	Zona	Coordenadas Este	Coordenada Norte
M-1	20K	320040.00 m E	7621560.00 m S
M-2	20K	319874.00 m E	7621666.00 m S
M-3	20K	319787.00 m E	7621729.00 m S
M-4	20K	320320.00 m E	7621403.00 m S
M-5	20K	320338.00 m E	7621445.00 m S

Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Ubicación barrio Fray Quebracho



Fuente: Google Earth

Barrio Constructor

Se ubica en la ciudad de Tarija Cercado ubicada en distrito 9, limita al norte con el barrio 2 de Mayo, en el sur con el barrio Pedro A. Flores, al este con el barrio Luis Espinal y al oeste con el barrio San Bernardo; su acceso se encuentra sobre la avenida y del Tejar hasta el barrio se tarda 20 min.

Ubicación de las muestras.

Tabla 14. Coordenadas de las muestras de Constructor

Coordenadas UTM			
Muestras	Zona	Coordenadas Este	Coordenada Norte
M-6	20K	322534.00 m E	7619119.00 m S
M-7	20K	322406.00 m E	7619421.00 m S

Fuente: Elaboración propia

Figura 28. Ubicación barrio Constructor



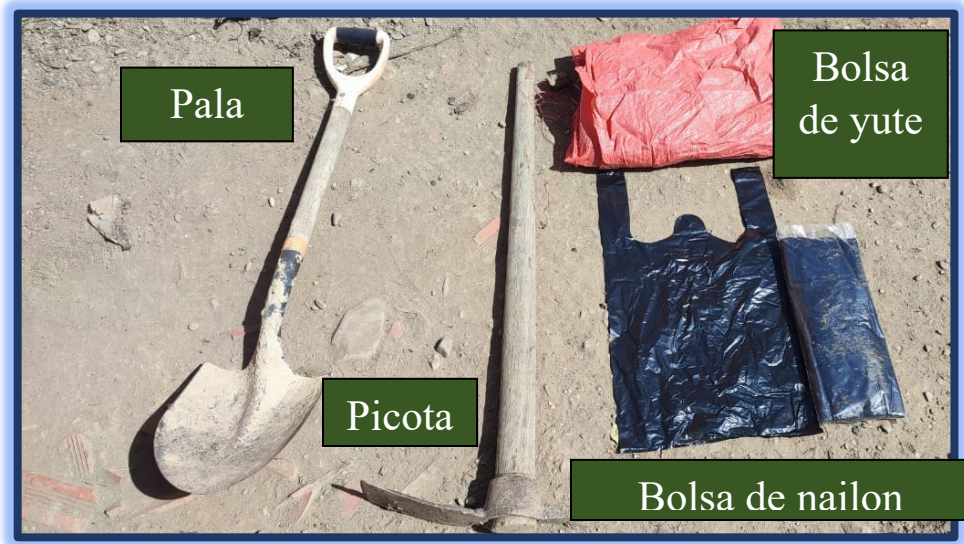
Fuente: Google Earth

3.5. Extracción de muestras mediante calicatas

El ensayo se realizó en nuestro caso de suelo abierto o calicatas de forma manual se realizó la excavación, utilizando las herramientas adecuadas como ser pala y picota.

Primeramente, se procedió a limpiar el sitio de extracción como hierbas, piedras bolsas, basura; con el fin de que estos elementos no nos dificulten al momento de realizar la excavación. Lugo procedimos a cavar can la picota para que quede suelto la tierra, a continuación, se procedió a extraer la tierra suelta con la pala, echándolo en bolsas de nailon para la caracterización del misma especialmente para evitar la pérdida de humedad natural del suelo.

Figura 29.Equipos de extracción para las muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 30. Extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 31. Calicatas y extracción del barrio Fray Quebracho





Fuente: Elaboración propia

Figura 32. Calicatas y extracción del barrio Constructor



Fuente: Elaboración propia

3.6. Proceso de incineración y obtención de ceniza de rastrojo de maíz

El proceso de incineración para la quema de la chacra o rastrojo de maíz al no contar con los medios o con hornos para controlar la temperatura se la realizo mediante un método rustico en la cual se utilizó un turril de acero.

El proceso consiste:

- El rastrojo de maíz o chacra se obtuvo de la ciudad de Tarija provincia O'Connor el cantón (comunidad) salinas.
- Es necesario dejar secar el material para eliminar su humedad ya que esto facilitara la incineración.
- Escogió un lugar adecuado y seguro para la incineración, lejos de estructuras infumables.
- Posteriormente; se colocó el material por partes primero las hojas y luego el tallo cortado en diferentes tamaños para así facilitar la incineración dentro del turril asegurándose que este seco.
- El tiempo de incineración aproximadamente fue de 4 hrs.
- Después de obtener la ceniza se le deja enfriar para su respectivo almacenaje en bolsas cerradas en un ambiente seco y fresco.
- Al final esta ceniza paso por un proceso de tamizado para que este pueda ser mezclado con mayor facilidad con el suelo natural.

Tabla 15. Ubicación geográfica de la zona de extracción rastrojo de Maiz

Coordenadas UTM			
Extracción	Zona	Coordenadas Este	Coordenada Norte
Salinas	20K	371841.00 m E	7593390.00 m S

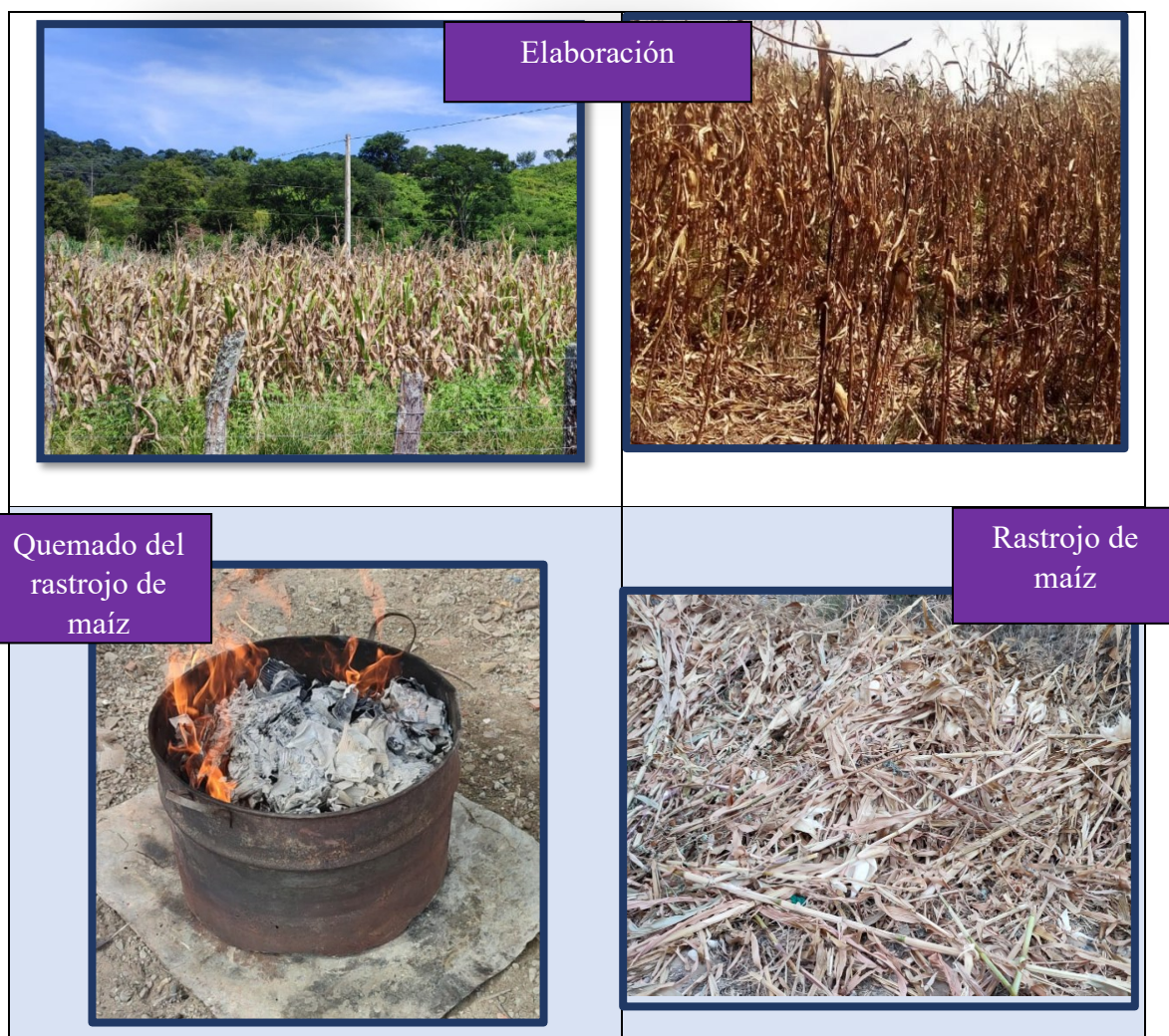
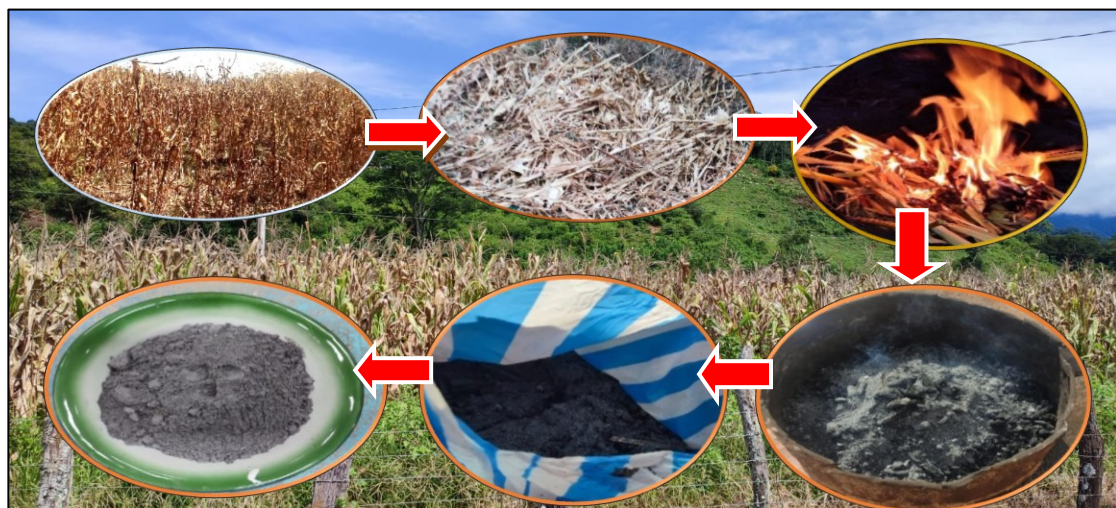
Fuente: Google Earth

Figura 33. Ubicación geográfica de la zona de extracción rastrojo de Maiz



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Proceso de obtención de ceniza de rastrojo de maíz





Fuente: Elaboración propia

3.7. Ensayos de caracterización de suelos

3.7.1. Contenido de humedad

Para determinar el contenido de humedad se utilizó el método de secado al horno. El contenido de humedad de un suelo consiste en pesar una muestra de suelo antes y después de secarla en el horno a una temperatura de aproximadamente 105 °C durante 24 horas. El contenido de humedad se calcula como la diferencia de peso entre la muestra humedad y seca, dividido por el peso seco, y multiplicado por 100 para obtener en porcentaje.

Figura 35. Contenido de humedad

❖ Extracción de la muestra	
❖ Pesado de las taras vacías	
❖ Colocar la muestra en las taras	
❖ Peso de tara más muestra	
❖ Secado de muestra al horno	

❖ Peso de la muestra más tara



Fuente: Elaboración propia

Contenido de humedad natural

Zona: Fray Quebracho

Contenido de humedad			
Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	42.35	42.42	42.62
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	39.60	39.68	39.89
Peso de cápsula (g)	12.35	12.42	12.62
Peso de suelo seco (g)	27.25	27.26	27.27
Peso del agua (g)	2.75	2.74	2.73
Contenido de humedad(%)	10.09	10.05	10.01
Promedio	10.05		

Porcentaje de humedad Natural del Suelo (%) = 10 %

Resumen de resultados.

Tabla 16. Resultado de contenido de humedad de las muestras

Zona Fray Quebracho					
Muestras	M1	M2	M3	M4	M5
contenido de humedad %	10	9	6	16	10

Zona Constructor		
Muestras	M6	M7
contenido de humedad %	12	13

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Análisis granulométrico (ASTM D422 AASHTO T88)

Método del lavado.

Generalmente se utiliza para suelos finos, el método de lavado garantiza que solo se midan las partículas más grandes, lo que permite una clasificación correcta.

Figura 36. Análisis granulométrico

❖ 4000 y 1000 gr de muestra que pasa por el tamiz N°10.	
❖ Saturar durante 24 horas, con el fin de obtener una masa constante.	
❖ Se procede a lavar las muestras pasadas las 24 horas, teniendo cuidado de no desperdiciar material, usando la malla N° 200 (75 mm), con el fin de separar los finos del suelo.	

❖ Conservando el material que quede en la malla N° 200, para luego ser secado en el horno.	
❖ Cuando el material está seco.	
❖ El material seco se pone en la serie de tamices N°10,40,100 y 200.	
❖ Se registra el peso retenido en cada tamiz.	

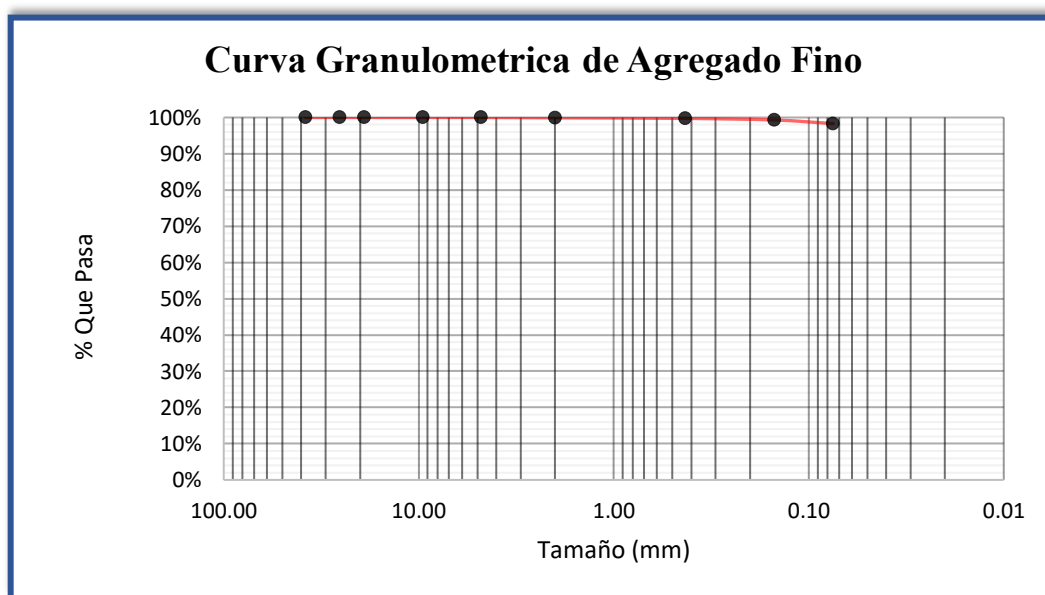
Fuente: Elaboración propia

Granulometría

Zona: Fray Quebracho

Peso Total (g.)		4000			
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Ret. Acum.	% Ret.	% que pasa del total
1 ½	38.10	0.00	0.00	0.00%	100.00%
1	25.40	0.00	0.00	0.00%	100.00%
¾	19.05	0.00	0.00	0.00%	100.00%
3/8	9.50	0.00	0.00	0.00%	100.00%
Nº4	4.80	0.00	0.00	0.00%	100.00%
Nº10	2.00	3.79	3.79	0.09%	99.91%
Nº40	0.43	6.30	10.09	0.25%	99.75%
Nº100	0.15	17.44	27.53	0.69%	99.31%
Nº200	0.075	39.79	67.32	1.68%	98.32%
Base		0.00			

Figura 37. Curva granulométrica de la muestra M1-NT



Fuente: Elaboración propia

Resumen de muestras:

Tabla 17. Resumen de resultados de la granulometría

Zona Fray Quebracho					
Muestra	% Que pasa del total				
Tamiz	M1	M2	M3	M4	M5
1 ½	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
1	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
¾	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
3/8	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Nº4	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
Nº10	99.91%	99.51%	100.00%	99.91%	99.55%
Nº40	99.75%	98.79%	99.73%	99.75%	98.88%
Nº100	99.31%	97.02%	99.30%	99.31%	92.13%
Nº200	98.32%	94.49%	99.01%	98.32%	85.28%
Zona Constructor					
Muestra	% Que pasa del total				
Tamiz	M6		M7		
1 ½	100.00%		100.00%		
1	100.00%		100.00%		
¾	100.00%		100.00%		
3/8	100.00%		100.00%		
Nº4	100.00%		100.00%		
Nº10	100.00%		100.00%		
Nº40	97.82%		99.76%		
Nº100	88.96%		93.14%		
Nº200	80.60%		76.24%		

Fuente: Propia

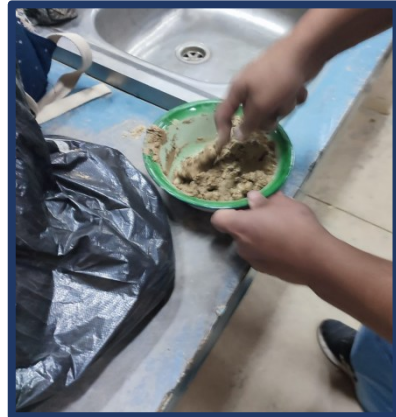
3.7.3. Determinación de consistencia de los suelos

Determinación del límite líquido (ASTM D4318 AASHTO T89)

El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que se determina mediante el método de la cuchara de casa grande.

Procedimiento:

Figura 38. Limite liquido de los suelos

❖ Se realiza la calibración del equipo casa grande, haciendo que tenga una caída de 1 cm bajo la norma ASTM E11.	
❖ Para la preparación de muestra, se obtiene una porción de muestra que pase por el tamiz N°40.	
❖ La muestra representativa se mezcla con agua en un recipiente de porcelana, con la ayuda de la espátula se llegará a tener una consistencia pegajosa y homogénea.	
❖ Se coloca el material mezclado en la cuchara de Casa Grande, aproximadamente 1 cm de espesor y dándole un acabado nivelado con superficie regular, es importante tratar de pasar la menor cantidad de veces con la espátula.	

❖ Con el ranurador hacemos una línea por el medio de la cuchara, esta línea debe ser limpia, separando el material de la cuchara en dos partes.	
❖ Girando la manija del aparato de Casa Grande, a una velocidad constante, la cuchara se elevará 1 cm y caerá golpeándola, esto generará que el material separado por el acanalador se junte, siendo el número de golpes necesario para juntar el material el dato que se procede a registrar.	
❖ Se toma una porción de muestra, perpendicular a la ranura, de aproximadamente una pulgada de ancho y se coloca en un recipiente metálico, el cual pesaremos y registraremos para determinar el contenido de humedad.	
❖ El proceso se repite con el material restante, hasta tener los datos necesarios para cumplir los intervalos de golpes que requiere la ficha de toma de datos, se puede agregar o quitar humedad del material según sea conveniente. ❖ Se registrará los números de golpes y se extraerá la muestra representativa de cada ensayo, las cuales se procederán a pesar y secar en el horno a 110 ± 5 °C durante 24 horas, para poder determinar el contenido de humedad.	

Fuente: Elaboración propia

Límite pastico e índice de plasticidad (ASTM D4318; AASHTO T90)

El límite plástico describir la cantidad de agua que puede tener un suelo antes de que pierda su plasticidad y se vuelva quebradizo.

Este ensayo es importante para la caracterización de suelos, ya que proporciona información sobre la plasticidad del suelo, un factor crucial en la evaluación de su comportamiento mecánico.

Procedimiento:

Figura 39. Límite plástico

❖ Preparación de la muestra: La muestra de suelo se seca en un horno para eliminar cualquier exceso de humedad.	
❖ Tamizado: La muestra seca se tamiza en el tamiz N° 40 para asegurar que se eliminen partículas grandes y solo se utilice una muestra fina para el ensayo.	
❖ Adición de agua: Se añade agua a la muestra de suelo hasta que esté húmeda pero no saturada.	

❖ Formación de rollos: Se toma una pequeña cantidad de la muestra húmeda y se rueda entre las palmas de las manos y en la base de vidrio para formar un cilindro o rollo de aproximadamente 3 mm de diámetro.	
❖ Determinación del límite plástico: Se continúa enrollando la muestra hasta que el cilindro de suelo empieza a desmoronarse o agrietarse al alcanzar un diámetro de aproximadamente 3 mm. El contenido de agua de la muestra en este punto se considera el límite plástico.	
❖ Medición del contenido de agua: La muestra que se encuentra en el límite plástico se pesa y se seca en un horno para determinar su contenido de agua. Este contenido de agua es el límite plástico.	

Fuente: Elaboración propia

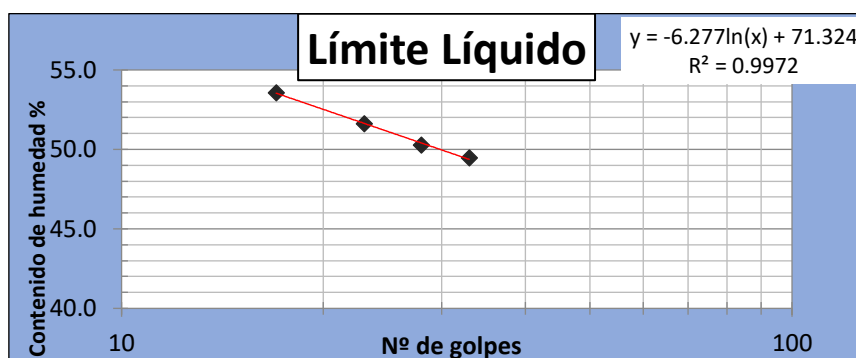
Límites de Atterberg-Agregado fino

Zona: Fray Quebracho

Límite líquido (CH)

Cápsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	17	23	28	33
Suelo Húmedo + Cápsula (g)	45.02	38.45	39.50	38.69
Suelo Seco + Cápsula (g)	33.78	29.75	30.50	30.22
Peso del agua (g)	11.24	8.7	9	8.47
Peso de la Cápsula (g)	12.80	12.90	12.60	13.10
Peso Suelo seco (g)	20.98	16.85	17.9	17.12
Porcentaje de humedad (%)	53.57	51.63	50.28	49.47
LL =			51.12	

Figura 40. Límite líquido de la muestra 1



Fuente: Elaboración propia

Límite Plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	16.20	15.40	15.71
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	15.60	14.80	15.00
Peso de cápsula (g)	13.21	12.43	12.20
Peso de suelo seco (g)	2.39	2.37	2.8
Peso del agua (g)	0.60	0.60	0.71
Contenido de humedad (%)	25.10	25.32	25.36
LP	=	25.26	
IP	=	25.86	

Límites de Atterberg-Agregado fino

Zona: Constructor

Límite líquido (CL)

Cápsula Nº	1	2	3	4
Nº de golpes	17	21	29	33
Suelo Húmedo + Cápsula (g)	42.60	44.40	44.40	47.10
Suelo Seco + Cápsula (g)	35.15	36.65	36.81	39.52
Peso del agua (g)	7.45	7.75	7.59	7.58
Peso de la Cápsula (g)	13.50	12.90	12.50	13.80
Peso Suelo seco (g)	21.65	23.75	24.31	25.72
Porcentaje de humedad (%)	34.41	32.63	31.22	29.47
LL	=	31.70		

Figura 41. Limite liquido de la muestra 6



Fuente:Elavoracion propia

Límite Plástico

Cápsula	1	2	3
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	16.40	15.90	16.10
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	15.90	15.51	15.70
Peso de cápsula (g)	12.40	12.80	12.90
Peso de suelo seco (g)	3.5	2.71	2.8
Peso del agua (g)	0.50	0.39	0.40
Contenido de humedad (%)	14.29	14.39	14.29
	LP	=	14.32
	IP	=	17.38

Resumen de muestras.

Tabla 18. Resultados de los ensayos de límites de Atterberg

Zona Fray Quebracho			
Muestra	LL	LP	IP
M 1	51.12	25.26	25.86
M 2	33.23	17.73	15.50
M 3	21.80	11.04	10.76
M 4	48.93	25.72	23.21
M 5	27.49	16.22	11.28
Zona Constructor			
Muestra	LL	LP	IP
M 6	31.70	14.32	17.38
M 7	25.34	16.16	9.27

Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Límite líquido y límite plástico

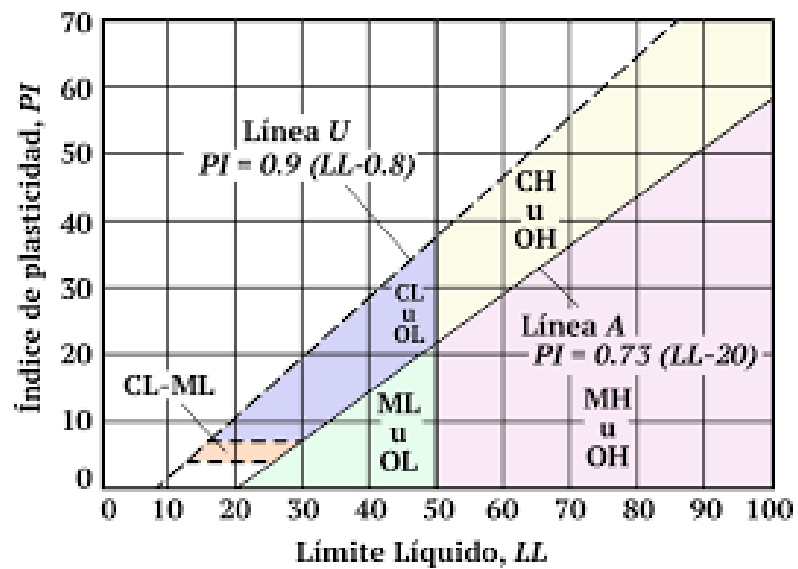


Fuente: Elaboración propia

3.7.4. Clasificación S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

El objetivo de la clasificación de suelos es agruparlos según su tamaño de partícula, lo que nos facilita comparar propiedades entre diferentes tipos de suelo.

Figura 43. Carta de plasticidad de Casagrande (S.U.C.S.)



Fuente: Google imágenes

Clasificación de suelos según S.U.C.S.

Tabla 19. Resultados de clasificación de los suelos por S.U.C.S.

Zona Fray Quebracho						
Caract.	% que pasa total		Lim. de Atterberg		Clasificación	
Muest.	N°40	N°200	LL	IP	S.U.C.S.	Descripción
M1	100%	98%	51.12	25.86	CH	Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad LL>50%
M2	99%	94%	33.23	15.50	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad LL<50% y IP>7%
M3	100%	99%	21.80	10.76	CL	
M4	100%	98%	48.93	23.21	CL	
M5	99%	85%	27.49	11.28	CL	
Zona Constructor						
Caract.	% que pasa total		Lim. de Atterberg		Clasificación	
Muest.	N°40	N°200	LL	IP	S.U.C.S.	Descripción
M6	98%	81%	31.70	17.38	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad LL<50% y IP>7%
M7	100%	76%	25.34	9.27	CL	

Fuente: Elaboración propia

3.7.5. Elección del suelo más desfavorable

De acuerdo a los resultados de granulometría, límites de consistencia de las diferentes calicatas y evaluación visual se escogió al suelo más desfavorable y que cumplan a la clasificación de que sea un suelo CH y CL. Siendo del barrio Fray Quebracho C1-M1 (Calicata 1- Muestra 1) perteneciente a ser un CH según la clasificación S.U.C.S. y del barrio Constructor C6-M6 (Calicata 6- Muestra 6) perteneciente a ser un CL según la clasificación S.U.C.S.

Figura 44. Zona de procedencia del material extraído barrio Fray Quebracho



Fuente: Elaboración propia

Figura 45. Zona de procedencia del material extraído barrio Constructor



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRÁCTICA

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN PRACTICA

4.1. Ensayo de compactación (AASHTO T272)

Se entiende por compactación todo proceso que aumenta el peso volumétrico de un suelo. En general, es conveniente compactar un suelo para incrementar su resistencia al esfuerzo cortante, reducir su compresibilidad y hacerlo más impermeable. Para la presente tesis, se realizó el ensayo en el Proctor modificado.

Este método establece el procedimiento para determinar el grado de humedad de un suelo para alcanzar una densidad máxima.

El procedimiento consiste en apisonar en 5 capas consecutivas.

Figura 46. Materiales a utilizar para la práctica de Proctor modificado



Fuente: Elaboración propia

Figura 47. Proceso del ensayo de Proctor modificado

❖ Se procede a secar el suelo y a pesarlo (aproximadamente 3 kg por punto de Proctor).	
❖ Se registrará los pesos de los moldes que se usarán para el ensayo.	
❖ Se agrega agua en diferentes porcentajes para elaborar cada punto del Proctor, se procede a mezclar la muestra en una bandeja metálica, hasta que la muestra quede homogénea.	
❖ Una vez mezclada la muestra se procede a dividir en 5 partes iguales, haciendo uso del cucharón, lo que nos servirá para agregar a los moldes (molde + collarín) en 5 capas.	

- ❖ Se agrega las muestras separadas anteriormente en el molde y se procede a la compactación con el pisón se dan 25 golpes por cada capa, hasta cumplir con las 5 capas. Es recomendable extender y acomodar con el pisón para formar una capa uniforme antes de compactar.



- ❖ Al terminar las 5 capas se procede a retirar el collarín de extensión, y a enrasar el material que quedo en el molde con una regla metálica dejando una superficie plana en la parte superior e inferior, se rellena cualquier hoyo o hueco que tenga, con el material del collarín, siempre procurando dejar la superficie plana.



- ❖ Se procede a pesar el molde con el suelo compactado.



- ❖ Se extrae una muestra representativa y compactada del molde (axialmente) de la parte central, con la cual determinaremos el contenido de humedad tales muestras serán pesadas en recipientes metálicos y registradas.



- ❖ Se secarán las muestras durante 24 horas en un horno y se pesará en estado seco para determinar su contenido de humedad.



Fuente: Elaboración propia

- ❖ Se repetirá este proceso para determinar los 4 puntos del ensayo de Proctor y así poder realizar la curva de compactación (Densidad seca / Humedad).

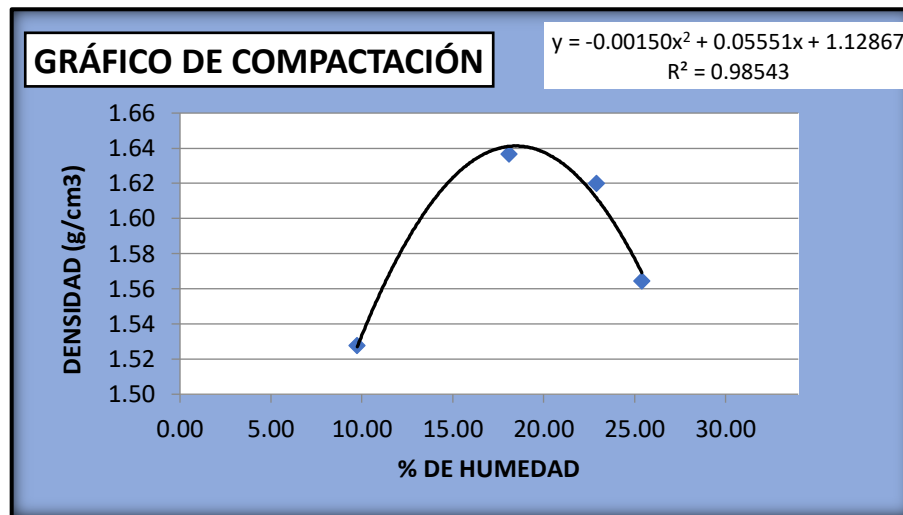
Compactación

Zona: Fray Quebracho

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde (g)	5729.80	5969.50	6024.10	5969.5
Peso del molde (g)	4159.9	4159.9	4159.9	4159.9
Peso suelo húmedo (g)	1569.90	1809.60	1864.2	1836.9
Volumen de la muestra (g)	936.3	936.3	936.3	936.3
Densidad suelo húmedo (g/cm ³)	1.68	1.93	1.99	1.96
Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (g)	80.90	79.15	85.60	73.1
Peso suelo seco + cápsula (g)	76.05	70.90	74.49	63.50
Peso del agua (g)	4.85	8.25	11.11	9.6
Peso de la cápsula (g)	26.3	25.3	26	25.7
Peso suelo seco (g)	49.75	45.6	48.49	37.80
Contenido de humedad (%)	9.75	18.09	22.91	25.40
Densidad suelo seco (g/cm ³)	1.53	1.64	1.62	1.56

Densidad Máxima	1.64	g/cm ³
Humedad Optima	18.50	%

Figura 48. Curva de compactación de la muestra N°1(CH)



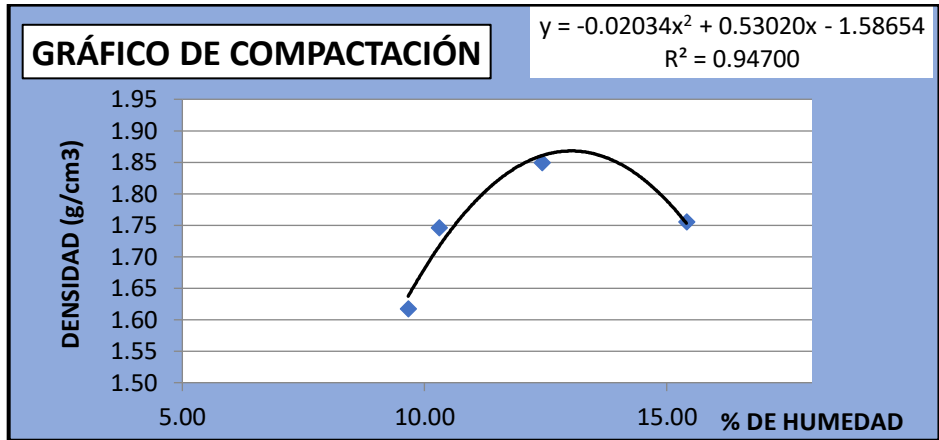
Fuente: Elaboración propia

Zona: Constructor

Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	5819.40	5962.45	6105.50	6056.20
Peso del molde	4159.8	4159.8	4159.8	4159.8
Peso suelo húmedo	1659.60	1802.65	1945.7	1896.4
Volumen de la muestra	936.0	936.0	936.0	936.0
Densidad suelo húmedo (gr/cm³)	1.77	1.93	2.08	2.03
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula	60.60	66.95	73.30	73.30
Peso suelo seco + cápsula	56.30	61.80	66.60	65.13
Peso del agua	4.30	5.15	6.7	8.17
Peso de la cápsula	11.8	11.8	12.7	12.1
Peso suelo seco	44.5	50	53.9	53.03
Contenido de humedad (%h)	9.66	10.30	12.43	15.41
Densidad suelo seco (gr/cm3)	1.62	1.75	1.85	1.76

Densidad Máxima	1.87 gr/cm³
Humedad Optima	13.03 %

Figura 49. Curva de compactación de la muestra N°6 (CL)



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados del ensayo de compactación sin aditivo

Zona de estudio	Nº1: Barrio Fray Quebracho	Nº6: Barrio Constructor
Densidad máxima (gr/cm3)	1.67	1.87
Humedad óptima (%)	18.51	13.44

Fuente: Elaboración Propia

4.2. Relación de Soporte de California CBR (ASTM D 1883_ AASHTO T-193)

El ensayo C.B.R. se realiza de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo.

Procedimiento:

Figura 50. Equipamiento de laboratorio



Fuente: Elaboración Propia

Figura 51. Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio

❖ Se usará 5 kg de suelo seco tamizado que pase por el tamiz N°4 para cada ensayo de CBR.	
❖ Se procede a pesar los moldes y prepararlos para el ensayo, colocando el collarín, disco espaciador y el papel filtro en los tres moldes de CBR.	
❖ Se preparan las muestras en una bandeja metálica y agregando agua para cumplir el contenido de humedad óptimo.	

- ❖ La muestra mezclada y homogenizada en la bandeja se divide en 5 porciones iguales, esas servirán para llenar las 5 capas del molde. Este proceso se repetirá 3 veces hasta completar los 3 ensayos de CBR (12, 25 y 56 golpes) por cada dosificación de suelo.



- ❖ Cuando las muestras fueron compactadas con el determinado número de golpes se procede a separar el collarín del molde.



- ❖ enrasar con una regla metálica.



- ❖ Se gira el molde de modo que la parte superior quede abajo, y asegurándolo con a la base, pero antes se coloca el papel filtro y se retira el disco espaciador, donde luego entrarán las sobrecargas (pesas).



- ❖ Se procede a asegurar bien el molde con la base.



- ❖ Se registra el peso de la muestra compacta con la base y molde.



- ❖ Se coloca papel filtro en la parte superior de la muestra, luego se pondrá la placa perforada con vástago ajustable y sobre ella se coloca las pesas de sobrecarga.



- ❖ Se procede a hacer la lectura con el extensómetro, marcando los puntos en los cuales se apoyó el trípode.



- ❖ Las muestras se sumergen en agua, saturándose durante 4 días, a lo largo de este tiempo se tomará las variaciones de volumen que tendrá la muestra usando el extensómetro teniendo en cuenta que las patas del trípode estén puestas en los puntos marcados.



- ❖ Después de 4 días se sacan las muestras del pozo de inmersión, y se deja drenar durante 15 minutos, se retira el vástago y la placa, quedando las pesas puestas en la muestra.



- ❖ Se procede a hacer el ensayo de penetración en el equipo de CBR, verificando que el dial de presión (carga) y el de deformación estén en cero.



- ❖ La velocidad de penetración será de 0.05 pulgadas por minuto, y registrando los datos de presión a 0.00, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.200, 0.300, 0.400 y 0.500 pulgadas de penetración.



- ❖ Finalmente se retira la muestra del equipo de CBR y se quitan las sobrecargas de la muestra (pesas), para tomar una muestra del suelo ensayado y determinar la humedad final.



Fuente: Elaboración propia

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Zona: Fray Quebracho

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
Condición de muestra	Antes de mojar	D. de M		Antes de mojar	D. de M		Antes de mojar	D. de M	
Peso muestra húm.+molde	10875	11510		11975	12465		12225	12750	
Peso Molde	7265	7280		7990	8015		7950	7970	
Peso muestra húmeda	3610	4230		3985	4450		4275	4780	
Volumen de la muestra	2126	2126		2138	2138		2137	2137	
Peso Unit. Muestra Húm.	1.698	1.990		1.864	2.081		2.000	2.237	
Muestra de humedad	Fondo	Superf	2" sup.	Fondo	Superf	2" sup.	Fondo	Superf	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	68.1	76.8	74.5	72.2	66.2	65.5	85.6	75.8	68.5
Peso muestra seca + tara	59.1	67.9	65.9	62.2	57.8	57.1	75	65.1	60.5
Peso del agua	9	8.9	8.6	10	8.4	8.4	10.6	10.7	8
Peso de tara	12.9	20.5	20.3	12.7	12.8	11.7	17.8	13.3	13.2
Peso de la muestra seca	46.20	47.40	45.60	49.50	45.00	45.40	57.20	51.80	40.16
Contenido humedad %	19.48	18.78	18.86	20.20	18.67	18.50	18.53	20.66	19.92
Promedio cont. Humedad	19.13	18.86		19.43	18.50		19.59	19.92	
Peso Unit. muestra seca	1.43	1.67		1.56	1.76		1.67	1.87	

EXPANSIÓN

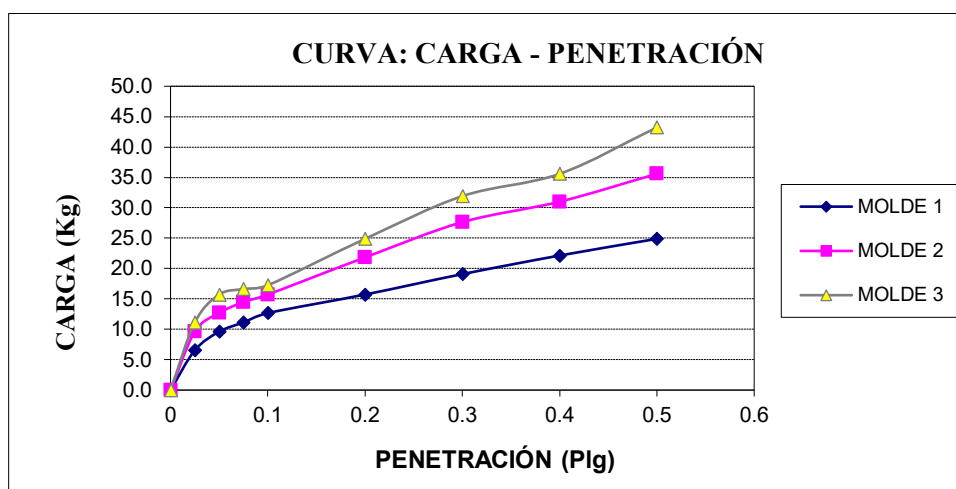
Hora	Tiempo en días	Molde N° 1			Molde N° 2			Molde N° 3			C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión			
		EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%		
10:50	1	21.80	0.00	0.00	22	0.00	0.00	22.09	0.00	0.00	0.9	1.426
10:52	2	23.07	0.13	1.10	23.25	0.13	1.07	25.59	0.35	3.01	1.2	1.560
10:52	3	28.9	0.71	6.17	29.06	0.71	6.07	30.65	0.86	7.37	1.3	1.673
10:55	4	39.95	1.82	10.26	33.85	1.19	10.18	33.05	1.10	9.44		

Penetración		Carga Normal	Molde Nº 1				Molde Nº 2				Molde Nº 3			
			C.b.r. correg				C.b.r. Correg				C.b.r. Correg			
			Carga ensayo				Carga ensayo				Carga ensayo			
Pulg.	Mm	Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0.0	0			0.0	0			0.0	0		
0.025	0.63		6.6	0.3			9.6	0.5			11.1	0.6		
0.05	1.27		9.6	0.5			12.7	0.7			15.7	0.8		
0.075	1.9		11.1	0.6			14.5	0.7			16.6	0.9		

0.1	2.54	1360	12.7	0.7		0.9	15.7	0.8		1.2	17.3	0.9		1.3
0.2	5.08	2040	15.7	0.8		0.8	21.8	1.1		1.1	24.9	1.3		1.2
0.3	7.62		19.1	1.0			27.6	1.4			31.9	1.6		
0.4	10.16		22.1	1.1			31.0	1.6			35.6	1.8		
0.5	12.7		24.9	1.3			35.6	1.8			43.2	2.2		

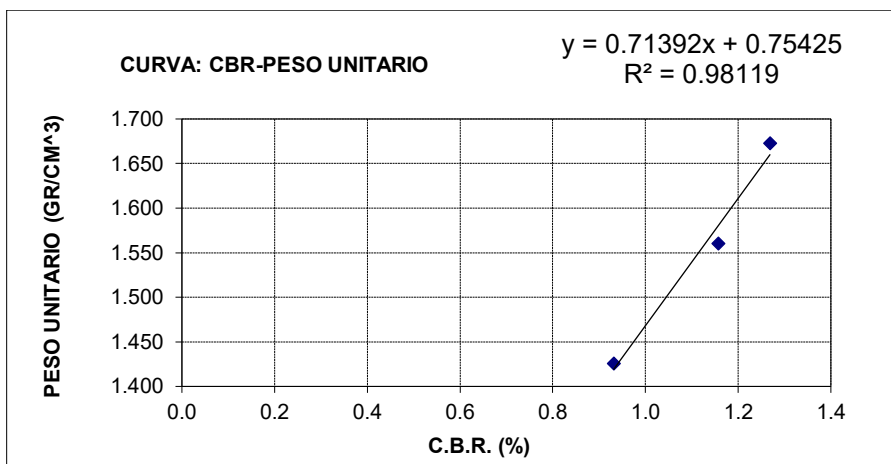
CBR 100% D.máx	
1.24	%
CBR 95% D.máx.	
1.13	%

Figura 52. Curva de Carga Vs Penetración de la muestra N°1



Fuente: Elaboración propia

Figura 53. CBR- Peso unitario



Fuente: Elaboración propia

ENSAYO: CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Zona: Constructor

Nº capas	5		5		5	
Nº golpes por capa	12		25		56	
Condición de muestra	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M
Peso muestra húm.+molde	11580	11735	12585	12685	12505	12775
Peso Molde	7270	7310	7995	8020	7960	7970
Peso muestra húmeda	4310	4425	4590	4665	4545	4805
Volumen de la muestra	2106	2106	2138	2138	2137	2137
Peso Unit. Muestra Húm.	2.046	2.101	2.147	2.182	2.127	2.248
Muestra de humedad	Fondo	Superf .	2" sup.	Fondo	Superf .	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	66.6	59.9	58.5	68.4	65.6	63.4
Peso muestra seca + tara	58.98	52.8	52.98	59.5	56.99	56.6
Peso del agua	7.62	7.1	5.52	8.9	8.61	6.8
Peso de tara	12.7	12.9	13.8	12.7	12.7	12.6
Peso de la muestra seca	46.28	39.90	39.18	46.80	44.29	44.00
Contenido humedad %	16.46	17.79	14.09	19.02	19.44	15.45
Promedio cont. Humedad	17.13		14.09	19.23		15.45
Peso Unit. muestra seca	1.75		1.84	1.80		1.89

Expansión

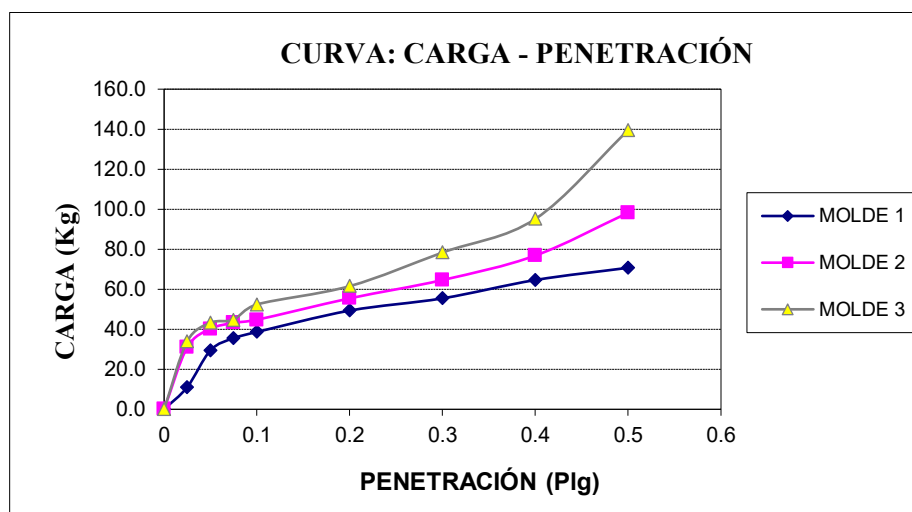
Hora	Tiempo en DIAS	Molde Nº 1			Molde Nº 2			Molde Nº 3		
		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión		Lect.	Expansión	
		Extens .	Cm.	%	Extens.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
10:48	1	25.65	0.00	0.00	15.63	0.00	0.00	24.51	0.00	0.00
10:40	2	27.82	0.22	1.85	16.55	0.09	0.78	25.05	0.05	0.46
10:45	3	28.2	0.26	2.17	16.98	0.14	1.15	25.56	0.11	0.90
10:55	4	28.53	0.29	2.46	17.25	0.16	1.38	25.9	0.14	1.20

C.B.R . %	Peso Unit. gr/cm 3
2.8	1.747
3.3	1.800
3.9	1.868

Penetración		Carga normal Kg	Molde N° 1				Molde N° 2				Molde N° 3			
Pulg.	Mm		Carga ensayo		C.B.R. corregí		Carga ensayo		C.B.R. corregí		Carga ensayo		C.B.R. corregí	
			Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0	0		0.0	0			0.0	0			0.0	0		
0.025	0.63		11.1	0.6			31.0	1.6			34.1	1.8		
0.05	1.27		29.5	1.5			40.2	2.1			43.2	2.2		
0.075	1.9		35.6	1.8			43.2	2.2			44.8	2.3		
0.1	2.54	1360	38.6	2.0		2.8	44.8	2.3		3.3	52.4	2.7		3.9
0.2	5.08	2040	49.3	2.5		2.4	55.5	2.9		2.7	61.6	3.2		3.0
0.3	7.62		55.5	2.9			64.6	3.3			78.4	4.0		
0.4	10.16		64.6	3.3			76.8	4.0			95.2	4.9		
0.5	12.7		70.7	3.7			98.2	5.1			139.5	7.2		

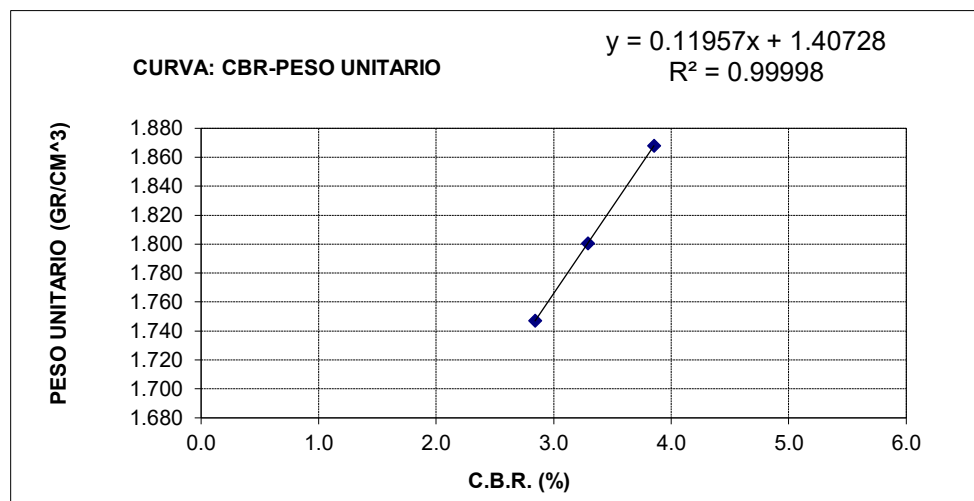
CBR 100% D.máx	
3.86	%
CBR 95% D.máx.	
3.08	%

Figura 54. Curva de Carga Vs Penetración de la muestra N°6



Fuente: Elaboración propia

Figura 55.CBR- Peso unitario



Fuente: Elaboración propia

Tabla 21. Resultados del ensayo C.B.R. sin aditivo

Zona de estudio	N°1: Barrio Fray Quebracho	N°6: Barrio Constructor
C.B.R. 95% de D. max	1.06	3.21
Expansión (%)	10.32	2.43

Fuente: Elaboración propia

4.3. Caracterización de la ceniza de rastrojo de maíz

4.3.1. Análisis de laboratorio

Para la información mostrada de la composición química de la ceniza de rastrojo de maíz se realizó en el departamento de La Paz del laboratorio de la UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS en la facultad de tecnología con el objetivo saber la cantidad del componente de dióxido de silicio.

Tabla 22. Análisis de laboratorio de la ceniza de rastro de maíz

Parámetros	Unidades	Resultados
SiO ₂	%	55,59

Fuente: Universidad Mayor de San Andrés (2023)



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
ACREDITADA INTERNACIONALMENTE POR UNIVERSIDADES DE CHILE Y EL SISTEMA UNIVERSITARIO NACIONAL



CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 29112023

MUESTRA: CENIZA DE RASTRAJO DE MAIZ
CLIENTE: HURTADO SEQUEIROS OLGA YENY
ANÁLISIS POR: SiO₂, dióxido de silicio
FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA: 27 DE NOVIEMBRE DEL 2023
FECHA DE ANÁLISIS: 28/11/2023

ANÁLISIS QUÍMICO		
PARÁMETROS	UNIDADES	RESULTADO
SiO ₂	%	55,59

La Paz, 29 de noviembre del 2023


JEFE DE ANÁLISIS QUÍMICO
Lic. Osvaldo Valenzuela



DIRECCIONES: Av. Arce N° 2295 - E-mail: ftdecano@correo.umsa.bo - Cajón Postal N° 6911 - Centrales: 2442527 - 2442598 - Fax: 2441992
CARRERAS: Aeronáutica: 2441154 - Construcciones Civiles: 2440953 - Electricidad Industrial: 2443538 - Electrónica y Telecomunicaciones: 2440764 - 2440105
Electromecánica: 2441098 - Mecánica Automotriz: 2441655 - Mecánica Industrial: 2408847 - 2443136 - Materias Básicas: 2408664
Química Industrial: 2441520 - Geodesia, Topografía y Geomática: 2441401 - Curso Pre Facultativo: 2408055 (Calle Potosí esq. Yanacocha)
UNIDADES: Dirección Administrativa: 2441599 - Dpto. Computación: 2444278 - Biblioteca y Kárex: 2441574 - Instituto de Investigaciones y Aplicaciones Tecnológicas: 2440973 - Unidad de Postgrado: Int. 49 - Administración: 2408186 (Calle Potosí) - UDI: 2445765

Figura 56. Consistencia de suelo incorporando ceniza de rastrojo de maíz



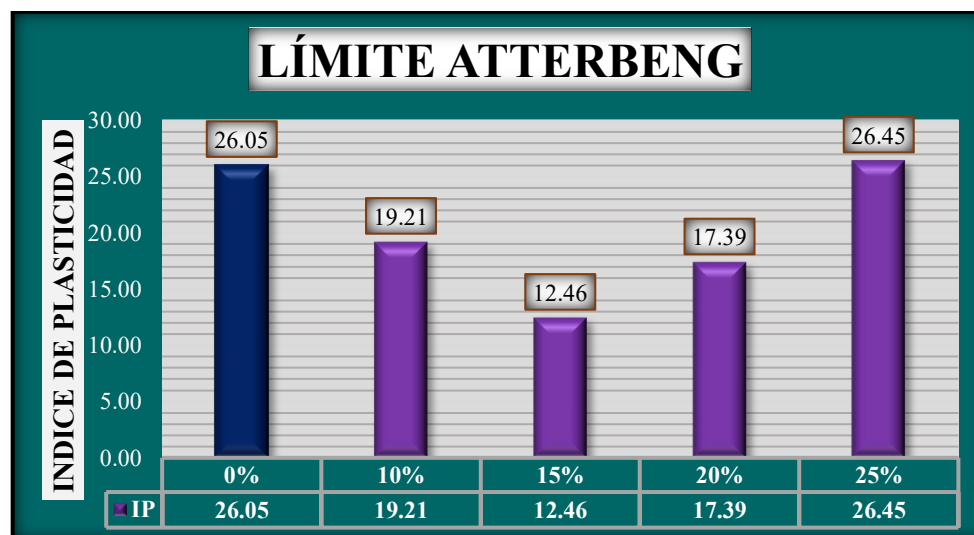
Fuente: Elaboración propia

Tabla 24. Resultados de L.L., L.P., e I.P. con la adición de ceniza a un suelo CH

Muestra	% de adición	LL	LP	IP
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	51.29	25.25	26.05
	10%	48.20	28.99	19.21
	15%	49.00	36.55	12.46
	20%	50.70	33.31	17.39
	25%	58.77	32.33	26.45

Fuente: Elaboración propia

Gráfica1. I.P. con ceniza de rastrojo de maíz en un suelo CH



Fuente: Elaboración propia

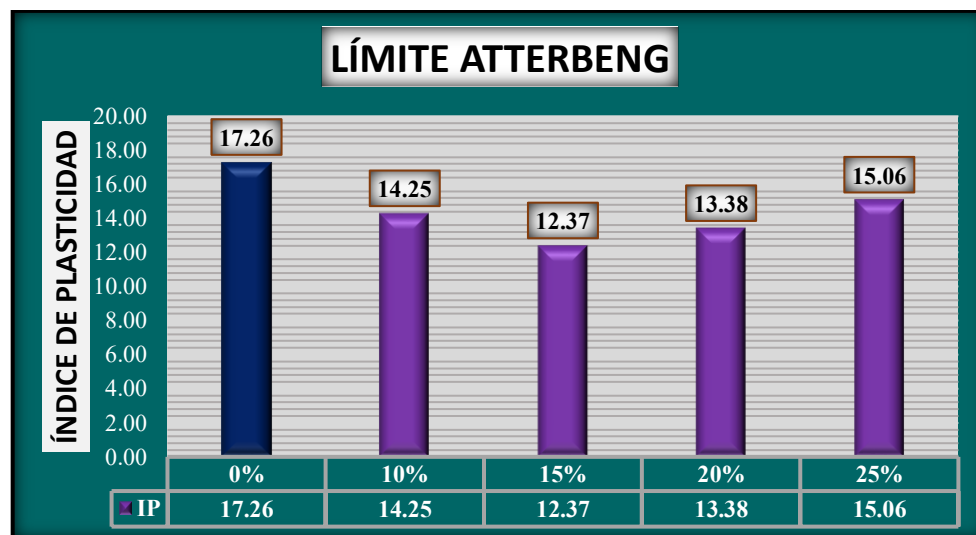
- Resultados del ensayo de límite de Atterberg para la zona del barrio Constructor

Tabla 25. Resultados de L.L., L.P., e I.P. con la adición de ceniza a un suelo CL

Muestra	% de adición	LL	LP	IP
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz	0%	31.62	14.36	17.26
	10%	34.34	20.08	14.25
	15%	37.16	24.79	12.37
	20%	34.14	20.76	13.38
	25%	38.24	23.19	15.06

Fuente: Elaboración propia

Gráfica2. Índice de plasticidad con ceniza de rastrojo de maíz en un suelo CL



Fuente: Elaboración propia

4.5. Compactación

Mediante el ensayo de Proctor Modificado para la zona de estudio se pudo realizar la relación de la máxima densidad seca y el óptimo contenido humedad de suelos arcillosos con la adición de cenizas de rastrojo de maíz.

Ejemplo para sacar el valor del peso del suelo natural y de la ceniza de rastrojo de maíz

2000g de suelo natural ————— 100%
X ————— 10% de adición de ceniza
X=200g de ceniza
2000g -20g=**1800g de suelo natural**

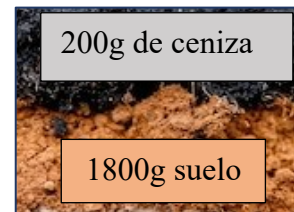


Tabla 26. Pesos en diferentes % con la adición de ceniza de rastrojo de maíz

% de adición	Detalles	Pesos para la práctica de laboratorio	
		Suelo natural	Ceniza de rastrojo de maíz
0	Suelo natural 100%.	2000g	-
10	90% de suelo natural ,10% ceniza de rastrojo de maíz.	1800g	200g
15	85% de suelo natural ,15% ceniza de rastrojo de maíz.	1700g	300g
20	80% de suelo natural ,20% ceniza de rastrojo de maíz.	1600g	400g
25	75% de suelo natural ,25% ceniza de rastrojo de maíz.	1500g	500g

Fuente: Elaboración propia

Figura 57. Ensayo de compactación incorporando ceniza de rastrojo de maíz



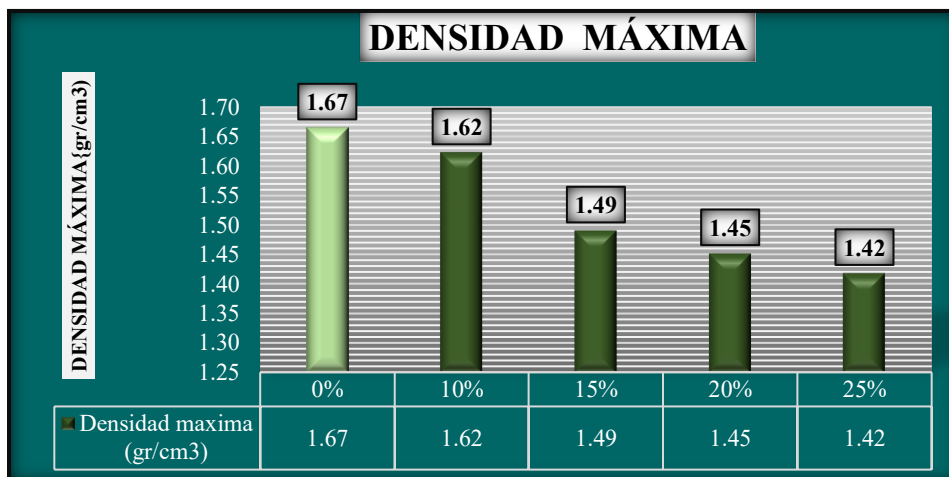
Fuente: Elaboración propia

Tabla 27. Resultados de la compactación incorporando ceniza en un suelo CH

Muestra	% de adición	Compactación	
		Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	1.67	18.51
	10%	1.62	18.41
	15%	1.49	21.95
	20%	1.45	23.98
	25%	1.42	25.93

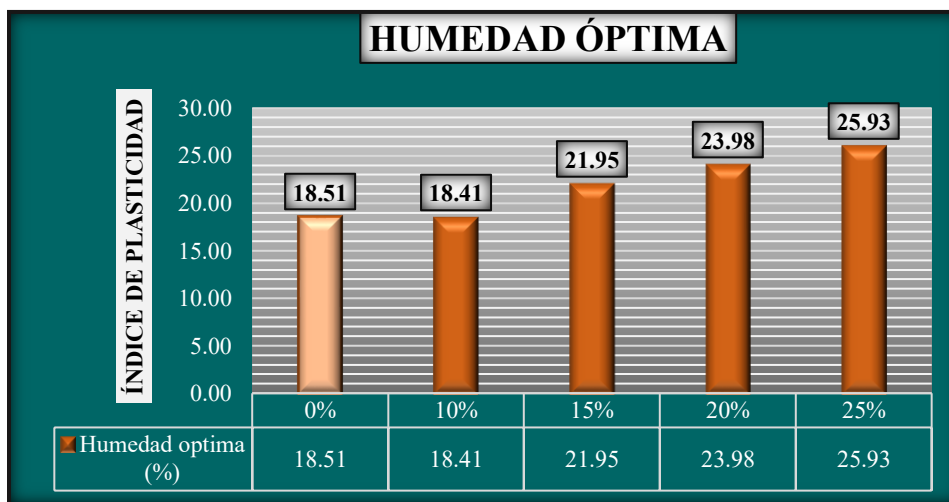
Fuente: Elaboración propia

Gráfica3. Densidad máxima con incorporación de ceniza en un suelo CH



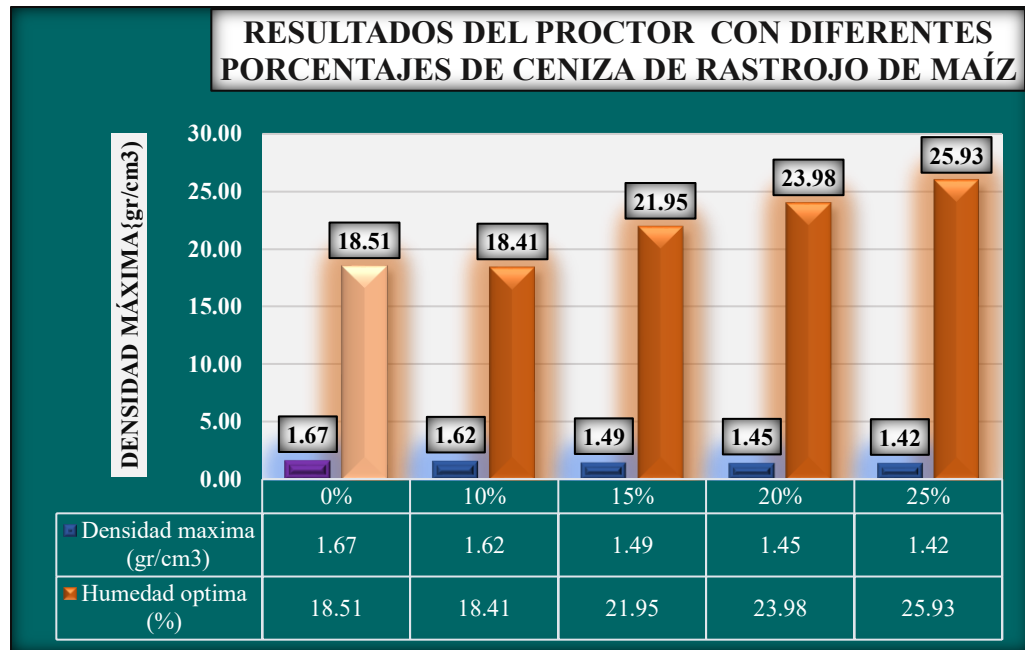
Fuente: Elaboración propia

Gráfica4. Humedad óptima con la incorporación de ceniza del suelo CH



Fuente: Elaboración propia

Gráfica5. Densidad máxima seca / Humedad óptima.



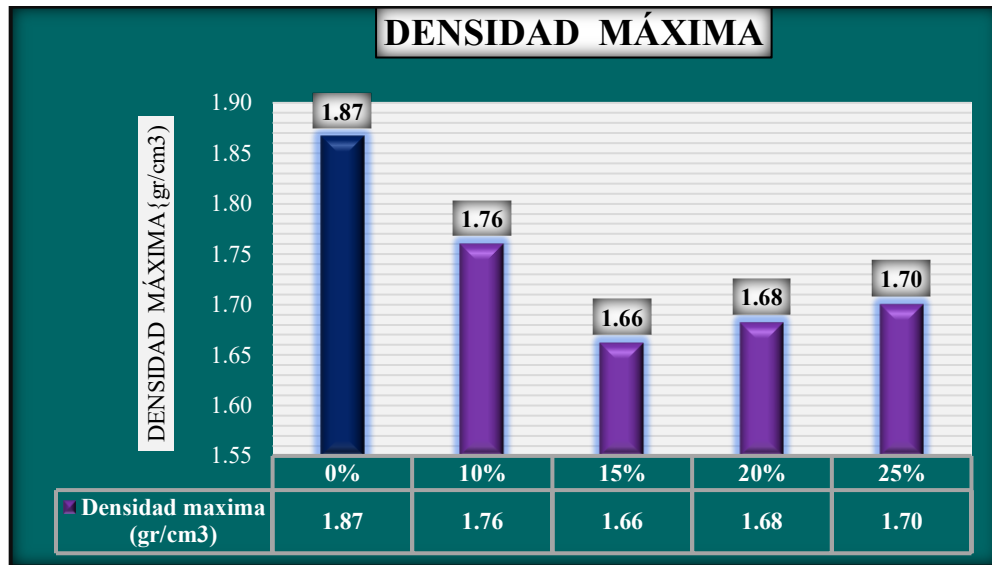
Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. Resultados del ensayo de compactación de la zona del Barrio Constructor

Muestra	% de adición	Compactación	
		Densidad máxima (gr/cm3)	Humedad óptima (%)
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	1.87	13.44
	10%	1.76	15.29
	15%	1.66	18.37
	20%	1.68	17.77
	25%	1.70	17.63

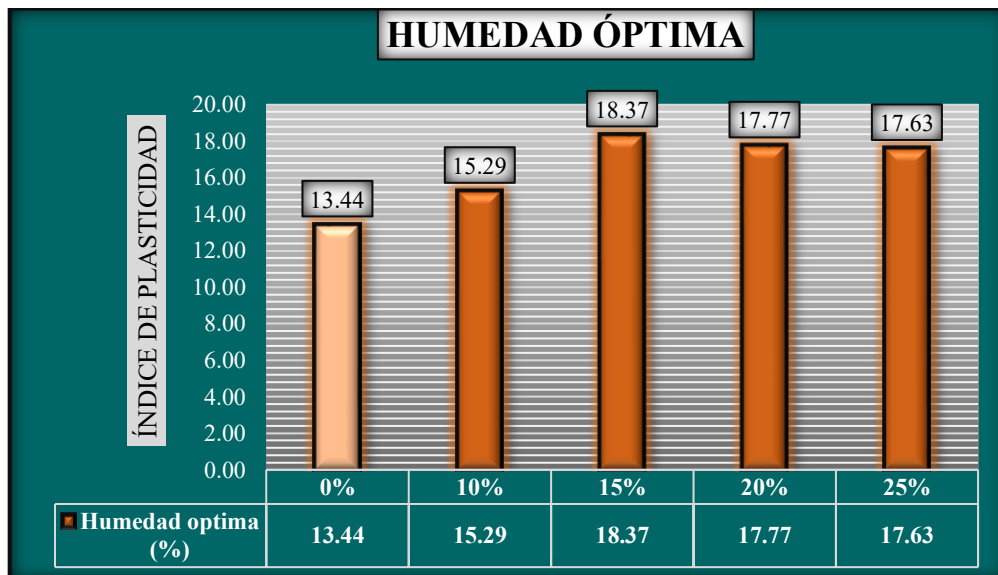
Fuente: elaboración propia

Gráfica6. Densidad máxima por Ceniza de rastrojo de maíz en (%) de la M6



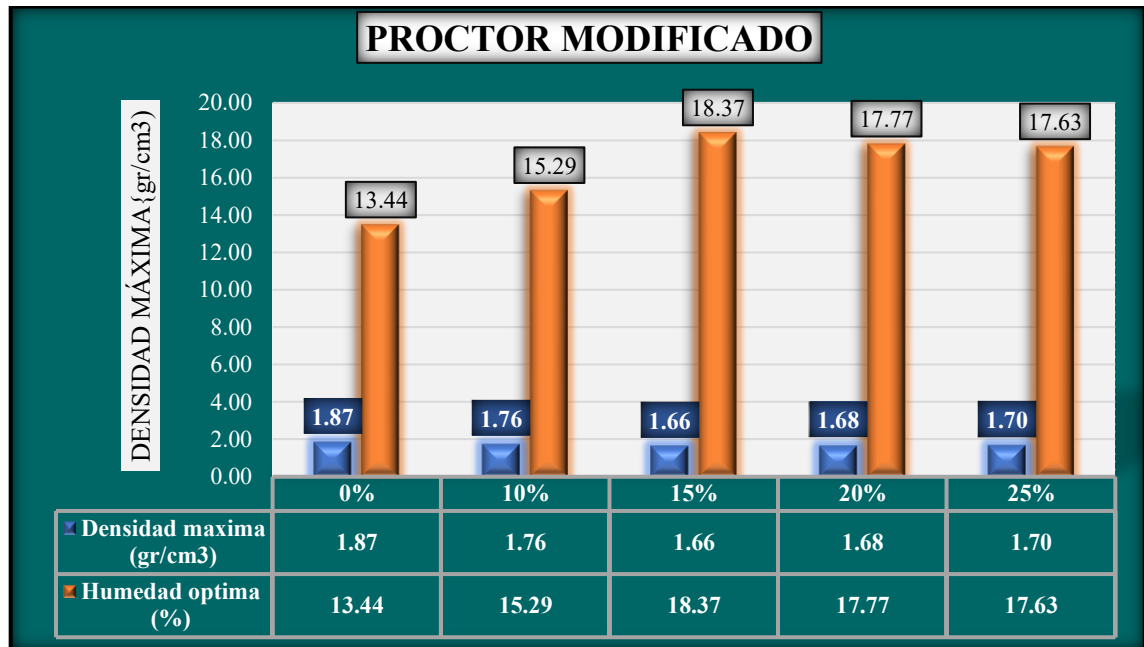
Fuente: Elaboración propia

Gráfica7. Óptima humedad con cenizas de rastrojo de maíz en % de la M6



Fuente: Elaboración propia

Gráfica8. Densidad máxima seca / Humedad óptima.



Fuente: Elaboración propia

4.6. C.B.R. y Expansión

Figura 58. Ensayo del CBR incorporando ceniza de rastrojo de maíz



Fuente: Elaboración propia

Ejemplo para sacar el valor del peso del suelo natural y de la ceniza de rastrojo de maíz

5000g de suelo natural ————— 100%
X ————— 10% de adición de ceniza
X=500g de ceniza
5000g -500g=4500g de suelo natural

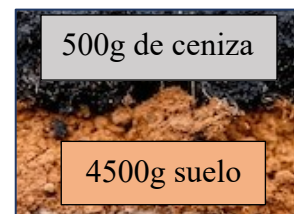


Tabla 29. Pesos en diferentes porcentajes incorporando ceniza de rastrojo de maíz

% de adición	Detalles	Pesos para la práctica de laboratorio	
		Suelo natural	Ceniza de rastrojo de maíz
0	Suelo natural 100%.	5000g	-
10	90% de suelo natural ,10% ceniza de rastrojo de maíz.	4500g	500g
15	85% de suelo natural ,15% ceniza de rastrojo de maíz.	4250g	750g
20	80% de suelo natural ,20% ceniza de rastrojo de maíz.	4000g	1000g
25	75% de suelo natural ,25% ceniza de rastrojo de maíz.	3750g	1250g

Fuente: Elaboración propia

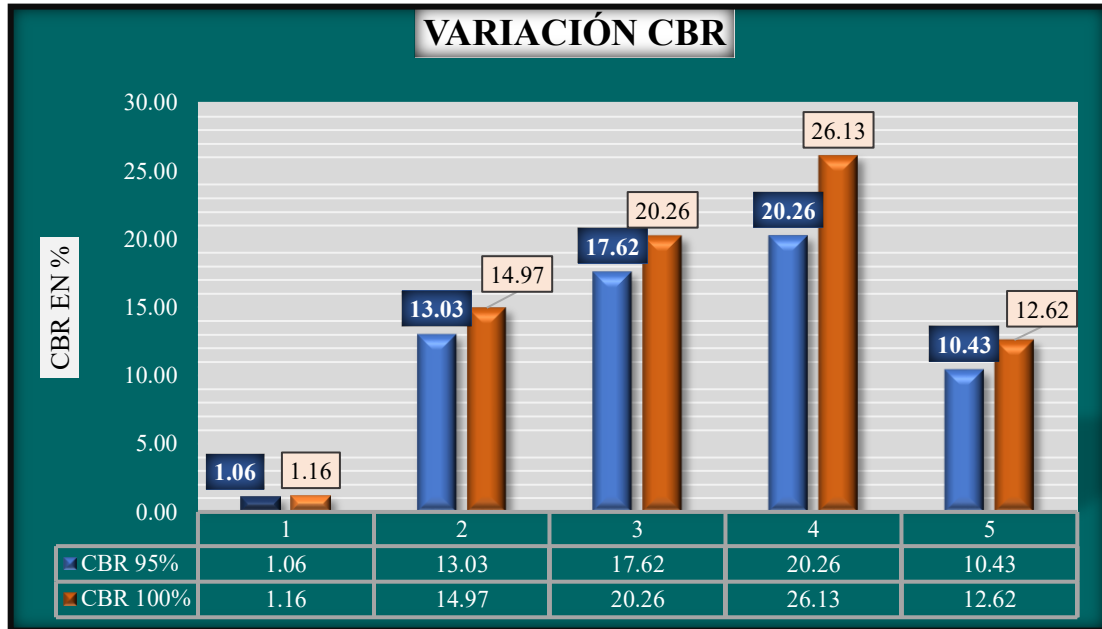
Resultados del ensayo de CBR para la zona del Barrio Fray Quebracho

Tabla 30. Resultados de % de CBR y expansión con ceniza del suelo CH

Muestra	% de adición	CBR		Expansión (%)		
		CBR 95%	CBR 100%	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	1.06	1.16	10.32	10.18	9.26
	10%	13.03	14.97	3.35	3.18	2.27
	15%	17.62	20.26	2.63	2.34	1.49
	20%	20.26	26.13	4.17	4.05	2.48
	25%	10.43	12.62	1.44	1.15	0.34

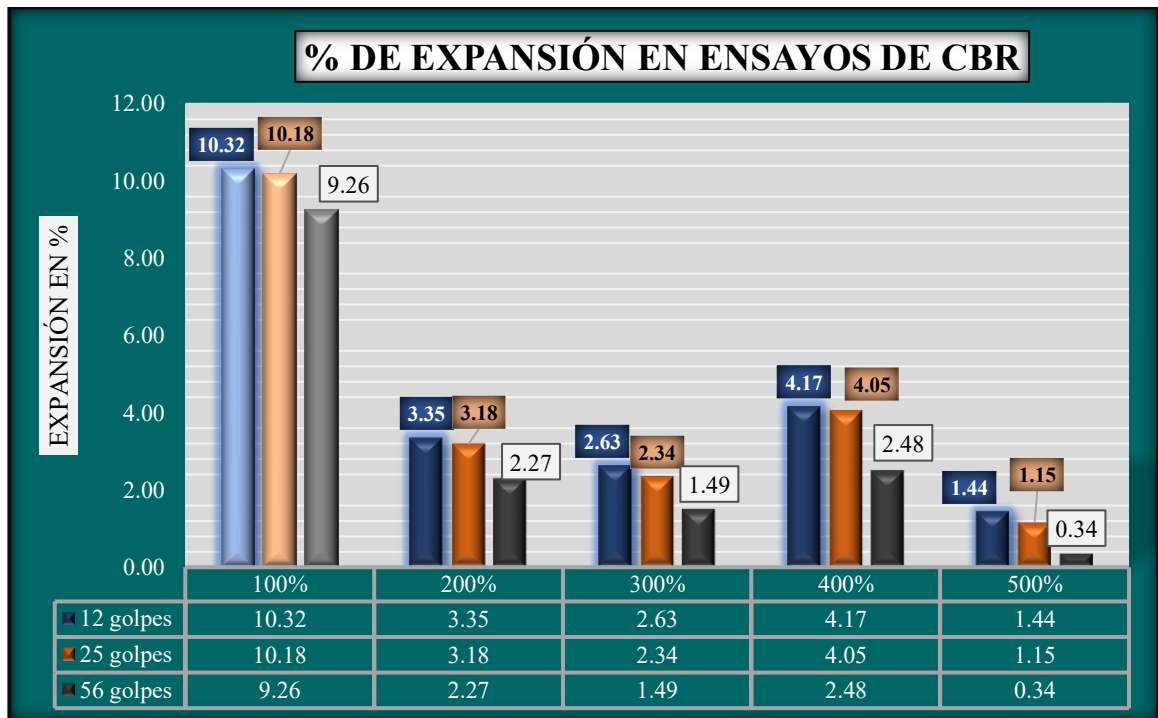
Fuente: Elaboración propia

Gráfica9. CBR al 95%y 100% con ceniza en (%)-suelo CH



Fuente: Elaboración propia

Gráfica10. Expansión con ceniza de rastrojo de maíz (%) -suelo CH



Fuente: Elaboración propia

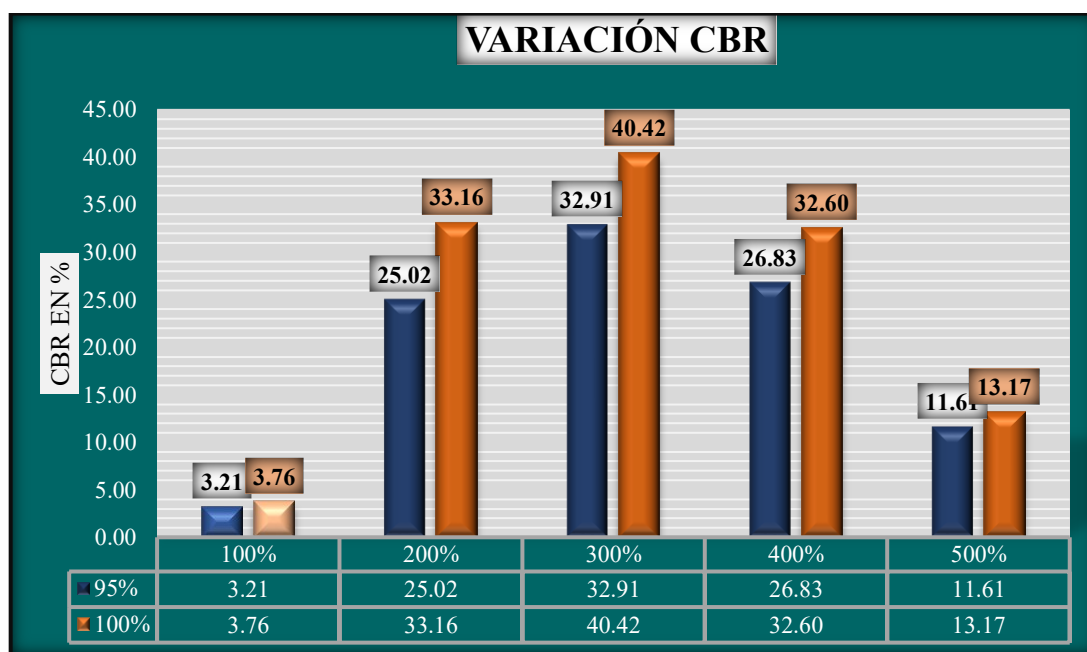
Resultados del ensayo de CBR para la zona del Barrio Constructor

Tabla 31. Resultados de % de CBR y expansión con ceniza de rastrojo de maíz -M6

Muestra	% de adición	CBR		Expansión (%)		
		95%	100%	12 golpes	25 golpes	56 golpes
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	3.21	3.76	2.43	1.29	1.18
	10%	25.02	33.16	1.62	0.96	0.53
	15%	32.91	40.42	0.37	0.32	0.12
	20%	26.83	32.60	1.92	1.57	1.22
	25%	11.61	13.17	1.17	1.12	1.08

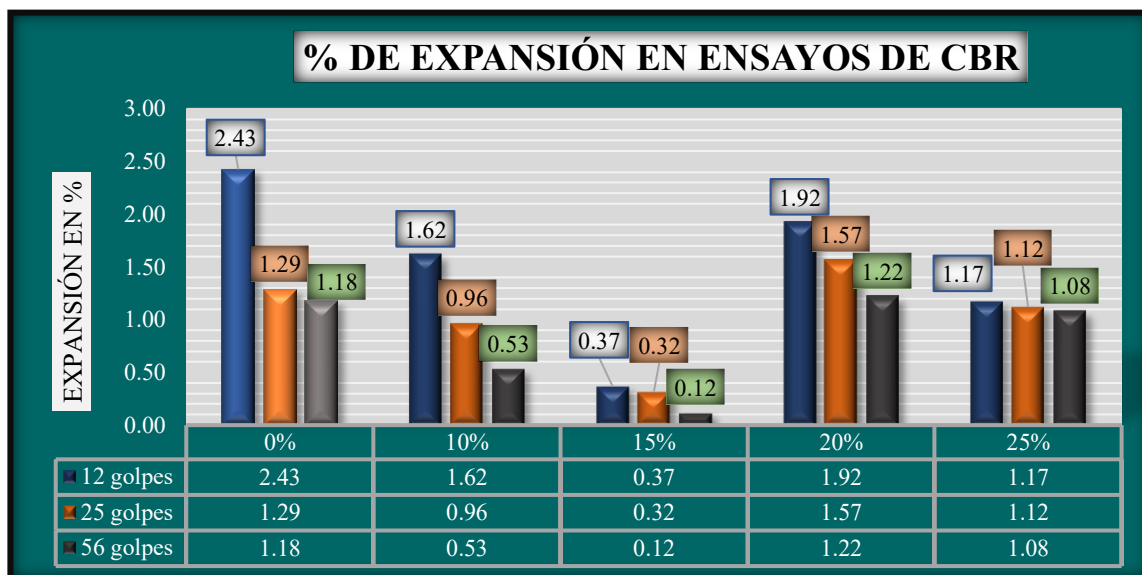
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 11. CBR al 95% y 100% con ceniza en (%) -suelo CH



Fuente: Elaboración propia

Gráfica12. Expansión con ceniza de rastrojo de maíz (%) -suelo CL



Fuente: Elaboración propia

4.7. Justificación del número de muestras

Se realizaron 30 ensayos CBR: 6 en suelos naturales (3 CH y 3 CL) y 24 en suelos estabilizados (3 ensayos por cada porcentaje de ceniza —10%, 15%, 20% y 25%— para ambos tipos de suelo).

Tabla 32. Planilla de número de muestra del CBR

Condición del suelo	Porcentaje de ceniza	Tipo de ceniza	Número de ensayo del CBR
Suelo natural.	0%	CH	3
		CL	3
Suelo estabilizado con ceniza.	10%	CH	3
		CL	3
	15%	CH	3
		CL	3
	20%	CH	3
		CL	3
	25%	CH	3
		CL	3
Total	-		30

Fuente: Elaboración propia

Este número permite obtener resultados confiables, comparar el comportamiento del suelo con y sin estabilización, y determinar el porcentaje óptimo de ceniza. Además, se asegura la representatividad ante la variabilidad del suelo y se mejora la calidad del análisis técnico.

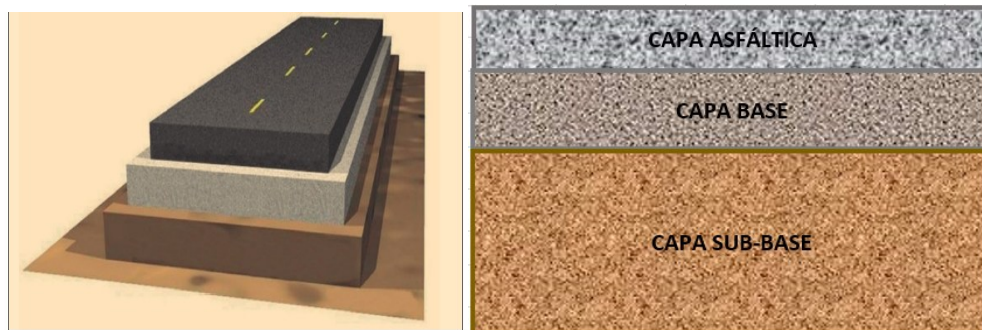
4.8. Diseño de espesores método AASTHO 93

Se diseñó los espesores de toda la carpeta estructural de un pavimento flexible (capa sub base, capa base y capa asfáltica) de acuerdo al método AASTHO 93.

El estudio del tráfico fue adquirido de la microempresa Gareca perteneciente a la Administradora Boliviana de Carreteras.

Se realizó el diseño del paquete estructural con suelo natural utilizando suelos arcillosos de tipo CH y CL; también con el efecto de la ceniza con porcentajes de 20 % de ceniza para un suelo CH y un porcentaje de 10 % para un suelo CL.

Figura 59. Paquete estructural



Fuente: Elaboración propia

Tabla 33. Diseño de espesores

Tipo de suelo	CBR (%)	Altura total	Diseño de espesores (cm)		
			Capa subbase	Capa base	Capa asfáltica
Suelo natural (CH).	1,06	116,00	91,00	15,00	10,00
Suelo mejorado con 20% de ceniza	20,26	40,00	20,00	10,00	10,00
Suelo natural (CL)	3,21	73,00	48,00	15,00	10,00
Suelo mejorado con 10% de ceniza	25,02	45,00	25,00	10,00	10,00

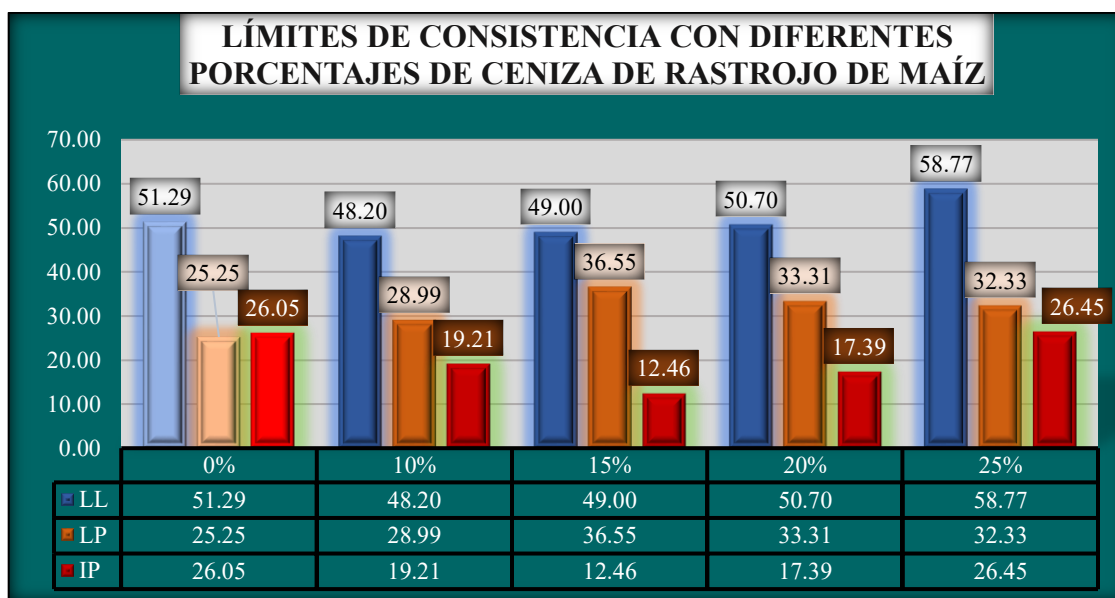
Fuente: Elaboración propia

4.9. Análisis de resultados

4.9.1. Análisis de resultados de los límites de consistencia incorporando ceniza

Gráfica13. Influencia de la ceniza en los límites de consistencia en un suelo

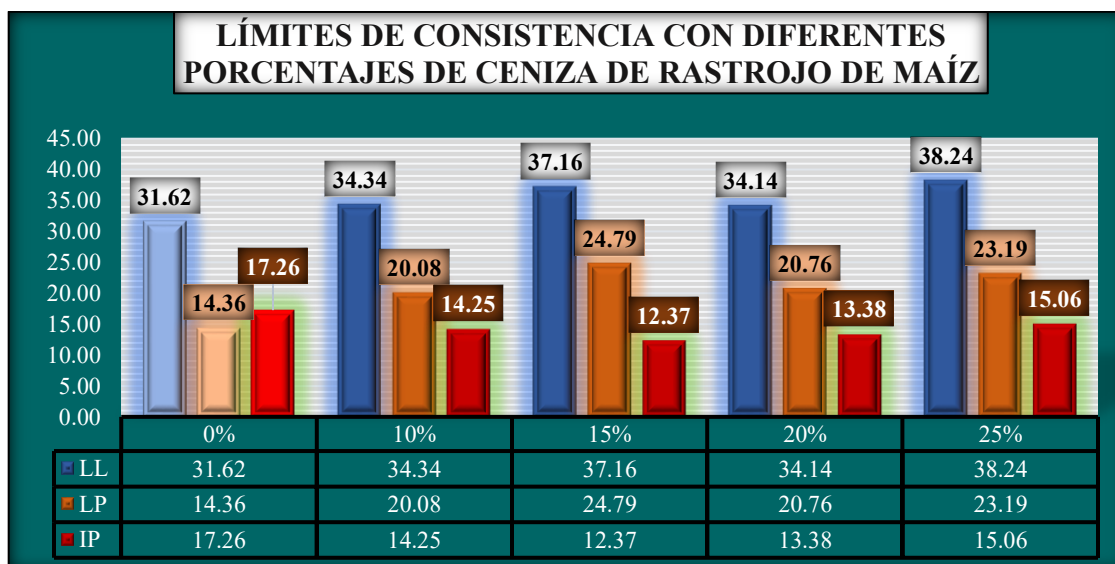
CH



Fuente: Elaboración propia

Gráfica14. Influencia de la ceniza en los límites de consistencia en un suelo

CL



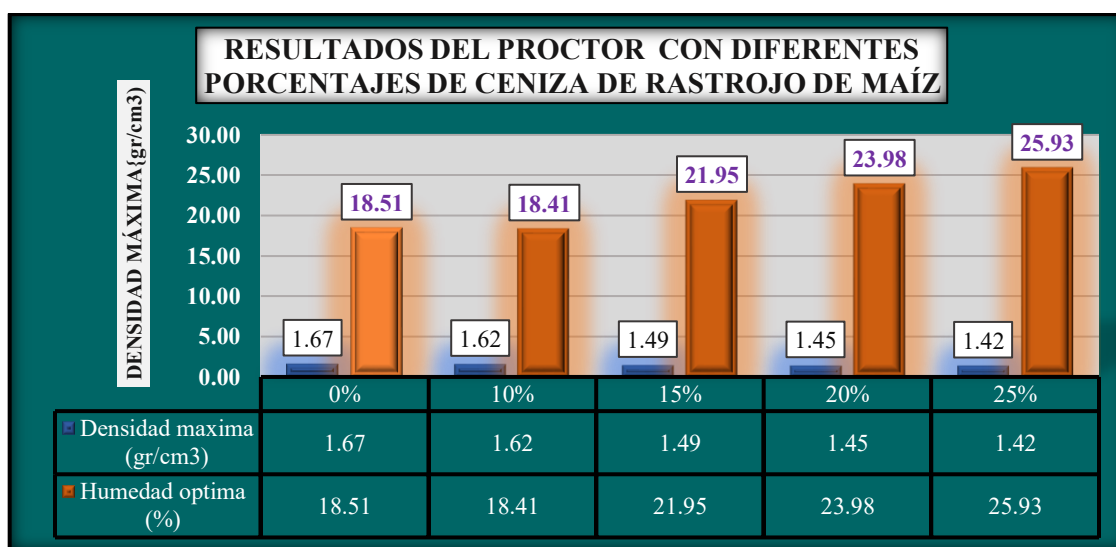
Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la muestra 1 que es un CH se puede ver en la (grafica13) como influye en los diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz en el límite líquido (color azul) tuvo un decremento hasta el 20% en comparación con el suelo natural y vuelve a ascender en el 25%. En la muestra 6 que es un CL se puede observar en la (grafica14) como el límite líquido (color azul) va en ascenso hasta el 15% y desciende en el 20%. Mientras que en el límite plástico (color naranja) en la muestra 1 va aumentando hasta el 15% y desciende en el 20%. En la muestra 6 se puede ver en la (grafica 14) como el límite plástico (color naranja) asciende hasta el 15% y desciende en el 20%.

Por otro lado, se puede observar en ambas graficas que el límite líquido muestra comportamientos distintos en los dos tipos de suelos (CH y CL) al agregarles ceniza de rastrojo de maíz porque la ceniza interactúa con los minerales arcillosos de cada suelo de manera diferente, alterando más significativamente la capacidad de absorción de agua y la estructura de cada tipo de suelo de forma distinta, afectando su comportamiento fluido. Pero son similares su comportamiento en el límite plástico al agregarles ceniza de rastrojo de maíz eso es porque la deformación plástica depende principalmente de las interacciones básicas entre las partículas de arcilla y el agua.

4.9.2. Análisis de resultados en compactación incorporando ceniza

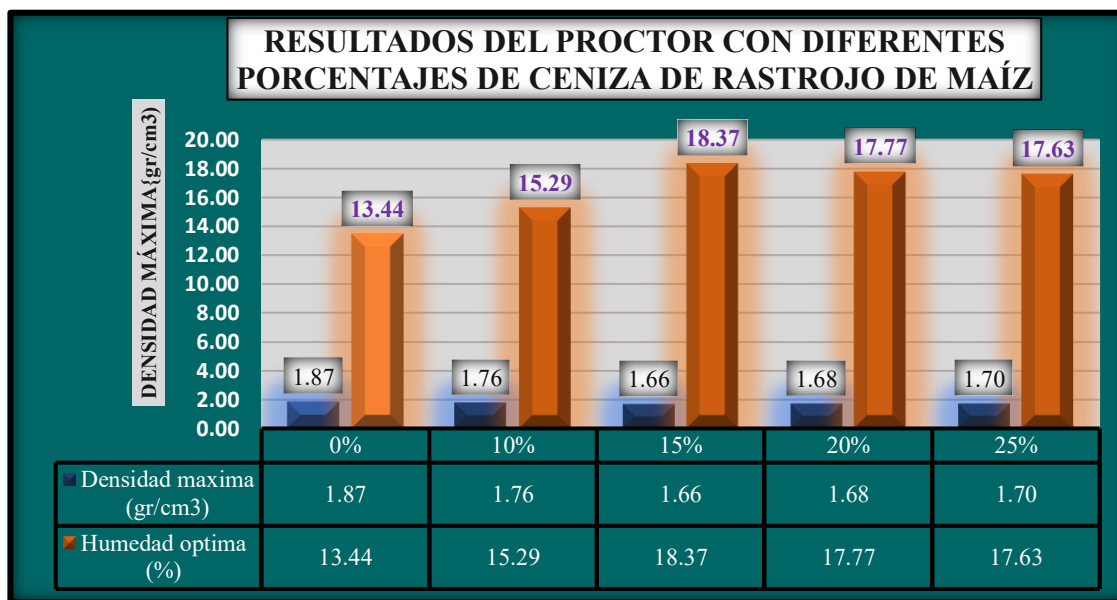
Gráfica15. Compactación en diferentes porcentajes de ceniza en un suelo CH



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 15 se puede ver la influencia que tiene diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz, se puede observar que va en descenso la densidad, del 1,67 gr/cm³ al 1,42 gr/cm³ y un aumento de humedad optima del 18,51% al 25,93% incorporando 25% de ceniza.

Gráfica 16. Compactación en diferentes porcentajes de ceniza en un suelo CL



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 16 se puede observar un descenso de la densidad de 1,87 gr/cm³ a 1.70 gr/cm³ con la adición 25% de ceniza. Y con un aumento de la humedad optima 13.44% al 18,37% con la adición del 15% de ceniza. También se puede ver que en el 20% de ceniza, la humedad sigue descendiendo, pero la densidad baja.

Viendo las dos graficas de los suelos (CH y CL) se puede observar que la densidad disminuye esto es porque la ceniza contiene partículas finas y ligeras que se mezcla con el suelo, aumenta la porosidad y mejora la estructura del suelo, haciéndolo menos compacto. El contenido de humedad aumenta porque la ceniza mejora la capacidad del suelo para retener agua al crear más espacios porosos y aportar minerales que favorecen esta retención.

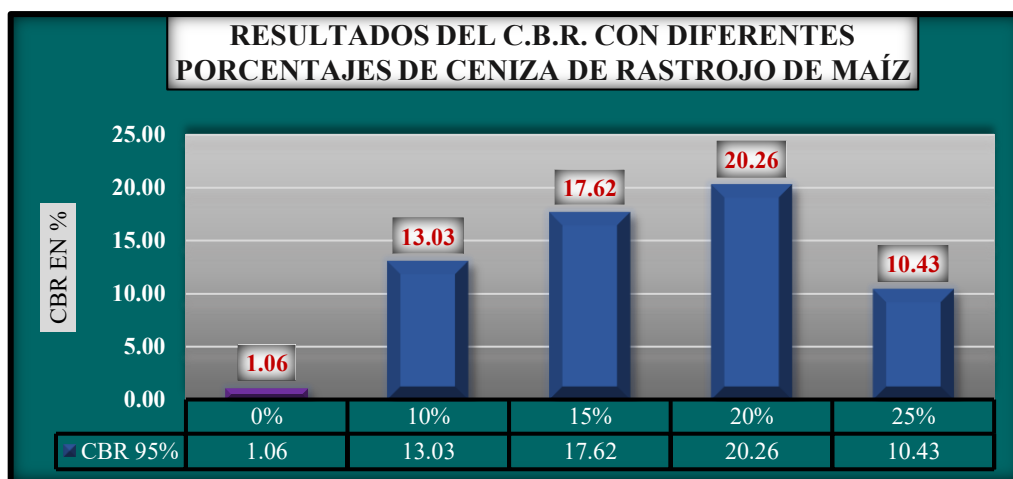
4.9.3. Análisis de resultados en el CBR incorporando ceniza de rastrojo de maíz

Tabla 34. Clasificación cualitativa del suelo valores de CBR

C.B.R.	Clasificación
0-5	Subrasante muy mala.
05-10	Subrasante mala.
10-20	Subrasante regular a buena.
20-30	Subrasante muy buena
30-50	Subbase buena.
50-80	Base buena.
80-100	Base muy buena.

Fuente: Edovago, 2012

Gráfica17. Influencia de ceniza en el C.B.R. en un suelo CH



Fuente: Elaboración propia

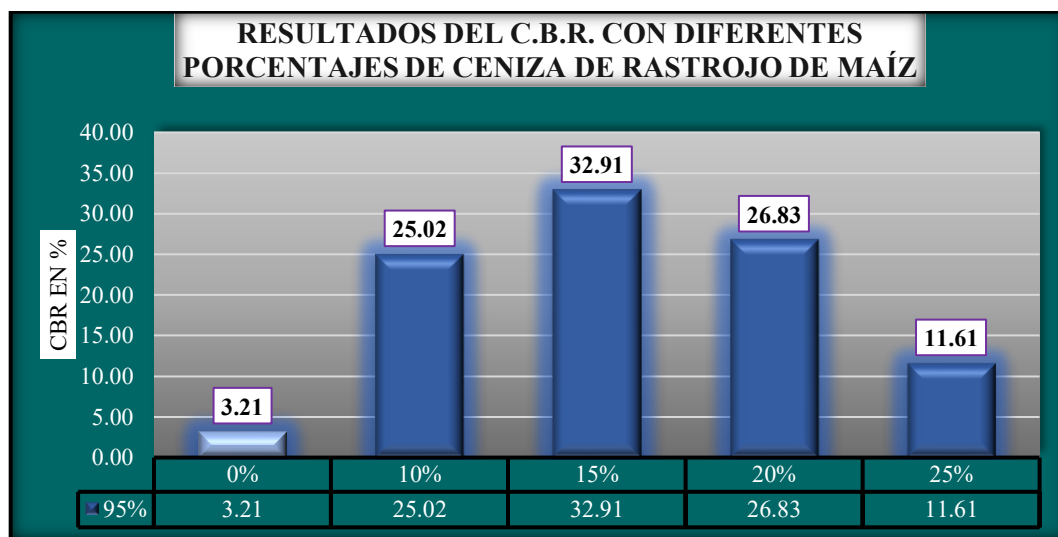
En la gráfica 17 se presentan en cómo influye la ceniza de rastrojo de maíz en los valores del C.B.R. al 95%, donde se puede ver un incremento del 19.2% haciendo notar mejoría en el suelo incorporando un 20% de ceniza, haciendo una comparación entre suelo natural que tiene un CBR del 1,03% y agrando ceniza al 20% un C.B.R. de 20.26%. también se puede observar un descenso si continuamos añadiendo ceniza.

Tabla 35. Clasificación cualitativa del suelo valores de CBR

C.B.R.	Clasificación
0-5	Subrasante muy mala.
05-10	Subrasante mala.
10-20	Subrasante regular a buena.
20-30	Subrasante muy buena
30-50	Subbase buena.
50-80	Base buena.
80-100	Base muy buena.

Fuente: Edovago, 2012

Gráfica 18. Influencia de ceniza de rastrojo de maíz en el C.B.R. de un suelo CH

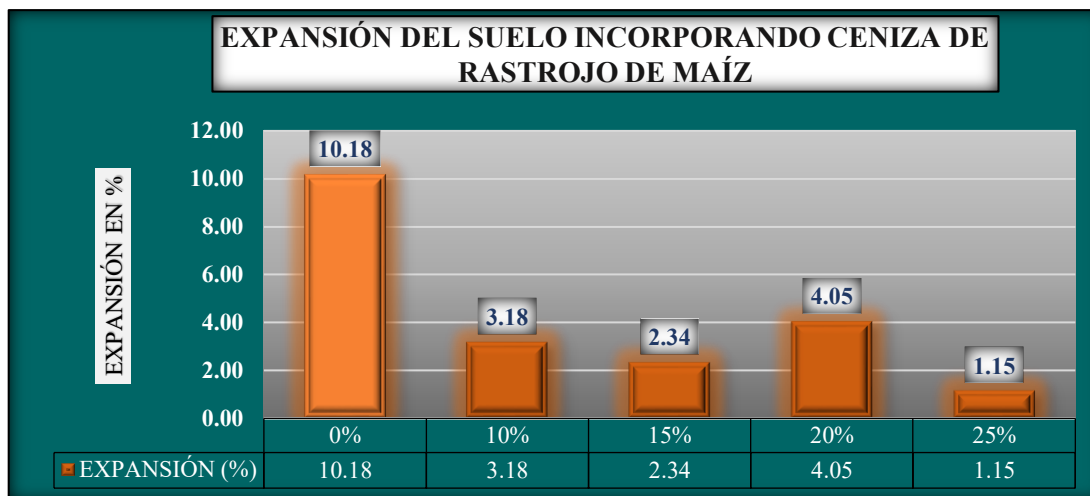


Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica 18 los resultados del C.B.R. al 95% donde se percibe que el suelo natural tiene un C.B.R. del 3.21% y con la adición del 10 % ceniza de rastrojo de maíz incrementa a un 25,02%, también se puede captar que sigue incrementando el C.B.R. hasta la adición del 15% y a los 20% surge un descenso, por tanto, ya no aporta en su resistencia. El suelo con la adición del 10% de ceniza es suficientemente fuerte, estable y tiene la resistencia adecuada para ese propósito específico.

4.7.4. Análisis de la expansión incorporando ceniza de rastrojo de maíz

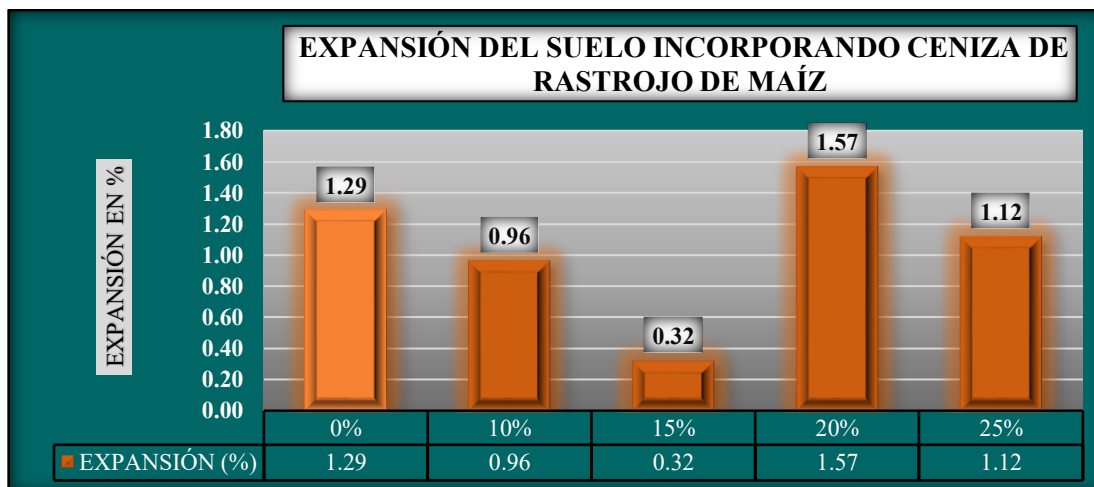
Gráfica19. Expansión del suelo CH incorporando ceniza de rastrojo de maíz



Fuente: Elaboración propia

Se observa en la gráfica 19 que a medida que se va incorporando diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz en el suelo natural, la expansión va disminuyendo, en el suelo natural tiene una expansión de 10,18% y al con la incorporación un porcentaje de 15% de ceniza reduce un 2.34%.

Gráfica20. Expansión del suelo CL incorporando ceniza de rastrojo de maíz



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 20 se puede observar las expansiones incorporando diferentes porcentajes de ceniza de rastrojo de maíz en el suelo natural (CL) y reduce 1,29 % a 0,32% con la incorporación de un porcentaje de 15%.

4.8. Análisis estadístico

Tabla 36. Análisis estadístico del CBR del suelo CH

Muestra	% de adición	CBR
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	1.16
	0%	1.21
	0%	0.81
	10%	12.68
	10%	13.18
	10%	13.24
	15%	17.78
	15%	17.34
	15%	17.73
	20%	20.51
	20%	19.97
	20%	20.31
	25%	10.23
	25%	10.31
	25%	10.74
Media aritmética		12.48
Mediana		13.18
Varianza		47.60
Desviación estándar		6.90
Coeficiente de varianza (%)		55.28

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

$$X = 12.48$$

Desviación

Ejemplo con el primer valor (1.16):

$$X - \bar{X} = 1.16 - 12.48 = -11.32$$

Varianza

$$s^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{666.35}{14} = 47.60$$

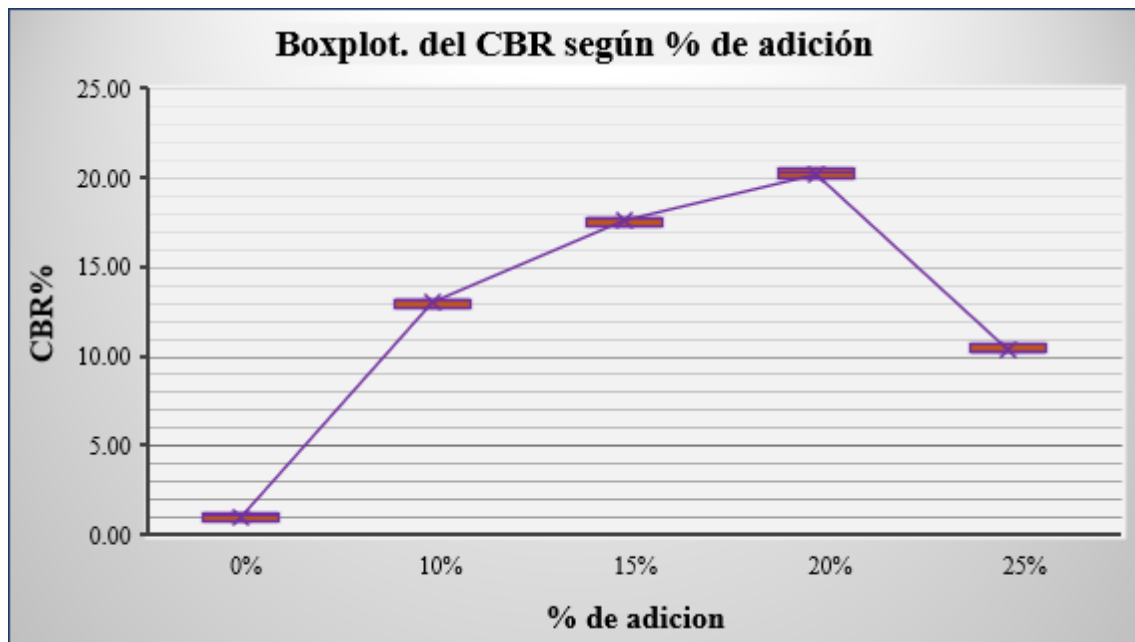
Desviación estándar

$$s = \sqrt{47.60} = 6.90$$

Coefficiente de varianza

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100 = \frac{6.90}{12.48} * 100 = 55.28\%$$

Gráfica21. Boxplot. del CBR según % de adición



Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico muestra que los datos están bien agrupados por cada porcentaje (ver boxplot).

Aunque el coeficiente de variación es alto 55.28%, esto se debe a la gran diferencia entre el suelo natural y los suelos tratados, no a errores de medición. Esta variación es esperada en un ensayo comparativo con tratamientos.

Tabla 37. Análisis estadístico del CBR del suelo CL

Muestra	% de adición	CBR
Suelos arcillosos + cenizas de rastrojo de maíz.	0%	3.39
	0%	3.06
	0%	3.20
	10%	23.65
	10%	25.72
	10%	25.70
	15%	32.83
	15%	33.17
	15%	32.73
	20%	26.55
	20%	26.76
	20%	27.17
	25%	10.63
	25%	11.97
	25%	12.23
Media aritmética.		19.92
Mediana.		25.70
Varianza.		126.90
Desviación estándar.		11.26
Coeficiente de varianza (%).		56.56

Fuente: Elaboración propia

Media aritmética

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x$$

$$X = 19.92$$

Desviación

Ejemplo con el primer valor (3.39):

$$X - \bar{X} = 3.39 - 19.92 = -11.32$$

Varianza

$$s^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{666.35}{14} = 126.90$$

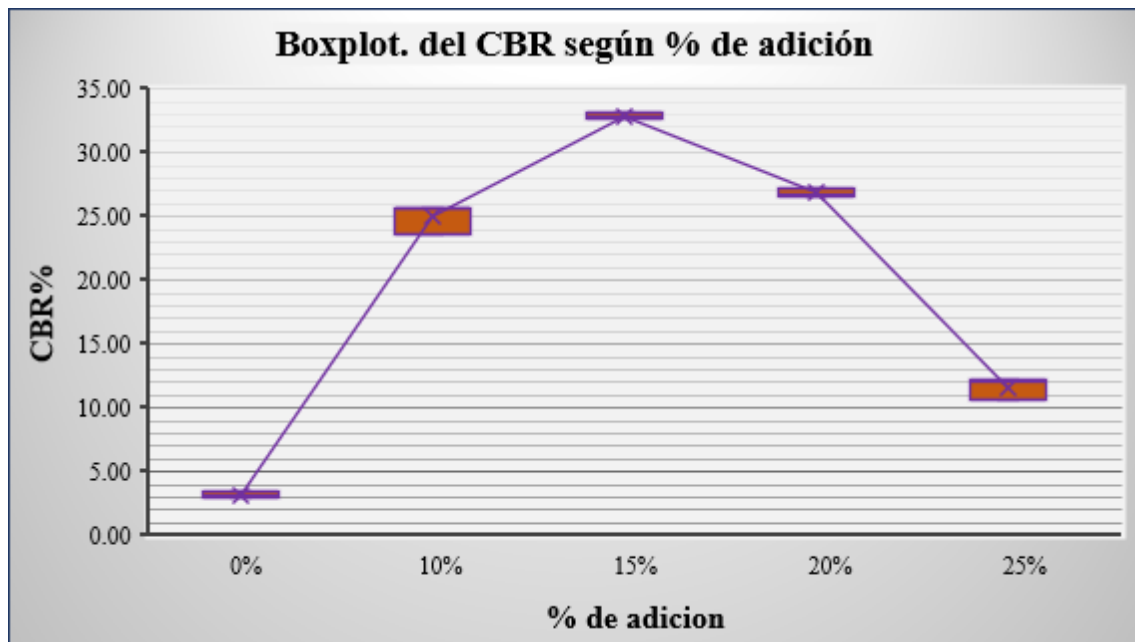
Desviación estándar

$$s = \sqrt{126.90} = 11.26$$

Coefficiente de varianza

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100 = \frac{11.26}{19.92} * 100 = 56.56\%$$

Gráfica22.Boxplot. del CBR según % de adición



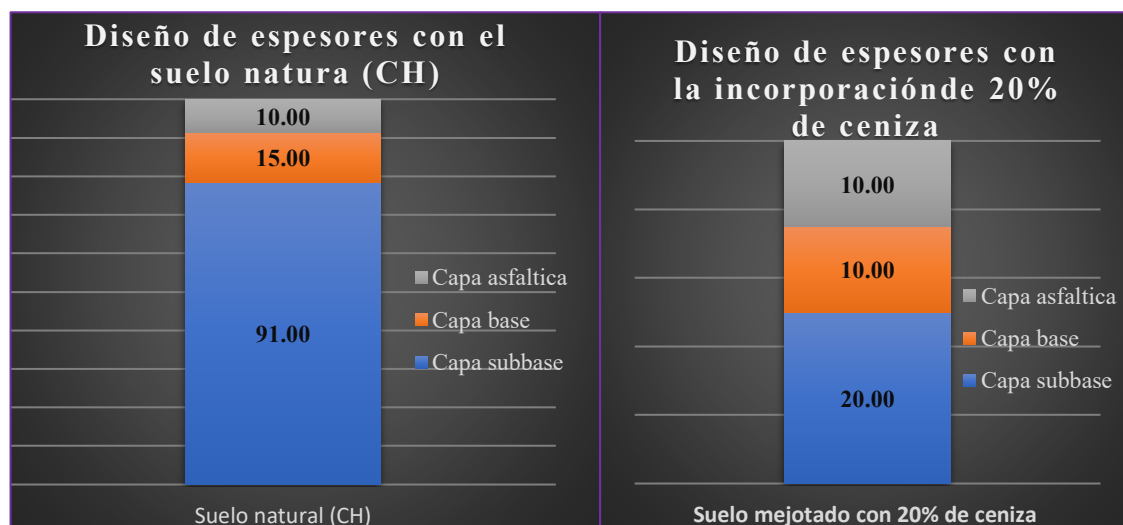
Fuente: Elaboración propia

El análisis estadístico muestra que los datos están bien agrupados por cada porcentaje (ver boxplot)

Aunque el coeficiente de variación es alto 56.56%, esto se debe a la gran diferencia entre el suelo natural y los suelos tratados, no a errores de medición. Esta variación es esperada en un ensayo comparativo con tratamientos.

4.9. Análisis de resultados de espesores

Gráfica23. Diseño de espesores del barrio Fray Quebracho (CH)



Fuente: Elaboración propia

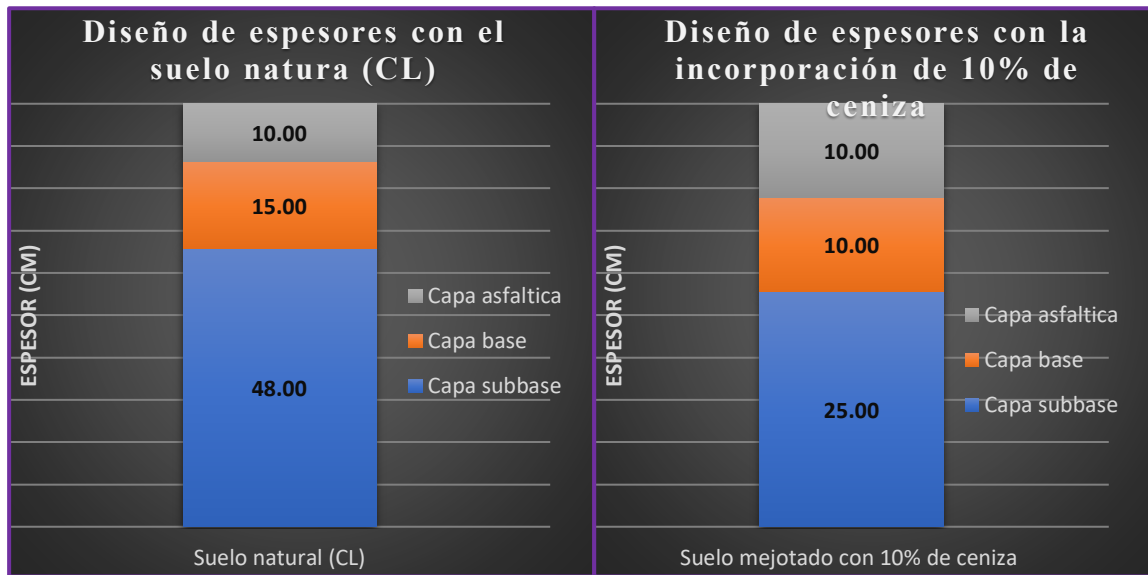
En la Gráfica 13 se presenta una comparación entre los espesores del paquete estructural de un pavimento flexible sobre suelo CH natural y sobre suelo CH mejorado con la incorporación del 20% de ceniza de rastrojo de maíz. Esta comparación permite evidenciar los beneficios técnicos del uso de ceniza como aditivo estabilizante en suelos de baja capacidad de soporte.

En el diseño con suelo natural (CH), se observa que la capa subbase alcanza un espesor de 91 cm, mientras que la capa base y la capa asfáltica presentan espesores de 15 cm y 10 cm, respectivamente. Esto da como resultado un espesor total del paquete estructural de 116 cm.

Por otro lado, en el diseño con suelo mejorado con un 20% de ceniza, se evidencia una reducción significativa en el espesor de la capa subbase, que disminuye a 20 cm. Lo cual

indica que la mejora del suelo se refleja principalmente en la subrasante. El espesor total del paquete estructural en este caso es de 40 cm, lo que representa una reducción en comparación con el diseño sobre suelo natural. incorporación

Gráfica24. Diseño de espesores del barrio Constructor (CL)



Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 14 presenta la comparación entre los espesores del diseño estructural de pavimento flexible construido sobre suelo tipo CL en estado natural y suelo mejorado con la incorporación del 10% de ceniza de rastrojo de maíz. El análisis de estos diseños permite evidenciar el efecto positivo de la estabilización con ceniza en las propiedades mecánicas del suelo.

En el diseño con suelo CL natural, el espesor de la capa subbase es de 48 cm, mientras que la capa base y la capa asfáltica es de 15 cm y 10 cm, respectivamente. Esto da como resultado un espesor total de 73 cm para el paquete estructural.

Por otro lado, al incorporar un 10% de ceniza al suelo CL, el espesor de la capa subbase se reduce considerablemente a 25 cm, mientras que los espesores de la capa base y capa asfáltica permanecen constantes. El espesor total del paquete estructural con suelo mejorado es de 45 cm, lo que representa una reducción.

Esta notable disminución del espesor de la subbase indica una mejora sustancial en la capacidad de soporte del suelo CL estabilizado con ceniza, lo cual permite optimizar el diseño estructural.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se llegó a cumplir el objetivo principal de la investigación, es decir se hizo el análisis de las propiedades mejoradas con el aditivo de la ceniza de rastrojo de maíz en pruebas de CBR.
- Para la prueba de límite de consistencia al incorporar ceniza de rastrojo de maíz al suelo, se realizó a diferentes dosificaciones lo cual se evidencio que a medida que se aumenta las dosificaciones del aditivo el límite liquido disminuye y el límite pastico aumenta provocando que también disminuya el índice de plasticidad lo cual indica que el suelo es menos plástico y menos deformable. Esta reducción en plasticidad implica que el suelo es más estable y menos propenso a cambios de volumen, resultando en mayor estabilidad frente a variaciones de humedad.
- En el análisis de resultados se puede ver que cuando se compacta un suelo arcilloso CH y CL con ceniza de rastrojo de maíz, la densidad disminuye y el contenido de humedad aumenta debido a las características físicas de la ceniza. Reduce la densidad dado que la ceniza contiene partículas finas y ligeras que se mezclan con el suelo, aumentando la porosidad y reduciendo la compactación, lo que hace que el suelo sea menos denso incluso tras compactarlo.

Aumento la Retención de Humedad puesto que la ceniza mejora la capacidad de retención de agua al crear más espacios porosos y al influir en la estructura del suelo, facilitando que el agua se almacene mejor, incluso después de la compactación.

Estos cambios permiten que el suelo mantenga más agua y se mantenga menos denso pese a la compactación.

- Realizar pruebas de CBR en suelos arcillosos CH y CL tratados con ceniza de rastrojo de maíz es favorable, ya que esta ceniza puede mejorar significativamente la capacidad de carga y la resistencia de estos suelos. Los suelos arcillosos tienden a ser expansivos y de baja estabilidad; al agregar ceniza de rastrojo de maíz, se

reduce su expansividad y se incrementa su rigidez, lo cual es crucial para aplicaciones en estabilizaciones. Además, el uso de este residuo agrícola fomenta prácticas sostenibles, reduce costos de materiales y aprovecha recursos locales, promoviendo una alternativa ecológica en la estabilización de suelos.

- Aunque este análisis se base en materiales obtenidos del barrio Fray Quebracho y del barrio constructor de la ciudad de Tarija, brinda información útil para pruebas de CBR un suelo similar disponible en otros sectores.
- El porcentaje más favorable para un suelo arcilloso CH es incorporando un 20% de ceniza de rastrojo de maíz y para un suelo arcilloso CL es incorporando 10% de ceniza de rastrojo de maíz.
- Los resultados obtenidos mediante el análisis estadístico son viables, confiables y muestran que el uso de ceniza de rastrojo de maíz mejora la resistencia de suelos arcillosos hasta ciertos porcentajes.
- El diseño del paquete estructural del pavimento flexible se realizó aplicando la norma AASTHO 93 donde se asumió espesores mínimos de la capa base y subbase según la norma.

5.2. Recomendaciones

- Este estudio se limita a un suelo arcilloso de clasificación CH y CL según SUCS, por lo cual el estudio puede extenderse más y llevarse a cabo sobre otros tipos de suelo como ser limos, arena, suelo aluvial, etc.
- Tratar de evitar el uso de suelos con alta presencia de materia orgánica que puede afectar los resultados de los ensayos.
- Es importante también fijar como una línea de investigación, la factibilidad del uso de la ceniza de rastrojo de maíz, teniendo en cuenta los volúmenes de producción y las cantidades requeridas con fines de estabilización, a fin de garantizar disponibilidad de la misma.
- Realizar la quema en condiciones controladas para asegurar que se logre las propiedades pozolánicas de la ceniza.
- Tamizar la ceniza para obtener un tamaño de partícula fino y almacenarla en un ambiente seco para evitar la humedad, que puede afectar su reactividad.