CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Proyecto de grado realizado en el País del Perú (Universidad Andina del Cusco, Tesis realizada por Luis Enrique Bravo Humpire, en el año 2022) y fue un trabajo con excelentes resultados por lo que se obtuvieron una reducción considerable del uso del agua (menor al 5%).

La investigación tiene como objetivo principal determinar la influencia de la adición de Hidrogel como sustituto del agua en las propiedades físico-mecánicas de un suelo estabilizado con cemento portland tipo IP a nivel de subrasante, considerando 5 mezclas: Suelo Natural (1), Suelo + 5% cemento (2), Suelo +7% cemento (3), Suelo + 5% cemento + hidrogel (4) y Suelo + 7% cemento + hidrogel hidratado (5). La poca adopción de nuevas alternativas de estabilización o complementarias a las ya conocidas actualmente a nivel de trocha o sin afirmar, traza un reto en la mejora en condiciones desfavorables principalmente por la baja capacidad de soporte en suelos finos. Dentro de las propiedades que fueron evaluadas se encuentra la compactación, resistencia a compresión, capacidad de soporte CBR y variación de expansión; mediante ensayos de Próctor modificado, ensayo de CBR, resistencia a compresión de probetas de suelo cemento y análisis de costo. La metodología seguida en esta investigación cuenta con un enfoque cuantitativo, con nivel explicativo empleando el método de investigación hipotético deductivo, donde el diseño metodológico es cuasi-experimental. Los resultados obtuvieron un suelo A-4 (0), ML (Limo de baja plasticidad) cuya densidad máxima seca fue 1,862 g/cm^3 (1), 1,867 g/cm^3 (2), 1,88 g/cm^3 (3), 1,890 g/cm^3 (4) y 1,897 g/cm^3 (5). Para la resistencia a compresión da como consecuencia 1,12 kg/cm^2 (1), 10,31 kg/cm^2 (2), 12,48 kg/cm^2 (3), 13,41 kg/cm^2 (4) y 15,25 kg/cm^2 (5) en promedio. A su vez en el ensayo de CBR se obtuvo 2,55% (1), 103,84% (2), 154,32% (3), 145,09% (4) y 172,09% (5). Con costo de operación por m2 S/ 19,84 (2), S/ 24,83 (3), S/ 27,25 (4) y S/ 31,80 (5). Lo concluyente, de manera general el hidrogel influye positivamente en gran parte de las propiedades mecánicas estudiadas, con excepción a la compactación. Lo resaltante radica en el CBR, incrementando en casi el 40% del CBR para un (4) a comparación de (2) y un crecimiento del 12% del CBR para el (5) en relación con (3). Asimismo, para la resistencia a

compresión, el hidrogel logra un incremento de alrededor del 30% a comparación de un (2), de igual forma sucede con (5) logrando un impacto de aumento en alrededor del 22% en relación con (3). El hidrogel ha elevado los costos de estabilización progresivamente, debido a la relación con el contenido de humedad óptimo en rangos de 13% a 14%.

- No se realizó la investigación sobre el Hidrogel como sustituto del agua en Tarija-Bolivia según la información y búsqueda que se realizó en la web y en la base de datos de la U.A.J.M.S.

1.2 Situación Problemática

Los suelos son arena-limosa de grano fino con escasa plasticidad o nula, y se caracterizan por ser estériles, pedregosos y porque filtran el agua con gran facilidad, además se considera que son suelos que se encuentran en lugares que tienden a altas temperaturas llegando casi a superar los 40°C, también las sequías predominan en esos sectores de Yacuiba.

El motivo de la escasez de agua es el cambio climático; cada vez se ve más limitada la extracción de este recurso, y para realizar proyectos se debe acceder a este líquido indispensable. Por tanto, el transporte tiene altos costos.

1.2.1 Problema

¿Cómo el Hidrogel mejora las propiedades mecánicas de los suelos de la ciudad de Yacuiba?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

El tipo de suelo de las subrasantes ha sido una condicionante para la ejecución de proyectos, más aún los suelos finos que presentan comportamientos inestables en condiciones de humedad y temperatura desfavorables. Asimismo, en nuestro país y en el mundo se han planteado alternativas que reduzcan o mitiguen los efectos de un suelo deficiente, adicionando materiales como la cal, el cemento, productos derivados del petróleo, polímeros, entre otros.

Las principales causas se deben a las características del suelo como ser: la gran cantidad de partículas finas, expansión y la baja capacidad de soporte; cuyo principal detonante radica principalmente por las condiciones climáticas de humedad y temperatura.

Como consecuencia la vida útil de la estructura de un pavimento se vería mermada, esto originaría agrietamientos y asentamientos produciendo un deterioro en la vía y como resultado reduciría la vida útil y los costos de mantenimiento se incrementarían o serían prematuros a lo previsto en el diseño. Esto significa un gran reto que tienen las vías en condiciones desfavorables, principalmente por la baja capacidad de soporte.

Por consiguiente, una alternativa que da solución a la baja capacidad de soporte es la estabilización con un polímero de hidrogel, que aporta directamente a sus propiedades mecánicas.

Asimismo, con la adición de hidrogel supondría una alternativa complementaria en la mejora de las propiedades físico-mecánicas con respecto a la sub base de los caminos.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial

1.2.3.1 Delimitación temporal

La investigación ocurre en tiempo real y presente.

1.2.3.2 Delimitación espacial

La investigación pertenece al área de mecánica de suelos.

- Área de trabajo: mecánica de suelos
- Base de operación: Laboratorio de suelos.
- Aplicación: mejoramiento de la capacidad soporte del suelo.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación académica

El desarrollo de este proyecto contribuye al mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo, utilizando los conocimientos adquiridos durante la formación académica. Se podrá profundizar mucho más sobre el tema establecido.

Estos resultados obtenidos sirven para el dimensionamiento de la carpeta estructural de la carretera; el suelo a estudiar es a nivel de subrasante.

1.3.2 Justificación técnica

En este proyecto se realizarán los respectivos ensayos de laboratorio y cálculos según la teoría correspondiente para encontrar la capacidad soporte del suelo fino obtenido de la ciudad de Yacuiba.

1.3.3 Justificación social

La contribución beneficia en primera instancia a la población de Yacuiba del Barrio San Gerónimo, ya que se analiza las características del suelo de parte de la zona obteniendo detalles técnicos para futuros proyectos.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo general

Analizar la influencia del hidrogel hidratado incorporando diferentes proporciones, sustituyendo al agua para mejorar las propiedades mecánicas de un suelo fino de la ciudad de Yacuiba.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las características físicas y mecánicas de las muestras seleccionadas.
- Estabilizar la muestra con diferentes combinaciones de Hidrogel Hidratado, con 0,5g de Hidrogel Hidratado, 1g de Hidrogel Hidratado, 1,5g de Hidrogel Hidratado y en su CHO de Hidrogel Hidratado.
- Analizar la influencia de las diferentes combinaciones del hidrogel hidratado en la compactación.
- Analizar la influencia del hidrogel hidratado en la capacidad soporte del suelo con sus diferentes combinaciones de hidrogel.
- Determinar la proporción óptima de hidrogel que maximicen las propiedades mecánicas.

1.5 Hipótesis

Sí, al agregar Hidrogel Hidratado en un suelo fino de la ciudad de Yacuiba, mejora las propiedades mecánicas del suelo.

1.6 Operacionalización de las variables

1.6.1 Variables Independientes

X1 = Contenido de agua

1.6.2 Variables Dependientes

Y1 = Capacidad de Soporte (CBR)

1.7 Identificación del tipo de investigación

Este proyecto es un trabajo de investigación que requiere mejorar las propiedades mecánicas del suelo de la ciudad de Yacuiba mediante la implementación del polímero denominado hidrogel.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio es la propiedad mecánica del suelo.

1.8.2 Población

La población comprende todos los tipos de suelos de la ciudad de Yacuiba.

1.8.3 Muestra

La muestra en la presente investigación, es el suelo fino de dos puntos diferentes de extracción de la misma zona del barrio San Gerónimo de la ciudad de Yacuiba.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

Para el proyecto de investigación, el método para determinar el tamaño de la muestra, se realizará el método no probabilístico.

1.9 Métodos y técnicas empleados

1.9.1 Métodos

- **Métodos Teóricos**

Los métodos teóricos son aquellos que se basan en el análisis conceptual, modelos matemáticos y simulaciones para interpretar el comportamiento del suelo.

1. **Revisión Bibliográfica:**
   - Investigación de literatura sobre el uso de hidrogel en suelos, sus propiedades y su influencia en características mecánicas.
   - Identificación de estudios previos relacionados con suelos tipo A-2-4 y estabilización mediante agentes químicos o aditivos.
2. **Modelos Matemáticos:**
   - Aplicación de ecuaciones constitutivas del suelo, como la relación entre el esfuerzo y la deformación.
   - Uso de modelos de compactación para predecir cómo el hidrogel afecta la densidad del suelo.
   - Simulaciones para prever la interacción entre el hidrogel y las partículas de suelo.
3. **Análisis Teórico de Propiedades:**
   - Evaluar cómo el hidrogel puede influir en la cohesión, la fricción interna y la capacidad portante del suelo a partir de teorías de mecánica de suelos.
4. **Predicción de Resultados:**
   - Formular hipótesis basadas en los efectos documentados del hidrogel en otros tipos de suelos.

- **Métodos Empíricos**

Los métodos empíricos se basan en la experimentación directa para medir y observar los efectos del hidrogel en las propiedades mecánicas del suelo.

1. **Preparación de Muestras:**
   - **Control:** Muestras de suelo A-2-4 sin tratamiento.

- **Experimental:** Muestras de suelo tratadas con hidrogel en distintas proporciones.

2. **Ensayos de Laboratorio:**
   - **Ensayo Próctor Modificado:**
     - Determinar la relación entre la humedad y la densidad seca del suelo tratado y no tratado.
   - **Prueba de CBR (California Bearing Ratio):**
     - Evaluar la capacidad de soporte del suelo antes y después del tratamiento con hidrogel.
3. **Observaciones de Campo:**
   - Aplicación del hidrogel en condiciones reales y evaluación de su desempeño en estabilización.
4. **Análisis Comparativo:**
   - Comparar los resultados obtenidos entre el suelo con y sin hidrogel para determinar las diferencias significativas.

1.9.2 Técnicas

❖ **Técnicas de Muestreo en Campo**

1. Muestreo de Suelos Superficiales

Se recolecta suelo de la capa superior (0-30 cm), con pala, espátula o cuchara metálica.

Representa el suelo que está más expuesto a las condiciones ambientales, útil para determinar las propiedades iniciales antes de aplicar hidrogel.

2. Muestreo en Calicata

Consiste en excavar zanjas de 1-2 metros de profundidad para recolectar muestras de distintas capas, con pala, pico, nivel de profundidad.

Permite evaluar la influencia del hidrogel en diferentes profundidades del perfil del suelo.

3. Muestreo Sistemático

Se recolectan muestras siguiendo un patrón regular (por ejemplo, cada 200 metros).

Asegura uniformidad y representatividad en áreas grandes.

4. **Muestreo Dirigido**

Recolección en sitios específicos donde se sabe que predomina el suelo A-2-4.
Útil cuando ya se tiene identificado el tipo de suelo que se estudiará.

❖ **Técnicas de Muestreo en Laboratorio**

1. Preparación de Muestras Disturbadas

Muestras recolectadas que no conservan su estructura natural, pero son útiles para análisis como granulometría, contenido de humedad y compactación.

2. Preparación de Muestras No Disturbadas

Muestras que conservan su estructura y condiciones naturales.

3. Ensayos Preliminares:

- **Antes de cualquier análisis avanzado, realiza pruebas básicas en laboratorio:**
  - Contenido de humedad: Método del horno o Speedy.
  - Granulometría: Ensayo por tamizado y método del hidrómetro.
  - Límites de consistencia (si aplica): Determinar límites líquido y plástico.

4. Preparación de Mezclas con Hidrogel

- **Procedimiento:**
  1. Calcula las proporciones de hidrogel según los tratamientos definidos.
  2. Mezcla el hidrogel con el suelo seco.
  3. Agrega agua para alcanzar la humedad óptima (determinada por ensayo Próctor).
- **Aplicación:**
  1. Ensayos comparativos para evaluar las propiedades mecánicas con y sin hidrogel.

5. Homogeneización de Muestras

Mezcla manual o mecánica de las muestras para garantizar uniformidad en las propiedades, es importante en ensayos como CBR y compactación.

1.10 Procesamiento de la información

El procesamiento será probabilístico.

1.11 Alcance de la investigación

La presente investigación es a nivel explicativo, debido a que se busca establecer las causas probables y la influencia que produce el hidrogel hidratado en las distintas propiedades del suelo fino de Yacuiba.

Abarcará el estudio de la Influencia del Hidrogel como sustituto del agua en las propiedades mecánicas del suelo A-2-4 cuyo suelo es una arena fina con presencia de limo, se procederá al muestreo de dos puntos diferentes del barrio San Gerónimo y de estos realizar sus respectivos ensayos de laboratorio con diferentes proporciones de hidrogel.

Obteniendo así el Porcentaje Óptimo de Hidrogel que se requerirá para los ensayos, modificando sus propiedades mecánicas, especialmente en contextos donde el uso de agua está limitado.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DEL HIDROGEL Y LOS SUELOS

CAPÍTULO II
FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DEL HIDROGEL Y LOS SUELOS

2.1 Estabilidad del suelo

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose una firmeza estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. En otras palabras, sería la corrección de una deficiencia con el fin de otorgar una mayor resistencia al terreno. (Equiservicios Industriales, 2016).

"La estabilización de suelos consiste en dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación." (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

2.2 Importancia de la estabilización de suelos

La estabilización de suelos tiende a mejorar propiedades físicas, mecánicas y de resistencia, con permanencia en el tiempo. El diseño de una estabilización con aditivo incluye clasificar el suelo, determinar el tipo y cantidad de estabilizante y el procedimiento para efectuar la estabilización. El método de diseño depende del uso que se pretenda dar al suelo estabilizado. Es difícil establecer patrones de estabilización de materiales, sobre todo cuando se tiene una gran diversidad de métodos de diseño de pavimentos. (Bada 2016)

2.3 Tipos de estabilización

2.3.1 Estabilización Física

Éste se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Hay varios métodos como:

• Mezclas de Suelos: Este tipo de estabilización es de amplio uso, pero por sí sola no logra producir los efectos deseados, necesitando siempre al menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que lo hacen soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser firme en 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 en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

• Geotextiles
• Vibroflotación (Mecánica de Suelos)
• Consolidación Previa

(Equiservicios Industriales, 2016).

2.3.2 Estabilización Mecánica

Según el (Instituto de la Construcción y Gerencia, 2016) la estabilización mecánica como la mejora de las propiedades del suelo según dos métodos, la densificación y la granulometría. Asimismo, en Bolivia es muy difundido por el proceso constructivo de capas estructurales de un pavimento (base y sub-base), con la intervención de equipos mecánicos convencionales.

2.3.3 Estabilización Química

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

- Cal: Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento Portland: Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.
- Productos Asfálticos: Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- Cloruro de Sodio: Impermeabiliza y disminuye los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

- Cloruro de Calcio: Impermeabiliza y disminuye los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- Escorias de Fundición: Éste se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para impermeabilizarla y prolongar su vida útil. Mayor resistencia.
- Polímeros: Éste se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- Hule de Neumáticos: Éste se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil. (Equiservicios Industriales, 2016).

Por lo tanto, utilizada en todos los tipos de suelos para el mejoramiento de sus propiedades geotécnicas, cambiando las propiedades fisicoquímicas iniciales del suelo nativo con el objetivo de mitigar algunos problemas tales como la inestabilidad volumétrica o incrementar algunas de sus propiedades como la resistencia y durabilidad de los suelos tratados. (F. Rivera, Aguirre Guerrero, Mejía de Gutiérrez, & Orobio, 2020)

Este tipo de estabilización incluye la utilización de una amplia gama de materiales, entre los cuales el cemento y la cal han sido los más convencionales; sin embargo, otros productos como sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio) y residuos o subproductos industriales (escoria de alto horno, cenizas volantes) también han sido considerados en la estabilización de suelos para construcción de carreteras. (Syed Zuber, Kamarudin, & Ai Bakri Abdullah, 2013)

2.3.4 Estabilización de suelos con polímeros

Es un procedimiento químico cuyo fin permite dotar de un aumento en sus propiedades mecánicas, los polímeros actúan en el suelo como un agente catalítico a través de un enlace iónico debido a una de sus propiedades que es la cohesión, que va a permitir la unión de partículas pequeñas para formar una partícula más grande, a su vez la reducción de la capacidad de absorber agua. (López Lara, Hernández Zaragoza, Horta Rangel, Coronado Márquez, & Castaño Meneses, 2010) Como indican los distintos autores la estabilización de suelos tiene una amplia gama de alternativas, para el caso de esta investigación se toma en consideración dos tipos de estabilización, la primera estabilización química y la segunda estabilización con polímeros. La primera relacionada con la adición del cemento,

como estabilizante principal, la segunda está en función al aporte como complemento del hidrogel en el suelo cemento.

2.4 Hidrogel

Poliacrilato de sodio

Es un polímero formado por monómeros $CH_2CH(CO_2Na)$, donde su principal característica es absorber grandes cantidades de agua se debe a que en su estructura molecular existen grupos de carboxilatos de sodio que cuelgan de la cadena. Se utiliza mayormente como un absorbente de fluido corporal en los productos de desecho higiénico, en particular en pañales. (Pariguana Begazo & Gonzales Gutierres, 2019)

Debido a la naturaleza del material, los cuales son producidos mediante dos métodos gel-polímero o en polimerización por suspensión inversa. El primero es asociado a partículas de forma irregular mientras que el último describe partículas esféricas. Los polímeros superabsorbentes comercializados más importantes son poliacrilatos covalentemente reticulados y copolimerizados. Estos materiales, debido a su estructura interconectada, pueden absorber grandes cantidades de agua sin disolverse. En el polímero superabsorbente se presentan dos estados, los cuales se asocian a un proceso de absorción-desorción que se presenta en las partículas. (Campos Silva, 2017)

2.4.1 Tipos de hidrogel

- **TRPSORB TM-120**

  Es un aditivo fundamental para el suelo. No solo proporciona agua suficiente para promover un rápido crecimiento de raíces, llega hasta el 99% formando una capa que retiene el agua mediante la absorción y expansión. (SOCO)

- **AVOSORB TM-202**

  Es especialmente adecuado para suelos franco arenosos, formando una capa de retención de agua que evita la pérdida de humedad y nutrientes. (SOCO)

2.4.2 Propiedades del hidrogel

El hidrogel es un polímero con gran capacidad de absorción de agua. Cada vez más utilizado por la capacidad de ahorro de agua, en este apartado puedes ver las características físico químicas del hidrogel.

Las características técnicas del hidrogel para plantas que puedes encontrar en SOCO son las siguientes: (SOCO)

Tabla 2.1. Especificación Técnica del Hidrogel

General	
Otros nombres	Hidrogel, Poliacrilato de Potasio, Lluvia Sólida, Gel de Agua
Número CAS	25608-12-2
Propiedades	
Apariencia	Cristales 1-2mm de color blanco
Densidad Aparente (ml/g)	0,56
pH	6,8
Contenido en Potasio	10,8%
Absorción (agua destilada) g/g	400-800
Absorción (agua corriente) g/g	>100
Agua disponible para plantas	95%
Ciclos de uso	>18
Conservación	En un lugar seco al abrigo de la luz

Fuente: Industria SOCO

2.4.3 Proporción y consistencia de hidrogel

- El hidrogel hidratado no debería tener una consistencia muy seca, ya que, si esta fuera mezclada con el suelo y sometida a un ensayo en este caso CBR la muestra mezclada con hidrogel sería propensa a absorber más agua y por lo tanto se haría más porosa, con ello aumentaría su volumen y su estructura ya no sería estable traduciéndose en una menor resistencia.

- El hidrogel hidratado no debería tener dentro de su estructura “agua suelta”, ya que perdería el enfoque que tiene la investigación, puesto que la investigación está dirigida a la sustitución total del agua y no de forma parcial.

Para lograr los puntos descritos anteriormente, se tomó en consideración el rango de absorción de agua descrita en la ficha técnica el cual nos da un rango de 250ml a 400ml de agua absorbida por cada gramo de hidrogel.

2.5 El agua

El agua es fundamental para la vida, por lo que el Gobierno efectúa –aseguró- "grandes inversiones" en proyectos que garantizan el acceso al recurso hídrico para consumo humano, agricultura y ganado.

También fue entregado el sistema de agua potable del barrio San Gerónimo del Distrito 4 de Yacuiba con más de Bs 3,4 millones y que beneficia a más 750 familias. (agencia boliviana de información)

Para realización del proyecto se debe utilizar agua de los ríos, quebradas o arroyos más cercanos para que el costo de agua sea menos.

El muestreo es el primer paso para la determinación de la calidad de una fuente de agua, por lo que la persona que recoge una muestra y la lleva al laboratorio debe ser calificada para tal fin. En este sentido debe asegurarse que la muestra sea representativa de la fuente cuya calidad se desea evaluar, y que no se deteriore, ni se contamine antes de llegar al laboratorio, y el envase debe ser nuevo; ya que la calidad de los resultados, depende de la integridad de las muestras que ingresan al mismo. La toma de la muestra debe realizarse con sumo cuidado, a fin de garantizar que el resultado analítico represente la composición real de la fuente de origen, y que antes de iniciar el muestreo se debe consultar al laboratorio sobre las condiciones en que éste debe desarrollarse y la información mínima requerida. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones)

2.6 Suelos

2.6.1 Suelos Gruesos

Un suelo es grueso cuando más del 50% de su peso total está compuesto por granos que se pueden distinguir separadamente. Los suelos gruesos se dividen en gravas (G) y arenas (S), dependiendo si tienen más o menos del 50% de granos visibles retenidos en un tamiz N° 4 (mayores de 1 mm) (Cotecno)

2.6.2 Suelos Limosos

Son fracciones microscópicas del suelo que están compuestos de cuarzos muy finos y algunas partículas de característica laminar que forman parte de minerales micáceos. (M. Das, 2013).

Los limos están comprendidos entre 0,060 y 0,002 mm para el tamaño de sus partículas, retiene agua mejor que los tamaños superiores. Sin embargo, al formarse una pasta agua-limo, al golpear con la mano se ve cómo el agua se exuda con facilidad. (Gonzáles de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

2.6.3 Suelo A-2-4

A-2-4: Suelos granulados arcillosos o barrosos. Arenas y gravas con un alto contenido de finos. (AASHTO M 145)

2.6.4 Incidencia de suelos en obras viales

Estos son suelos de grano fino con escasa plasticidad, se caracterizan por ser estériles, pedregosos y porque filtran el agua con gran facilidad. Este tipo de suelo posee una granulometría comprendida entre la arena fina y la arcilla.

Al no ser un material cohesivo, presenta algunas dificultades durante las construcciones, Por este motivo, cuando se construye sobre suelos limosos requieren sistemas especiales de cimentación. (FULTUM)

2.7 Subrasante

2.7.1 Características de la Subrasante

Según la (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014) la subrasante viene a ser la base o cimiento de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que está limitada entre el terreno natural y la estructura del pavimento.

Tabla 2.2. Categoría de Subrasante

Categorías de Subrasante	CBR
S_0: Subrasante Inadecuada	CBR<3%
S_1: Subrasante insuficiente	De CBR ≥3% A CBR <6%
S_2: Subrasante Regular	De CBR ≥6% A CBR <10%
S_3: Subrasante Buena	De CBR ≥10% A CBR <20%
S_4: Subrasante Muy Buena	De CBR ≥20% A CBR <30%
S_5: Subrasante Excelente	CBR ≥30%

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014)

Se denomina subrasante al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. Ensayos con cargas estáticas o de baja velocidad de deformación, tales como el CBR o la compresión simple, están siendo reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas, como el ensayo del módulo resiliente, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones. Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- Propiedades físicas: son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.

- Propiedades ingenieriles: dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el módulo resiliente, el módulo de Poisson, el valor soporte del suelo y el módulo de reacción de la subrasante. (AASHTO 1993)

2.8 Expansividad de los suelos

Consiste en el hinchamiento del suelo cuando aumenta su cantidad de agua y se retraen cuando la disminuye. Las diferentes composiciones químicas y estructuras cristalinas de estos minerales dan a cada uno una susceptibilidad diferente a la expansión. (Alva Hurtado, 2021) Cabe recalcar, que en la presente investigación solo se aborda una propiedad física, la cual es la expansibilidad de los suelos.

2.9 Ensayos de estabilización de suelos

2.9.1 Próctor modificado

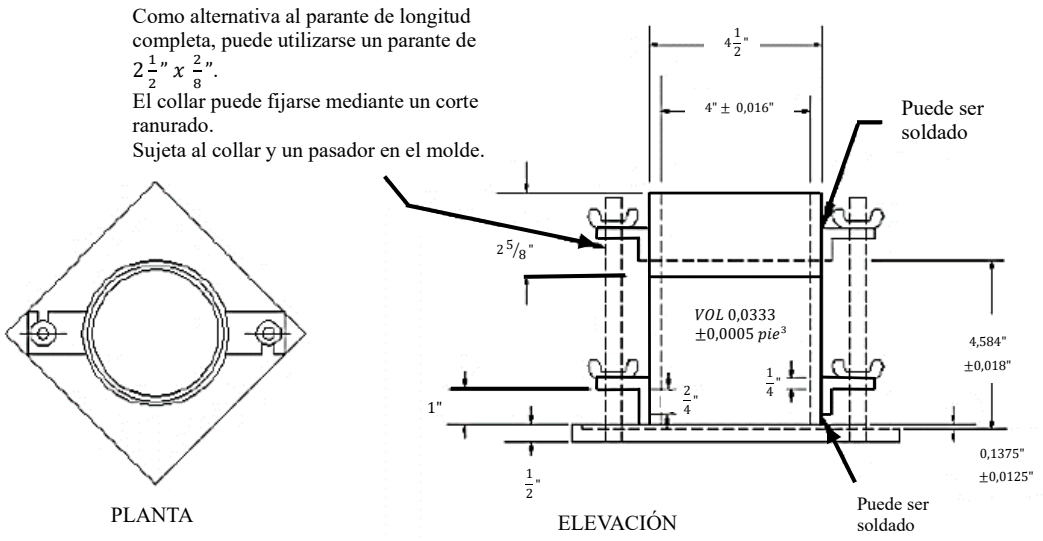
Próctor, en 1933 desarrolló un ensayo demostrando que la humedad óptima está comprendida entre el 90% y 95 % de la humedad de saturación del suelo. Todas las curvas humedad/densidad tienen como envolvente la curva de saturación del suelo. El ensayo de Próctor tiene dos variantes, el Próctor Normal (PN) y el Próctor Modificado (PM). (Márquez, 2006)

El Próctor modificado es una prueba con la que se puede encontrar la humedad requerida óptima y ver la compactación perfecta del suelo a través del volumen de peso contenido en un molde. Esto se denomina densidad relativa en volumen bajo una humedad requerida, y para ello se realiza un proceso que consiste en una variedad de golpes que varían en 5 capas y están relacionadas con las herramientas utilizadas para encontrar la densidad. (Castro Cuadra, 2017)

El fin del ensayo de Próctor modificado, es determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco, esto se logra mediante un molde de 101,6 mm o 152,4 mm (4 o 6 pulgadas) de diámetro y con un pistón 44,5 N que cae de una altura de 457 mm (18 plg.) que produce una Energía de Compactación. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Una limitante para este ensayo es que se aplica sólo para suelos que tienen 30% o menos en peso retenido en el tamiz de 19,0 mm (¾" plg). A su vez éste cuenta con diferentes métodos. "Se proporciona 3 métodos electivos. Esta técnica debe ser conveniente en las especificaciones del material a ser ensayado. Si el método no está explícito, la elección tendrá fundamento en la gradación del material". (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Figura 2.1. Próctor Modificado



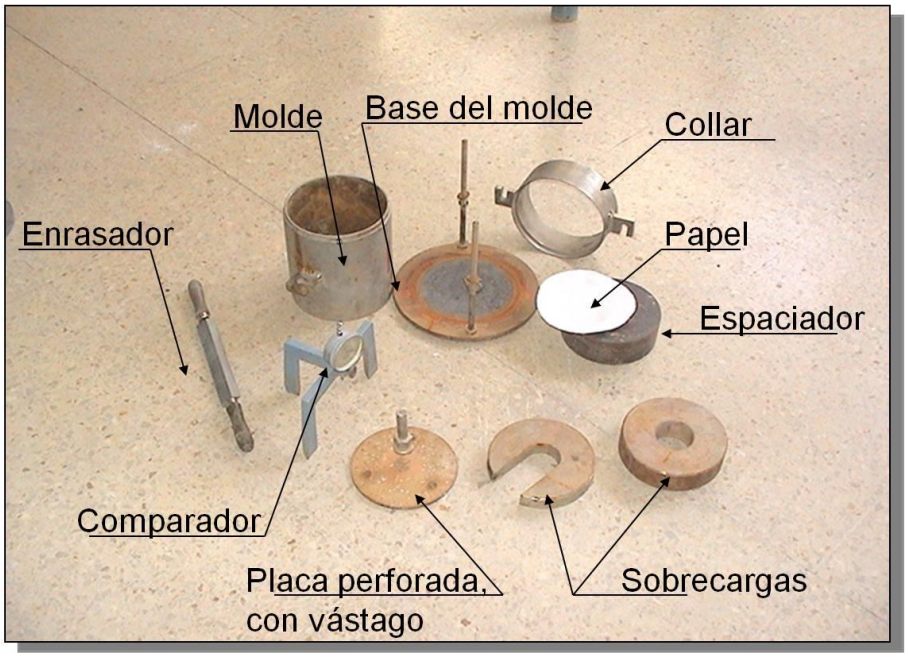
Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

2.9.2 Ensayo California Bearing Ratio (CBR)

Es un índice de su resistencia al corte en ciertas condiciones de compactación y humedad, y se expresa como el porcentaje de carga requerido para insertar un pistón de una sección circular en un suelo de muestra con el triturado exacto de piedra. (Crespo Villalaz, 2004)

Básicamente la finalidad del ensayo es evaluar la resistencia potencial de subrasante, sub-base y material base, que se espera encontrar en el terreno en función al peso unitario y contenido de humedad. Para esta finalidad se evalúa en una condición de humedad crítica, después de estar sumergidos por cuatro días con una sobrecarga igual al peso del pavimento. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016)

Figura 2.2. Molde de CBR



Fuente: (LCweb)

2.10 Métodos, técnicas y procedimientos empleados

2.10.1 Granulometría

La granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación con el peso total de la muestra seca. El tamaño de los granos de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas no pueden ser observadas con un microscopio (Braja M. Das)

2.10.2 Contenido de humedad

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen. El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso del agua y el peso del suelo seco, esto se expresa en términos de porcentaje. (Braja M. Das)

$$W = \frac{Ww}{Ws} \ 100$$

Donde:

W = contenido de humedad expresado en %.

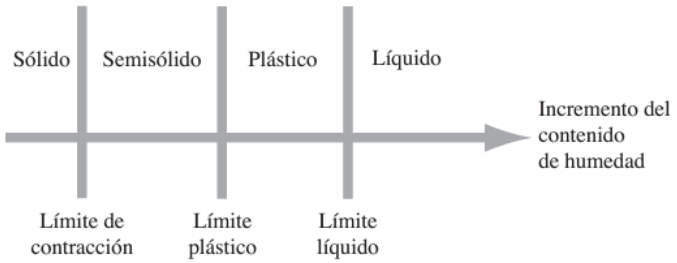
Ww = peso de agua contenido en el suelo.

Ws = peso del suelo seco.

2.10.3 Límites de Atterberg

El método usado para medir los límites de humedad fue ideado por Atterberg a principios de siglo a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico. Los límites de Atterberg o límites de consistencia están basados en que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Por ello un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite sin romperse. (Braja M. Das)

Gráfica 2.1. Límites de Atterberg



Fuente: Braja M. Das

2.10.3.1 Límite líquido (LL)

El Límite Líquido LL es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado líquido. En este estado la mezcla se comporta como un fluido viscoso y fluye bajo su propio peso. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla se encuentra en estado plástico. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LL produce un cambio en el volumen del suelo. (Braja M. Das)

2.10.3.2 Límite plástico (LP)

El Límite Plástico LP es el contenido de humedad por encima del cual la mezcla suelo-agua pasa a un estado plástico. En este estado la mezcla se deforma a cualquier forma bajo ligera presión. Por debajo de este contenido de humedad la mezcla está en un estado semisólido. Cualquier cambio en el contenido de humedad a cualquier lado de LP produce un cambio en el volumen del suelo. (Braja M. Das)

2.10.3.3 Índice plástico (IP)

El índice de plasticidad se define como la diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite Plástico:

$$Ip = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de Plasticidad

LL = Límite Líquido

LP = Límite Plástico

Un índice de plasticidad bajo, como por ejemplo del 5%, significa que un pequeño incremento en el contenido de humedad del suelo, lo transforma de semisólido a la condición de líquido, es decir, resulta muy sensible a los cambios de humedad. Por el contrario, un índice de plasticidad alto, como por ejemplo del 20%, indica que para que un suelo pase del estado semisólido al líquido, se le debe agregar gran cantidad de agua. El índice de plasticidad define el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que deben tener las arcillas para conservarse en estado plástico. Este valor permite determinar los parámetros de asentamiento de un suelo y su expansividad potencial. En suelos no plásticos, no es posible determinar el índice de plasticidad. En la siguiente tabla se presenta la calificación del rango de plasticidad del suelo de acuerdo con el valor de IP. (Braja M. Das)

Tabla 2.3. Rangos de índices de plasticidad

Plasticidad	Descripción del suelo	Rango IP
Nula	Limo	0 - 3
Baja	Limo con trazas de arcilla	4 - 15.
Media	Limo arcilloso Arcilla limosa Arcillas y limos orgánicos	16 - 30
Alta	Arcilla limosa Arcilla	>31

Fuente: Holtz & Kovacs, 1999. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice.

2.10.3.4 Índice de grupo (IG)

La clasificación realizada de esta manera se complementa con el índice de grupo, que permita caracterizar mejor cada suelo dentro de los grupos, ya que estos admiten suelos con porcentajes de finos y plasticidad muy diferentes. El índice de grupo se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$IG = (F - 35)\,[0{,}2 + 0{,}005(LL - 40)] + 0{,}01(F - 15)\,(IP - 10)$$

Donde:

F = Porcentaje en peso que pasa por el tamiz Nº 200 del material inferior a 75 mm, expresado en número entero.

LL = Límite Líquido

IP = Índice de Plasticidad

Para la clasificación del suelo en Bolivia se utiliza fundamentalmente el método AASHTO. Para el análisis realizado se siguieron las orientaciones del manual de ensayos de suelos y materiales de la (ABC) correspondiente al sistema de clasificación AASHTO (DESIGNACIÓN ASTM D3282 AASHTO M-145) y se tuvo en cuenta los resultados obtenidos en la granulometría y los límites de consistencia. (AASHTO 93)

2.10.4 Clasificación de suelos

La clasificación de suelos es un indicador universalmente aceptado de las propiedades físicas de los suelos. La clasificación que mejor se adapta para reflejar las propiedades de un suelo como subrasante es la de la AASHTO. Sus variables de entrada son la

granulometría y plasticidad. En general un suelo, de acuerdo a su granulometría, se divide en:

- Grava: tamaño < 76,2 mm (3") hasta tamiz No. 10 (2 mm),
- Arena gruesa: tamaño < 2 mm, tamiz No. 10 hasta tamiz No. 40 (0,425 mm),
- Arena fina: tamaño < 0,425 mm tamiz No. 40 hasta tamiz No. 200 (0,075 mm),
- Limos y arcillas: tamaños menores de 0,075 mm (pasa tamiz 200). Según AASHTO, un suelo fino es aquel que tiene más del 35 % que pasa el tamiz No. 200 y se denominan comúnmente: A-4; A-5; A-6 o A-7.

Dos suelos finos con granulometría muy similar pueden tener propiedades muy diferentes según su plasticidad, la que se analiza sobre la fracción que pasa el tamiz No 40. Esta propiedad se analiza con los límites de Atterberg (AASHTO T-89 y T-90) que son:

•Limite líquido o LL: porcentaje de humedad máximo que puede tener un suelo para poder ser amasado.

•Límite plástico o LP: porcentaje de humedad mínimo que puede tener un suelo para ser amasado.

•Límite de contracción o LS: porcentaje de humedad por debajo del cual el suelo no pierde más volumen. En ingeniería vial interesan principalmente el LL y el LP, cuya diferencia es el índice de plasticidad, que indica la plasticidad del material o sea el rango de humedades dentro del cual el suelo puede ser amasado. Resumiendo, se puede decir que para suelos gruesos la propiedad más importante es la granulometría, mientras que para suelos finos es la plasticidad. (AASHTO)

Tabla 2.4. Clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina		Limo o grava arcillosa y arena		
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Fuente: Braja M. Das

2.10.5 Compactación

Proceso mecánico que reordena las partículas del suelo para disminuir el volumen de poros para aumentar la densidad. También se podría definir a la aplicación de energía a suelo suelto con el fin de eliminar vacíos, aumentando así su densidad y estabilidad. (Márquez, 2006)

Efectos de la Compactación.

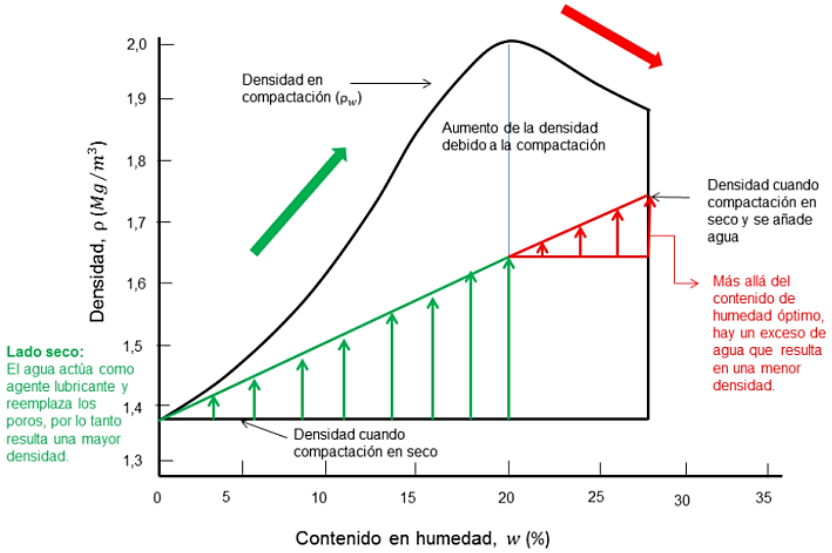
Según (Gómez de Santos, 2019) la modificación de las propiedades físicas de un suelo compactado radica en.

- Reducción de la relación de vacíos.
- Aumento de la densidad o peso específico.
- Aumento del contacto entre granos, por lo tanto, de la resistencia friccional del suelo.

A su vez, gracias a la compactación las propiedades del terreno donde se aplican producen efectos mecánicos.

- Aumento de las propiedades de resistencia de los suelos; cohesión (c) y ángulo de rozamiento interno (ϕ).
- Disminución de la deformabilidad del suelo.
- Disminución de la conductividad hidráulica o permeabilidad (k)

Gráfica 2.2. Comportamiento de compactación



Fuente: (Johnson & Sallberg, 1960)

Ecuación:

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}}$$

$donde$:

W = peso del suelo compactado en el molde.

$V_{(m)}$ = volumen del molde.

Para cada prueba, el contenido de humedad del suelo compactado es determinado en el laboratorio. Si se conoce el contenido de humedad, el peso unitario seco γ_d puede calcularse como:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \frac{w(\%)}{100}}$$

Donde w (%) = porcentaje de contenido de humedad.

Factores que afectan la compactación

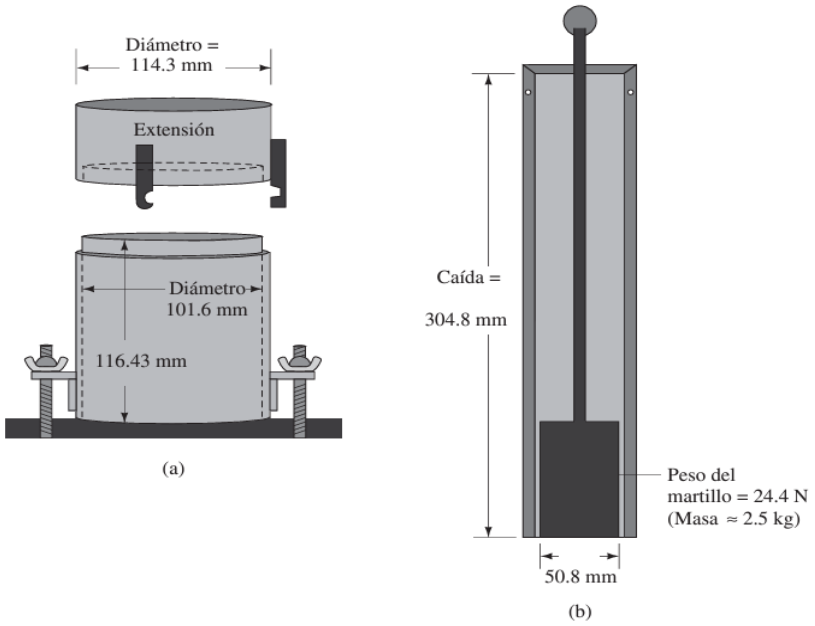
Además del contenido de humedad, se tienen otros factores importantes que afectan la compactación: el tipo de suelo y esfuerzo de compactación. Con respecto al tipo de suelo

esto radica principalmente en la forma y tamaño del grano. El esfuerzo de compactación se relaciona con la energía de compactación por unidad de volumen. (M. Das, 2013)
Según (Ingles & Metcalf, 1972) las propiedades ingenieriles de los suelos consideradas más importantes son resistencia, compresibilidad, cambio de volumen, permeabilidad y durabilidad. Asimismo, las propiedades que se abordaron en esta investigación son la resistencia, compresibilidad y el cambio volumétrico.

Beneficios de la compactación:

- Aumento de la capacidad portante del suelo. A mayor unión entre partículas, mayor resistencia del conjunto, algo que es fundamental especialmente en firmes de carretera que van a estar sometidos a las importantes cargas del tráfico.
- Dificulta la penetración de agua. Esto es fundamental, ya que el agua puede provocar un arrastre de partículas. Además, la acumulación de agua en el interior de capas granulares, puede ser muy perjudicial, especialmente en zonas de frecuentes heladas, ya que, al congelarse, el agua aumenta su volumen, y esto puede producir graves deterioros en la capa de suelo.
- Reduce el esponjamiento y la contracción de suelos. Cuando hay oquedades en el suelo, el agua puede penetrar y acumularse con mayor facilidad.
- Impide el hundimiento del suelo. Un suelo mal compactado (o con una compactación insuficiente) puede dar lugar a asientos diferenciales, y a hundimientos localizados en el firme, lo que a la larga producirá la aparición de patologías. (Braja M. Das)

Figura 2.3. Equipo para la prueba estándar



Fuente: Braja M. Das

Figura 2.4. Equipo de compactación Próctor estándar y modificado.

(a) Equipo Próctor estándar. (b) Equipo Próctor modificado

Fuente: ELE Internacional Ltda., 1993

2.10.6 CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

Este ensayo permite establecer el Índice de Soporte California (CBR) de la subrasante, sub-base o base, de muestras elaboradas en laboratorio o ensayadas en campo.

Generalidades

El ensayo CBR es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidad y humedad cuidadosamente controladas. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, pero de la aseveración anterior es evidente que este número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica sólo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo. El CBR se expresa en porcentaje como la razón de carga unitaria que se requiere para introducir un pistón dentro de una muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas, con respecto a la carga unitaria patrón requerido para introducir el mismo pistón a la misma profundidad en una muestra tipo de material triturado. De esta fórmula se puede observar que el CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica, el símbolo de porcentaje se quita y la relación se presenta simplemente por un número entero.

Los valores de carga unitaria para las diferentes profundidades de penetración dentro de la muestra patrón están determinados. El CBR que se usa para proyectar, es el valor que se obtiene para una penetración de 0,1" o de 0,2". Se elige el que sea más grande de los dos. Para la mayoría de los suelos el valor para la penetración de 0,1" da mayor CBR. El ensayo de CBR se utiliza para establecer 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: (40856 U.A.J.M.S)

Tabla 2.5. Número de CBR para suelos clasificados según SUCS y AASHTO

C.B.R.	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	Sub-base	OL, CL, ML, SC, SM, SP	A2, A4, A6, A7
20 - 50	Bueno	Base, Sub-base	GM, GC, SW, SM, SP ,GP	A1b, A2-5, A3, A2-6
>50	Excelente	Base	GW, GM	A1a, A2-4, A3

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil.

Con el resultado del C.B.R. se puede clasificar el suelo usando la tabla siguiente:

Tabla 2.6. Clasificación del suelo de acuerdo al CBR

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	Sub-base buena
50 - 80	Base buena
80 - 100	Base muy buena

Fuente: Crespo Villalaz, Mecánica de suelos y cimentaciones.

CBR para suelos perturbados y remoldados

Estos ensayos son ejecutados en laboratorio, se puede realizar a muestras de suelo sueltas extraídas de una capa subrasante, base o sub-base y luego son compactadas en laboratorio, este método de ensayo es aplicado a todo tipo de suelo, como ser: suelos no cohesivos, suelos cohesivos de baja plasticidad y poco o nada expansivos, y suelos cohesivos y expansivos. Y se hacen uso de moldes de especiales para compactación CBR. (Braja M. Das)

Figura 2.5. Molde para ensayo CBR en laboratorio.

Fuente: (40856 U.A.J.M.S.)

Procedimiento de ensayo

El procedimiento del ensayo tiene tres etapas:

- Etapa de elaboración de los moldes.
- Etapa de remojo.
- Etapa de penetración.

Elaboración de los moldes

Se preparan tres moldes con 12, 25 y 56 golpes en 5 capas respectivamente, utilizando el martillo del Próctor modificado. Algunos laboratorios prefieren probar un solo ejemplar que se compacta en 5 capas, con 56 golpes por capa, normado en el ensayo Próctor modificado, pero para permitir a los diseñadores establecer el CBR de acuerdo a sus necesidades se realizan tres moldes.

Se sujeta el molde a la placa base, se coloca el collarín y se pesa con precisión. Se inserta el disco separador en el molde y se coloca un papel de filtro grueso en la parte superior del disco.

Se realiza la mezcla de cada una de las fundas de 5 kg preparada con agua suficiente para obtener el contenido de humedad óptimo. Al compactar las muestras del suelo en el molde, se utilizan cinco capas iguales con 12, 25 y 56 golpes, respectivamente, para dar una altura total compactada de alrededor de 125 mm.

Se debe determinar el contenido de humedad del material que está siendo compactado al principio y al final del procedimiento de compactación (dos muestras). Cada muestra de humedad tendrá una masa de al menos 100 g para suelos de grano fino y 500 g para suelos de grano grueso.

Se retira el collarín, y usando una regla, se conforma el suelo compactado con la parte superior del molde. Las irregularidades de la superficie deben ser parchadas con material de tamaño pequeño. Al retirar el disco espaciador, se coloca un filtro de papel grueso en la placa base perforada, se invierte el molde con el suelo compactado y se coloca un papel de filtro por lo que el suelo compactado queda en contacto con el papel de filtro. Se sujeta la placa base perforada con el molde y se coloca el collarín. Para finalizar se determina el peso del molde con la muestra, con una precisión de 5 g. (AASHTO)

Remojo

Se coloca la placa de medición del hinchamiento de vástago ajustable en la muestra de suelo en el molde y se aplica suficientes pesos anulares para producir una intensidad de carga igual a la masa de la sub-base, las capas de base y de la capa de rodadura. La masa total debe tener un mínimo de 4,54 kg. Se añade la masa adicional en incrementos de 2,26 kg.

Se coloca el trípode con el indicador de cuadrante en la parte superior del molde y se encera la lectura para proceder al remojo. Se sumerge el molde en agua para permitir el libre acceso de la misma al inicio y al final de la muestra. Durante el remojo es necesario mantener el nivel de agua en el molde aproximadamente 25 mm por encima de la parte superior de la muestra, y remojar la muestra por 96 horas (4 días).

Un período de inmersión más corto, que no puede ser menor de 24 horas, se puede considerar para materiales que drenan fácilmente, si el ensayo demuestra que el período más corto no afecta a los resultados de la prueba. Para algunos suelos de arcilla, puede ser necesario un período de remojo mayor que 4 días. Se deben registrar los hinchamientos parciales cada 24 horas.

Al final de las 96 horas, se hace una lectura final sobre las muestras remojadas y se calcula el porcentaje de hinchamiento con respecto a la altura inicial de la muestra, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\%\ hinchamiento\ = \frac{hinchamiento\ en\ milímetros}{altura\ inicial\ de\ la\ muestra\ en\ milímetros}\ *\ 100$$

Se retira las muestras del tanque de remojo, se derrama el agua de la parte superior y se deja escurrir hacia abajo durante 15 minutos. Se debe tener cuidado de no molestar la superficie de las muestras durante la extracción del agua. Después del drenaje, se retira los pesos, placas perforadas y papel de filtro superior. El peso de las muestras se puede determinar después de drenar cuando se desea determinar la densidad húmeda promedio del material empapado y drenado. (AASHTO)

Figura 2.6. Dispositivo de carga para CBR de laboratorio

Fuente: Normativa de carreteras, 2014. Ensayo CBR. España.

Penetración

En la etapa de penetración se coloca la pesa con orificio central en el molde y luego se asienta el pistón de penetración con una carga de no más de 44 N (10 libras). Después de asentar el pistón de penetración, se coloca el resto de los pesos alrededor del pistón. La cantidad total de pesos de suplemento debe ser igual al peso utilizado durante el remojo. En este instante se encera el indicador de penetración y el indicador de carga. La aplicación de la carga por medio del pistón de penetración se realiza a una tasa uniforme de 1,3 mm/min. Se debe registrar la carga cuando la penetración ha alcanzado las siguientes deformaciones en altura: (0,025 – 0,050 – 0,075 – 0,1 – 0,15 – 0,2 y 0,3 pulgadas). (AASHTO)

Cálculos

Principalmente se debe obtener la curva Esfuerzo - Deformación con los datos que se han registrado en el ensayo. En algunos casos, la penetración inicial tiene lugar sin un incremento proporcional a la resistencia a la penetración, y la curva puede ser cóncava hacia arriba. Para obtener las verdaderas relaciones de tensión deformación, se debe corregir la curva, que tiene una forma cóncava hacia arriba cerca del origen, mediante el ajuste de la ubicación del origen, por una extensión de la porción de línea recta de la curva de tensión - deformación hasta que corta el eje de abscisas.

Los valores de carga corregidos se determinarán para cada muestra en 0,10 y 0,20 pulgadas de penetración. Valores del soporte California se obtienen en porcentaje al dividir los valores de carga corregidos en 0,10 y 0,20 pulgadas para las cargas del patrón CBR de 1000 y 1500 PSI respectivamente, y la multiplicación de estas relaciones por 100.

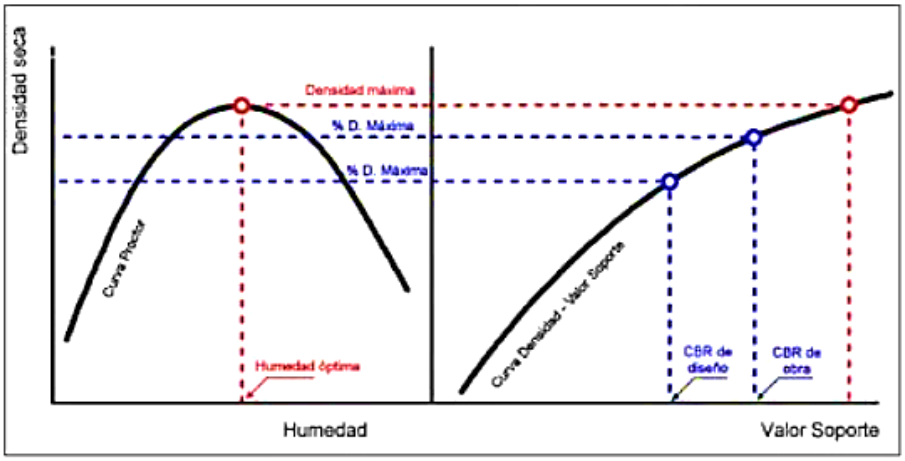
$$CBR = \frac{valor\ de\ carga\ corregida}{carga\ estándar} * 100$$

El CBR se selecciona generalmente a 0,1 pulgadas de penetración. Si la relación de penetración 0,2 pulgadas es mayor, deberá volver a efectuarse la prueba. Si la prueba de verificación da un resultado similar, se utilizará la relación de penetración de 0,2 pulgadas. Utilizando los datos obtenidos de las tres muestras, se obtiene la gráfica Densidad Seca -

CBR mediante la cual se puede obtener el CBR de acuerdo al porcentaje de compactación requerido.

Gráficamente se puede observar la importancia e influencia de la curva de compactación en el resultado de CBR. (AASHTO)

Figura 2.7. Relación de la curva de CBR con la curva de compactación



Fuente: Escuela de Ingería Civil, 2002. Compactación de suelos y materiales estabilizados. Universidad nacional del Rosario, Argentina.

Una vez finalizado el ensayo, el informe de la prueba correspondiente consta de los siguientes elementos:

– Esfuerzo de compactación (número de golpes por capa)

– Densidad seca

– Humedad

– % Hinchamiento

– % CBR

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE DATOS

CAPÍTULO III
RELEVAMIENTO DE DATOS

3.1 Ubicación

Yacuiba es una ciudad boliviana ubicada en el departamento de Tarija en el sur de Bolivia. Yacuiba es la capital de la Provincia Gran Chaco y está ubicada en la línea de frontera con Argentina, a orillas de la extremidad sur de la serranía del Aguaragüe. Según el censo oficial realizado en 2012, Yacuiba cuenta con una población 92.245 habitantes, lo que le convierte demográficamente en el segundo municipio más importante del departamento de Tarija, después de la capital Tarija. Geográficamente, Yacuiba se encuentra ubicado en la zona de las serranías y la llanura chaqueña, a una altura que oscila entre los 620 y 680 metros sobre el nivel del mar. Se analizará los distritos 1,2,3 y 4 de la ciudad de Yacuiba ya que estos se encuentran dentro de la zona urbana de la ciudad de Yacuiba.

Figura 3.1. Ubicación del municipio de Yacuiba en el departamento de Tarija

Fuente: Plan Territorial de Desarrollo Integral-G.A.M.Y.

3.2 Coordenadas geográficas de Yacuiba

El municipio de Yacuiba, primera sección municipal de la provincia Gran Chaco del departamento de Tarija, se encuentra ubicado en el subandino sur y la llanura del Chaco, a 543 km de la ciudad de Santa Cruz por la ruta 9 y a 357 km de la ciudad de Tarija. Se puede acceder por vía terrestre (camino vehicular ripiado con una parte asfaltada) desde Tarija; por ferrovía y camino asfaltado a través de la ruta Santa Cruz - Camiri - Villa Montes - República Argentina; y por vía aérea, ya que cuenta con un aeropuerto de mediana capacidad. La jurisdicción territorial del municipio de Yacuiba constituye una franja que se proyecta en la serranía del Aguaragüe y se extiende hasta la zona de transición hacia la llanura chaqueña, el cambio de formaciones vegetales que dan inicio a la mencionada área; geográficamente, el municipio, se encuentra localizado entre los:

S 21º 13´ 35,6 – 63º 33` 35,65¨ W en su extremo Nor-occidental,

S 22º03´05¨ – 63º 40´ 54¨ W, en su región Nor-oriental,

S 22º 0´ 00¨ – 63º 39´ 55,2¨ W Oeste en el extremo Sur-occidental

S 21º 59´ 57¨ – 62º 48´ 36,4¨ W Oeste.

3.2.1 Clima de Yacuiba

De acuerdo a la clasificación climática de Thornthwite, el área presenta características de clima subhúmedo mega termal en la zona de pie de monte y en la parte norte de la faja subandina. La región presenta temperaturas moderadas de verano con una media anual en esa época de 21,5ºC. Sin embargo, en los pequeños valles son frecuentes las heladas en invierno debido al lento descenso de aire frío en las laderas que lo limitan. Las precipitaciones fluctúan entre los 850 a 1.000 mm por año.

3.2.2 Selección de los puntos de estudio

PUNTO DE EXTRACCIÓN N° 1

Latitud: 21º 59' 20,97" S

Longitud: 63º 40' 38,95" O

PUNTO DE EXTRACCIÓN N° 2

Latitud: 21º 59' 14,87" S

Longitud: 63º 40' 45,15" O

Figura 3.2. Barrio San Gerónimo

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Proceso de estudio

3.3.1 Proceso de obtención de información: Barrio San Gerónimo “Yacuiba”

a) Equipos utilizados en la prueba

- Flexómetro
- Palas y picos
- Sacos

Figura. 3.3. Muestreo del suelo Punto de Extracción N°1 Y Punto de Extracción N°2

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Selección del Hidrogel

Se selecciona el Hidrogel Triturado seco, sin coloración, apto para el retenido de agua para las plantaciones, producto de la Industria SOCO.

Figura 3.4. Hidrogel bolsa de 250 kg

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Características generales del área de estudio

3.4.1 Contenido de Humedad y Clasificación (ASTM D2216)

a) Equipos utilizados en la prueba.

- Balanza de precisión.
- Taras.
- Horno de secado a temperatura de 100 ± 5 °C.
- Cucharones.

b) Procedimiento

- Se registran los pesos de las taras limpias en la balanza.
- Selección de la muestra representativa.
- Se colocan las muestras representativas en las taras para luego pesarse y anotarse.
- Se colocan las muestras en el horno por 12 horas a una temperatura de 100 ± 5 °C.
- Teniendo ya secadas las muestras se procede a pesar las dos muestras, registrando el peso.

Figura 3.5. Procedimiento del contenido de humedad

Se pesan las taras limpias

Se pesan las taras con suelo natural

Se colocan las taras con el suelo en el horno durante 24 horas.

Se sacan del horno las taras totalmente secas y se pesan cada una.

Fuente: Elaboración Propia

3 Toma de datos

Tabla 3.1. Tabla de humedad natural del suelo

HUMEDAD NATURAL			
Cápsula	**1**	**2**	**3**
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	139,8	110,6	124,20
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	128,8	102,2	115,40
Peso de cápsula (g)	17,8	18,6	18,00
Peso de suelo seco (g)	111	83,6	97,4
Peso del agua (g)	11	8,4	8,8
Contenido de humedad (%)	9,91	10,05	9,03
PROMEDIO	**9,66**		

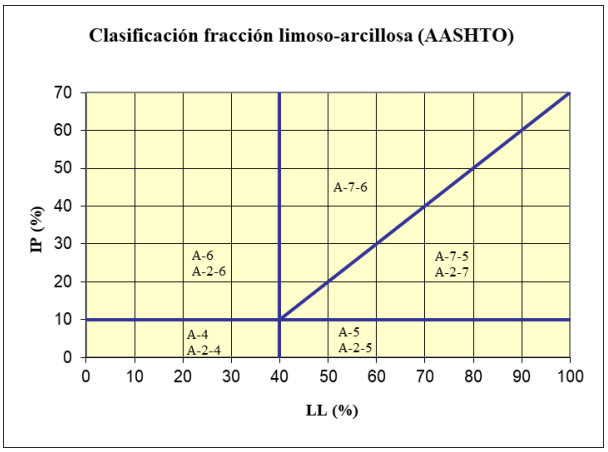
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2. Tabla de clasificación del suelo

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		**DESCRIPCIÓN**
SUCS:	GM	ARENOSA LIMOSA
AASHTO:	A-2-4	SUELO ARENA FINA
REGULAR A BUENA COMO SUBRASANTE		

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.1. Clasificación según AASHTO



Fuente: (AASHTO)

3.4.2 Análisis granulométrico (ASTM D 422 AASHTO T88)

a) Equipos utilizados en la prueba

- Balanza de precisión.
- Serie de tamices gruesos 25,4 mm (1"), 19,0 mm (¾"), 9,5 mm (3/8").
- Serie de tamices finos 4,76 mm (N° 4), 2,00 mm (N° 10), 0,840 mm (N° 20), 0,425 mm (N° 40), 0,150 mm (N° 100), y 0,075 mm (N° 200).
- Bandejas para almacenar muestras.
- Cepillo y brochas.

b) Procedimiento

- Se cuarteó la muestra de suelo natural para luego colocarla en el horno durante 24 horas a 100 + -5°C.
- Posteriormente, cuando la muestra alcanza la temperatura ambiente, se determina la cantidad necesaria para el ensayo, aproximadamente 2.000 g.
- Luego, con ayuda del tamiz #200, se realizó un lavado para eliminar las partículas finas, con precaución de no perder muestra durante el proceso.
- La muestra lavada se coloca en el horno durante 24 horas a 100 + -5 °C. Posteriormente, se tamiza teniendo en cuenta el orden de los tamices de forma decreciente.
- Finalmente, se registró el peso de la muestra retenida en cada tamiz.

Figura 3.6. Procedimiento de la granulometría del suelo

Se pesa la muestra del suelo natural

Se tiene que lavar la muestra por el tamiz N° 200

Muestra lavada

Se introduce la muestra al horno

Se pesa la muestra seca

Se introduce la muestra en la serie de tamices

Se agita los tamices para obtener la separación de las partículas

Resultados de la clasificación del suelo en los tamices

Fuente: Elaboración Propia

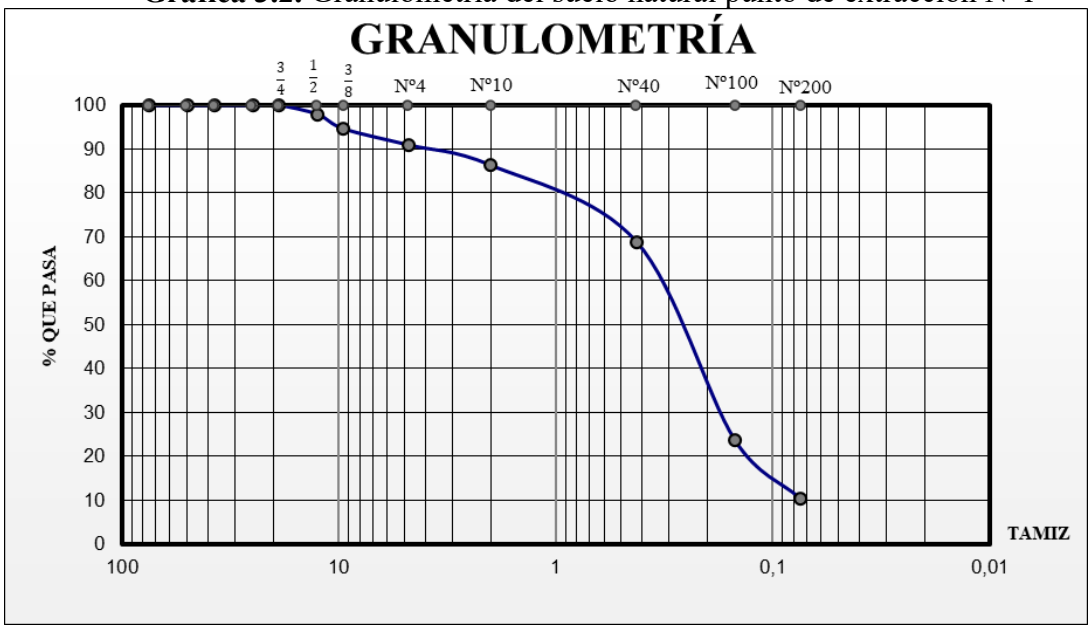
c) Toma de Datos

Tabla 3.3. Granulometría del suelo natural punto de extracción N°1

Peso Total (g.)			1037,2		
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	**75**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
2"	**50**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
1 1 /2"	**37,50**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
1"	**25,00**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
3/4"	**19,00**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
1/2"	**12,50**	21,70	21,70	2,09	**97,91**
3/8"	**9,50**	34,00	55,70	5,37	**94,63**
Nº4	**4,75**	38,50	94,20	9,08	**90,92**
Nº10	**2,00**	47,50	141,70	13,66	**86,34**
Nº40	**0,425**	180,70	322,40	31,08	**68,92**
Nº100	**0,15**	468,50	790,90	76,25	**23,75**
Nº200	**0,075**	138,70	929,60	89,63	**10,37**

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.2. Granulometría del suelo natural punto de extracción N°1



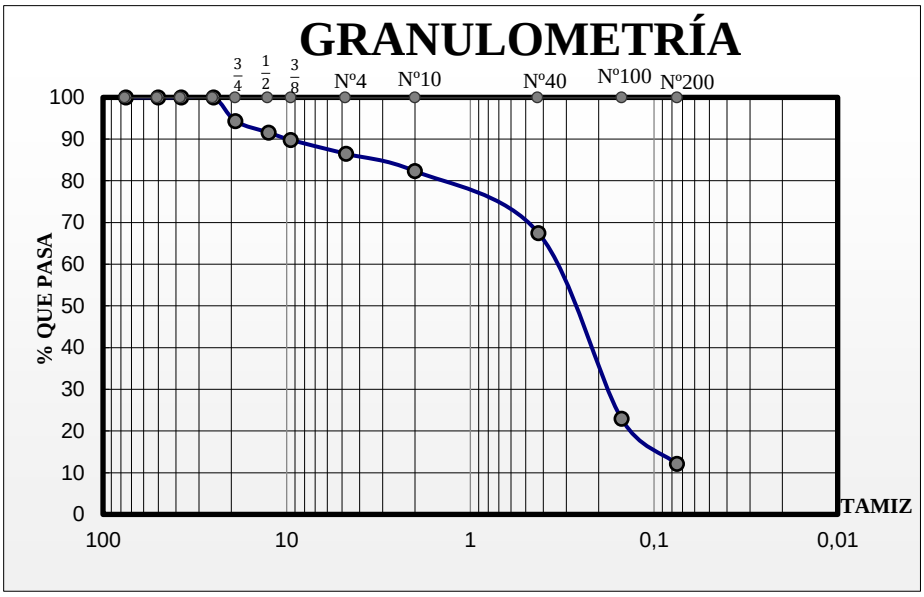
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4. Granulometría del suelo natural punto de extracción N°2

Peso Total (g.)			**1035,7**		
Tamices	**Tamaño (mm)**	**Peso Ret. (g)**	**Ret. Acum (g)**	**% Ret**	**% Que Pasa del Total**
3"	**75**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
2"	**50**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
1 1 /2"	**37,50**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
1"	**25,00**	0,00	0,00	0,00	**100,00**
3/4"	**19,00**	58,90	58,90	5,69	**94,31**
1/2"	**12,50**	28,70	87,60	8,46	**91,54**
3/8"	**9,50**	18,10	105,70	10,21	**89,79**
Nº4	**4,75**	34,40	140,10	13,53	**86,47**
Nº10	**2,00**	43,10	183,20	17,69	**82,31**
Nº40	**0,425**	154,10	337,30	32,57	**67,43**
Nº100	**0,15**	461,20	798,50	77,10	**22,90**
Nº200	**0,075**	111,70	910,20	87,88	**12,12**

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.3. Granulometría del suelo natural punto de extracción N°2



Fuente: Elaboración Propia

3.4.3 Límites de Atterberg (ASTM D4318 AASHTO T90-T89)

3.4.3.1 Ensayo de límite líquido

a) Equipos utilizados en la prueba

- Cuchara de Casagrande
- Ranurador
- Balanza de precisión
- Taras
- Espátula
- Plato de porcelana
- Pipeta con agua
- Tamiz N°40
- Vidrio esmerilado para rodadura

b) Procedimiento

- Teniendo como material previamente seco, se toma una muestra de aproximadamente 150 g, la cual fue tamizada previamente mediante el tamiz N° 40.

- Se coloca la muestra de suelo en la vasija de porcelana, a la que se le adiciona agua, y luego se amasa y se taja con la espátula de forma alternativa y repetitiva hasta obtener una pasta homogénea.

- Se procede a colocar la cantidad de suelo que se puede contener con la espátula en la cuchara de Casagrande. Luego, se nivela el suelo con la espátula, emparejando sin dejar vacíos, hasta obtener una superficie plana con una profundidad aproximada de 1 cm al nivel en que esté llenado el equipo.

- Seguidamente, se separa por la mitad la masa de suelo de la cazuela, realizando una pasada firme con el acanalador al nivel de la cuchara, hasta lograr que se separen completamente las dos partes.

- Se manipula la cuchara de Casagrande girando la manija a una velocidad constante, hasta lograr que las dos mitades se junten a lo largo de la ranura en una distancia de 0.5 pulgadas, anotando la cantidad de golpes necesarios para que se junten.

- Durante la realización de esta práctica, al separar el suelo por la mitad y girar la manija a una velocidad constante, se observa que se requieren un máximo de 6 golpes para que las dos mitades se unan. Por lo tanto, no existe un Límite Líquido.

c) Toma de Datos

Tabla 3.5. de Límite líquido del suelo natural

Cápsula Nº	**1**	**2**	**3**	**4**
Nº de golpes	**6**	**5**	**5**	**6**
Suelo Húmedo + Cápsula (g)	0	0	0	0
Suelo Seco + Cápsula (g)	0	0	0	0
Peso del agua (g)	0	0	0	0
Peso de la Cápsula (g)	0	0	0	0
Peso Suelo seco (g)	0	0	0	0
Porcentaje de Humedad (%)				

Fuente: Elaboración Propia

(NO TIENE LÍMITE LÍQUIDO)

3.4.3.2 Ensayo de límite plástico

a) Equipos utilizados en la prueba

- Espátula.
- Recipiente de porcelana.
- Balanza de precisión.
- Horno de secado, capaz de mantener una temperatura de 100°C ± 5°C.
- Tamiz N°40.
- Taras para almacenar y secar material.
- Superficie de rodadura de vidrio.

b) Procedimiento

- Se prepara 20 g. de muestra que pasa el tamiz N°40, luego se amasa la muestra con agua, hasta que forme una pasta homogénea en color y textura, sin que la muestra esté demasiado pastosa.
- Se moldea cilindros con la masa preparada previamente sobre una superficie totalmente horizontal como puede ser una superficie de vidrio.
- En la realización de la práctica al ser un suelo areno-limoso no cuenta con la textura de realizar los cilindros de masa de suelo, estos al ser amasados y querer moldearlos se agrietan en su totalidad quebrándose. Por lo tanto, no cuenta con Limite Plástico.

c)Toma de Datos

(NO TIENE LIMITE PLÁSTICO)

Figura 3.7. Límite líquido y límite plástico

Fuente: Elaboración Propia

3.4.4 Compactación (AASHTO T-180/ ASTM D1557)

a) Equipos utilizados en la prueba

- Un molde que tenga en promedio 6 plg. de diámetro interior, una altura de 4,58 plg. y un volumen de 2124 cm^3.
- Pistón o martillo con una masa de 4,54 kg y una altura de caída de 457,2 mm.

- Balanza de precisión.
- Horno de secado, capaz de mantener temperatura de 100°C ± 5°C.
- Regla metálica.
- Tamiz N°4.
- Bandejas para almacenar material.
- Taras para almacenar y secar material.
- Espátula.

b) Procedimiento

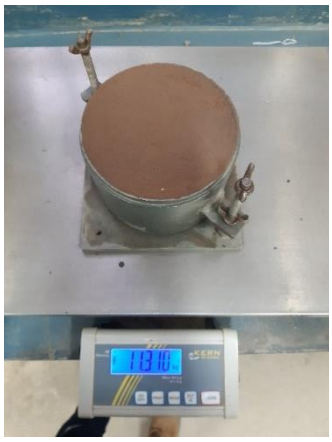
- Se preparó la muestra de suelo previamente secada, en una cantidad aproximada de 20 kg para los 4 puntos que se desea determinar. Posterior a este paso se tamiza a través de las mallas N°4, de esta manera se observó que menos del 20% del material es retenido en el tamiz N° 4.
- Previo al mezclado, se determinó los % de humedad a aplicarse al 8%, 10% ,12% y 15% de agua pura.
- Para los diferentes ensayos siguientes se introduce el hidrogel en el agua en sus respectivas cantidades de 0,5g, 1g, 1,5g, y en su C.H.O. se deja reposando 30 min.
- Posteriormente se preparó 4 especímenes (4 puntos) de 5 kg aproximadamente donde cada uno fue adicionado con contenidos de humedad distintos, con ello, se quiere encontrar el contenido de humedad óptimo más cercano.
- Cada espécimen fue compactado en 5 capas, cada una compactada a 56 golpes.
- Luego de haber acabado con la compactación de 5 capas, se procede a retirar el collarín y se nivela la superficie con ayuda de una regla metálica para luego registrar el peso del molde + suelo húmedo.
- Finalmente se toma el contenido de humedad de cada muestra, para que sea representativa, se extrae de la parte media en mayor proporción.

Figura 3.8. Procedimiento de la compactación

Se Tamiza y se pesa la muestra 5000 g, agregándole el porcentaje de humedad requerida

Se empieza a compactar en el molde T-180, con 5 capas de 56 golpes

Se enrasa y se pesa el molde con el suelo



Se saca del medio una porción de suelo

Se pesa la muestra y se coloca en el horno durante 24 horas. Al finalizar ese tiempo, se pesa la muestra seca.

Fuente: Elaboración Propia

4 Toma de datos:

Tabla 3.7. Tabla de 1ra compactación del suelo natural

Muestra: Única	**Volumen:** 2124 cm^3

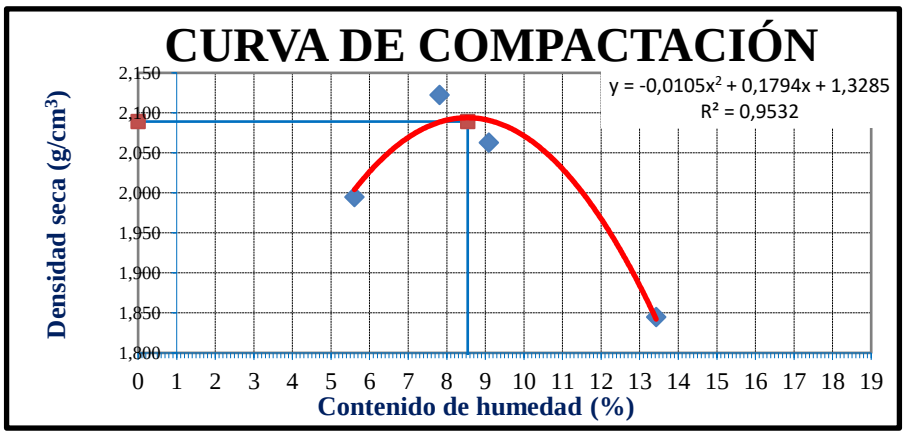
Nº de capas	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (g)	11010,00	11395,00	11315,00	10980,00
Peso del molde (g)	6535	6535	6535	6535
Peso suelo húmedo (g)	4475	4860	4780	4445
Volumen de la muestra (cm^3)	2124,0	2124,0	2124,0	2124,0
Densidad suelo húmedo (g/cm^3)	2,11	2,29	2,25	2,09

Cápsula Nº	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + cápsula (g)	95,40	95,01	82,12	88,22
Peso suelo seco + cápsula (g)	91,00	89,02	76,31	79,26
Peso del agua (g)	4,4	5,99	5,81	8,96
Peso de la cápsula (g)	12,53	12,34	12,4	12,53
Peso suelo seco (g)	78,47	76,68	63,91	66,73
Contenido de humedad (%)	**5,61**	**7,81**	**9,09**	**13,43**
Densidad suelo seco (g/cm^3)	**2,00**	**2,122**	**2,063**	**1,85**

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.4. 1ra Curva de compactación

Ecuación de la curva: $y = -0{,}105 + 0{,}1794x + 1{,}3285$



Densidad Máxima	**2,09 g/cm^3**
Humedad Óptima	**8,54 %**
Densidad al 95%	**1,98 g/cm^3**

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.8. Tabla de resultados de compactación del 1er punto de extracción

	Compactación	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad Optima (%)	Densidad al 95% (g/cm^3)
Suelo Natural	C1	2,09	8,45	1,98
	C2	2,09	8,08	1,98
	C3	2,09	8,65	1,98
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	C4	2,03	8,23	1,93
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	C5	2,01	8,67	1,91
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	C6	2,01	9,50	1,91
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su C.H.O.	C7	2,04	8,58	1,94

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.9. Tabla de resultados de compactación del 2do punto de extracción

	Compactación	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad Óptima (%)	Densidad al 95%(g/cm^3)
Suelo Natural	C8	2,04	11,75	1,94
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	C9	2,03	8,57	1,92
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	C10	2,04	9,32	1,94
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	C11	2,02	9,13	1,91
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su C.H.O.	C12	2,05	11,03	1,95

Fuente: Elaboración Propia

3.4.5 Relación de Soporte de California CBR (ASTM D 1883 AASHTO -193)

a) Equipos utilizados en la prueba

- Prensa para realizar la penetración de un pistón en el espécimen, con su respectivo anillo de carga.
- Molde metálico de 6” de diámetro interior, con una altura de 7”.
- Un disco espaciador metálico de 5 15/6” de diámetro exterior y 2,41” de espesor.
- Pistón con una masa de 4,54 kg con altura de caída de 457,2 mm.
- Pesas ranuradas con una masa de 4,54 kg, con un agujero central de 2 1/8” de diámetro.
- Pistón de penetración, metálico de sección transversal circular.
- Diales de recorrido mínimo de 25 mm y divisiones lecturas de 0,025 mm.
- Tanque para inmersión de moldes.
- Balanza de precisión.
- Horno de secado, capaz para mantener una temperatura de 100°C ± 5°C.

- Tamiz N°4.
- Bandejas para almacenamiento de material.
- Cuchara.

b) Procedimiento

- Se prepara la muestra en una cantidad aproximada de 5 kg.
- Se anota el peso del molde, así como las dimensiones de éste, como altura, diámetro para determinar su volumen.
- Previo a la compactación de cada molde se debe tener como requisito el contenido de humedad óptimo para alcanzar la máxima densidad seca, es por ello por lo que el material es secado previamente para así determinar la cantidad de agua necesaria con mayor precisión.
- Con el contenido de humedad óptimo se introduce el hidrogel en sus respectivas proporciones para cada molde, se debe esperar 30 min hasta que el hidrogel se hidrate con el agua en su totalidad.
- Se prepararon tres moldes de CBR los cuales se componen por el número de golpes 12, 25, 56 golpes.
- Luego se introduce el disco espaciador sobre la base y sobre éste un papel filtro, de esta manera asegurando que el suelo no se adhiera con el disco durante la compactación.
- Teniendo todos los pasos anteriores, llevamos a la etapa de compactación de cada molde con su número determinado de golpes 12, 25, 56 cuya distribución es de 5 capas para cada molde.
- Posterior a la compactación se retira el collarín superior del molde y se nivela o enrasa, de manera que la superficie sea uniforme.
- Se pesa el molde que contiene el suelo compactado, quitando el disco espaciador.
- Se coloca el papel filtro sobre la base de manera invertida a comparación del inicio.
- Se coloca la placa perforada con el vástago y las sobrecargas previamente determinadas y cuyo valor se debe registrar.
- Una vez compactado los 3 moldes se sumergen en el tanque de agua que se encuentra en el laboratorio, teniendo en consideración que cada molde debe estar acompañado con sobrecargas. Asegurándose de que el nivel del agua cubra la totalidad del molde de CBR,

se monta el trípode con el dial para la medición de la expansión, marcando los puntos exactos de contacto de las tres patas del trípode.

- Las mediciones de expansión se registran cada 24 horas para cada uno de los moldes. Pasado los 4 días de inmersión estas se retiran para que drenen todo el exceso de agua por un tiempo de 15 minutos un posterior secado de sus superficies.
- Se transportan los moldes, incluyendo las sobrecargas a la máquina de compresión. Se toma los datos del esfuerzo en las diferentes deformaciones hasta llegar a 0,5".
- La compresión con una velocidad de penetración de 1,27 mm por minuto.

Figura 3.9. Procedimiento de la elaboración del C.B.R

Se pesa la muestra 5 kg para un molde, se introduce el porcentaje de agua con el hidrogel y se compacta 5 capas de 12 golpes, 25 golpes y 56 golpes.

Se enrasa y se pesa el molde con el suelo compactado

Se lectura con el extensómetro

Se introducen en la piscina de agua los tres moldes con sus respectivas pesas y se lectura con el extensómetro cada 24 horas por 4 días.

Se colocan de uno en uno los moldes en el equipo de C.B.R. y se lectura su deformación con la carga respectiva.

Fuente: Elaboración Propia

c) Toma de Datos

Tabla 3.10. Tabla del contenido de humedad y peso unitario

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	12			25			56		
CONDICIÓN DE MUESTRA	A. de M.		D. de M.	A. de M.		D. de M	A. de M.		D. de M
Peso muestra húm.+ molde (g)	11470		11610	12600		12695	11990		12050
Peso Molde	7050		7050	7995		7995	7240		7240
Peso muestra húmeda	4420		4560	4605		4700	4750		4810
Volumen de la muestra	2136,20		2162,27	2139,72		2155,86	2123,20		2133,82
Peso Unit. Muestra Húm.	2,069		2,109	2,152		2,180	2,237		2,254
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Medio	Superf.	Fondo	Medio	Superf.	Fondo	Medio	Superf.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	85,29	75,16	60,01	96,37	71,45	56,26	63,82	97,8	95,58
Peso muestra seca + tara	78,31	69,25	55,42	88,8	66,63	52,66	59,71	91,51	88,95
Peso del agua	6,98	5,91	4,59	7,57	4,82	3,6	4,11	6,29	6,63
Peso de tara	12,45	12,05	12,97	12,92	12,6	12,77	13,13	13,44	13,54
Peso de la muestra seca	65,86	57,2	42,45	75,88	54,03	39,89	46,58	78,07	75,41
Contenido humedad %	10,60	10,33	10,81	9,98	8,92	9,02	8,82	8,06	8,79
Promedio cont. Humedad	**10,58**			**9,31**			**8,56**		
Peso Unit. muestra seca	1,851		**1,907**	1,926		**1,994**	2,002		**2,076**

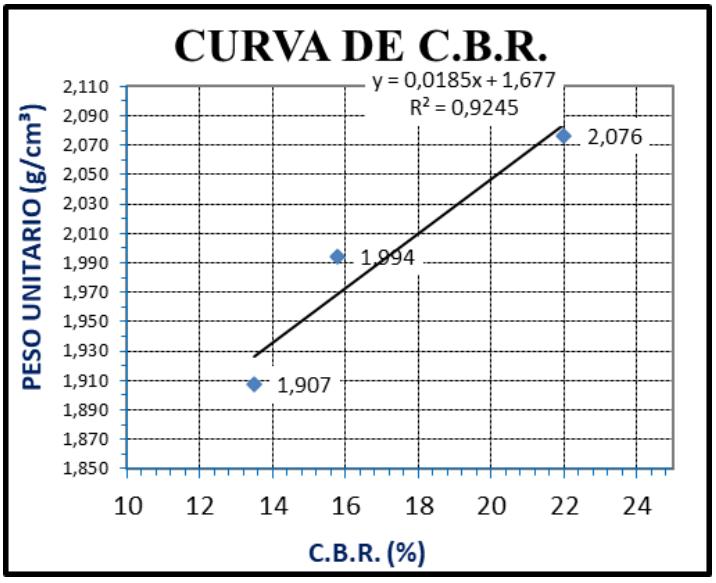
Tabla 3.11. Expansión

EXPANSIÓN											
FECHA	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.	%
2-jul	10:23	0	12,12	1,212	0	12,36	1,236	0	12,12	1,212	0
3-jul	16:00	1	12,14	1,214	0,017	12,07	1,207	-0,250	12,69	1,269	0,491
4-jul	10:34	2	12,14	1,214	0,017	12,00	1,2	-0,310	12,62	1,262	0,431
5-jul	17:00	3	12,12	1,212	0,000	11,92	1,192	-0,379	12,59	1,259	0,405
8-jul	15:30	4	12,13	1,213	**0,009**	11,94	1,194	**-0,362**	12,59	1,259	**0,405**

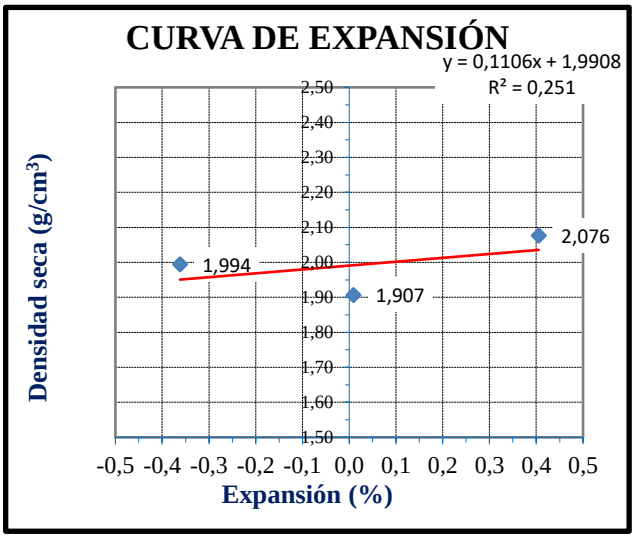
Tabla 3.12. Carga de penetración

PENETRACIÓN		CARGA NORMAL	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3			
			CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG		CARGA ENSAYO		C.B.R. CORREG	
Pulg.	mm	Kg	Kg	Kg/cm^2	Kg	%	Kg	Kg/cm^2	Kg	%	Kg	Kg/cm^2	Kg	%
0	0		0,0	0			0,0	0			0,0	0		
0,025	0,63		94,0	4,9			144,8	7,5			116,7	6,0		
0,05	1,27		111,7	5,8			178,3	9,2			165,4	8,5		
0,075	1,9		170,5	8,8			196,5	10,2			180,9	9,3		
0,1	2,54	1360	183,5	9,5		**13,5**	214,7	11,1		**15,8**	299,4	15,5		**22,0**
0,2	5,08	2040	219,9	11,4		**10,8**	299,4	15,5		**14,7**	386,1	19,9		**18,9**
0,3	7,62		227,8	11,8			323,6	16,7			399,8	20,7		
0,4	10,16		222,6	11,5			302,1	15,6			361,5	18,7		
0,5	12,7		225,2	11,6			286,0	14,8			326,3	16,9		

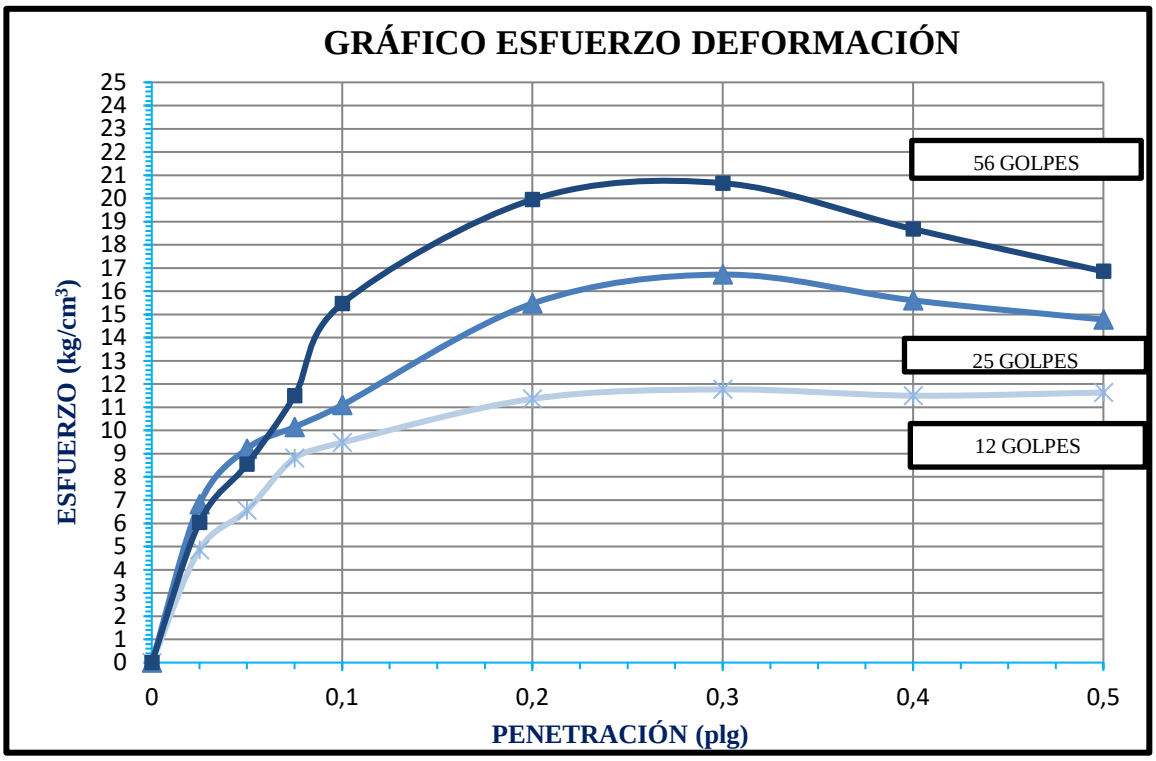
Gráficas 3.5. CBR. del suelo natural



Gráficas 3.6. Curva de expansión del suelo natural



Gráfica 3.7. Esfuerzo deformación del suelo natural



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.13. Tabla de resultados de los ensayos de CBR

Punto de extracción N°1	CBR	CBR 100% D. Max (%)	CBR 95% D. Max (%)	Exp. 100% D. Max (%)	Exp. 95% D. Max (%)
Suelo Natural	CBR1	7	5	0,56	0,19
	CBR2	7	5	0,59	0,25
	CBR3	7	5	0,56	0,29
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	CBR4	13	9	0,64	0,12
	CBR5	14	10	0,69	0,16
	CBR6	13	9	1,42	-0,06
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	CBR7	14	10	-0,05	0,02
	CBR8	15	10	-0,09	0,01
	CBR9	15	10	-0,02	-0,01
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	CBR10	24	17	-1,15	-0,59
	CBR11	24	17	1,18	0,59
	CBR12	25	18	1,26	0,65
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su CHO	CBR13	26	19	-1,30	0,73
	CBR14	29	20	1,66	0,93
	CBR15	26	19	1,29	0,75

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.14. Tabla de resultados de los ensayos de CBR

Punto de extracción N°2	CBR	CBR 100% D. Max (%)	CBR 95% D. Max (%)	Exp. 100% D. Max (%)	Exp. 95% D. Max (%)
Suelo Natural	CBR16	20	14	0,49	-0,44
	CBR17	19	12	1,54	-3,37
	CBR18	20	10	23,90	-54,75
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	CBR19	22	14	0,09	0,18
	CBR20	21	13	-0,08	-0,18
	CBR21	21	12	-0,02	-0,21
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	CBR22	15	11	-0,15	-0,05
	CBR23	15	10	0,17	0,05
	CBR24	15	10	0,16	0,04
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	CBR25	26	17	1,34	0,64
	CBR26	26	18	1,39	0,69
	CBR27	27	19	1,42	0,73
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su CHO	CBR28	30	22	1,70	1,04
	CBR29	32	23	1,88	1,08
	CBR30	30	23	1,71	1,08

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de los límites Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg, para el límite líquido sólo se pudieron realizar 6 golpes como máximo ya que se llegaban a unir en el medio con facilidad.

Para el límite plástico, no se pudieron realizar los cilindros debido a que el suelo se agrietaba y se quebraba, ya que es un suelo limoso-arenoso.

Tabla 4.1. Límite Líquido

Capsula Nº	**1**	**2**	**3**	**4**
Nº de golpes	**6**	**5**	**5**	**6**
Suelo Húmedo + Cápsula (g)	0,00	0,00	0,00	0,00
Suelo Seco + Cápsula (g)	0	0	0	0
Peso del agua (g)	0	0	0	0
Peso de la Cápsula (g)	0	0	0	0
Peso Suelo seco (g)	0	0	0	0
Porcentaje de Humedad (%)				

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4.2. Límite Plástico

Cápsula	**1**	**2**	**3**
Peso de suelo húmedo + Cápsula (g)	0,00	0,00	0,00
Peso de suelo seco + Cápsula (g)	0,00	0,00	0,00
Peso de cápsula (g)	0,00	0,00	0,00
Peso de suelo seco (g)	0,00	0,00	0,00
Peso del agua (g)	0,00	0,00	0,00
Contenido de humedad (%)	**0,00**	**0,00**	**0,00**

Fuente: Elaboración Propia

Por lo tanto el suelo en estudio no cuenta con Límite Líquido ni Límite Plástico.

Se lo denomina NP.

4.2 Análisis de la compactación de los suelos con Hidrogel Hidratado

Las pruebas del ensayo de compactación se realizaron con diferentes cantidades de hidrogel hidratado con el contenido de agua calculado, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4.3. Resultados de la compactación del punto de extracción N°1

Muestra Punto de extracción N°1	**Compactación**	**Densidad Máxima** (g/cm^3)	**Humedad Óptima (%)**	**Densidad al 95%** (g/cm^3)
Suelo Natural	C1	2,09	8,45	1,98
	C2	2,09	8,08	1,98
	C3	2,09	8,65	1,98
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	C4	2,03	8,23	1,93
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	C5	2,01	8,67	1,91
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	C6	2,01	9,50	1,91
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su CHO	C7	2,04	8,58	1,94

Fuente: Elaboración Propia

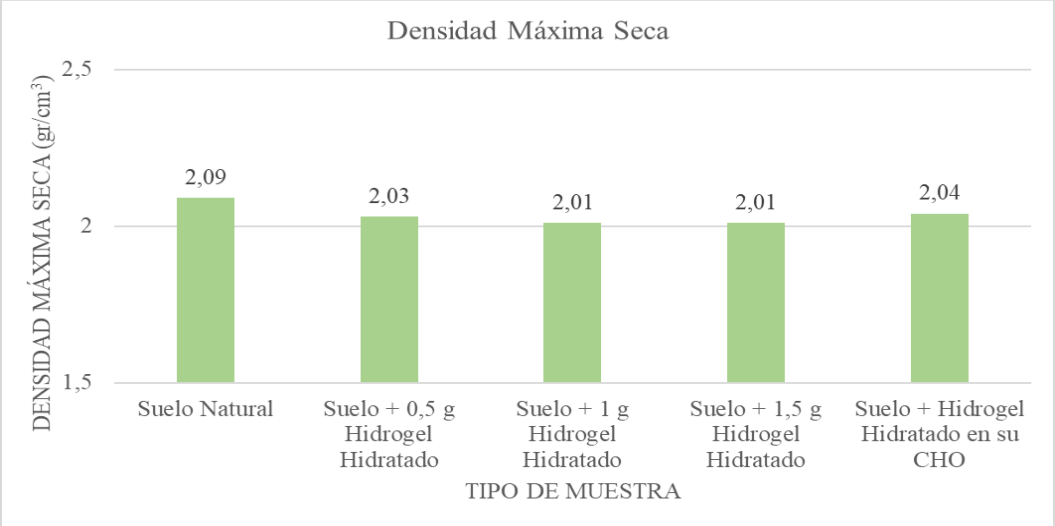
Los resultados obtenidos de los ensayos de compactación se graficaron para diferenciar y comparar el comportamiento de la Humedad Óptima y los valores del peso unitario seco máximo, observando la mejor compactación del suelo del primer punto de extracción.

Tabla 4.4. Resumen de resultados de compactación del Punto N°1

Muestras	Densidad Máxima Seca (g/cm^3)	Contenido de Humedad %
Suelo Natural	2,09	8,45
Suelo + 0,5 g Hidrogel Hidratado	2,03	8,23
Suelo + 1 g Hidrogel Hidratado	2,01	8,67
Suelo + 1,5 g Hidrogel Hidratado	2,01	9,5
Suelo + Hidrogel Hidratado en su CHO	2,04	8,58

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.1. Densidad máxima seca del punto de extracción N°1



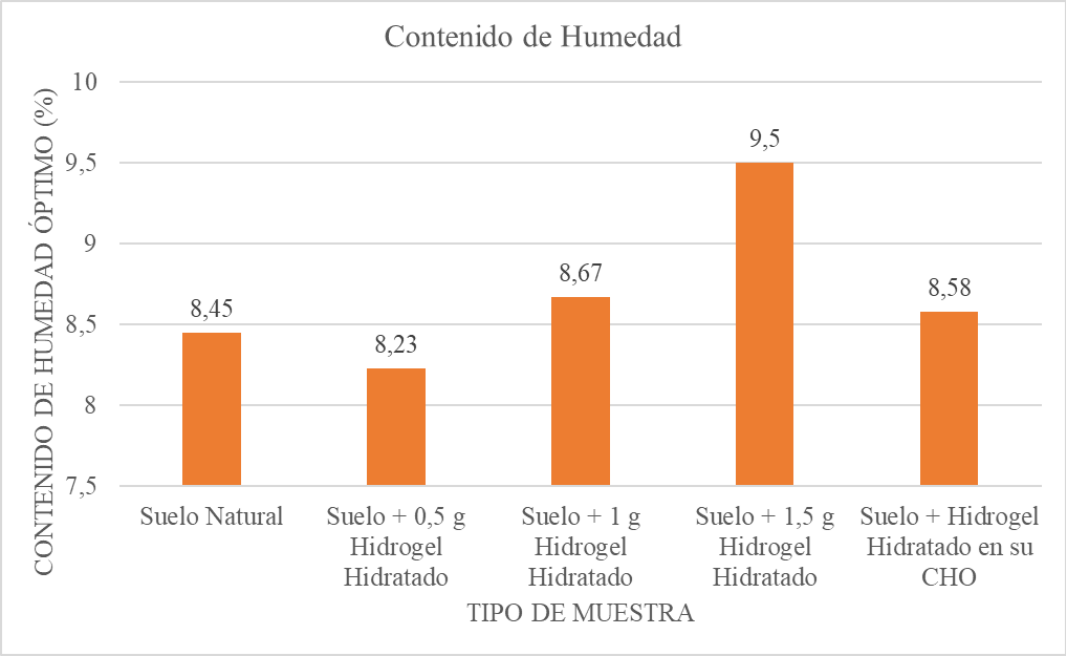
Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en la gráfica el comportamiento que toma el suelo natural al ser sometido a las distintas cantidades de hidrogel hidratado incorporado. El suelo natural tiene mayor peso por volumen estando en sus condiciones naturales.

Mientras más se introduce el polímero que es el hidrogel esta densidad del suelo va disminuyendo, su varianza no es muy alta, equivale a $0.08 g/cm^3$ en el caso más extremo que es al incorporar en un 1,5 g de Hidrogel Hidratado.

Al someterse el suelo a una cantidad de hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima, se observa un aumento en su densidad, alcanzando un valor de 2,04 g/cm³, con una diferencia de 0,05 g/cm³ respecto al suelo natural.

Gráfica 4.2. Contenido de humedad del punto N°1



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica de Contenido de Humedad, se puede observar el comportamiento del suelo natural que llega a tener un valor de 8,45 % de humedad esta sería la humedad natural del suelo.

A medida que se van introduciendo las cantidades de hidrogel, se observa que este comportamiento tiende a aumentar. Esto se refiere a que se utilizó un porcentaje de 8%, 10%, 12% y 15% de agua para los ensayos de compactación. A estas cantidades de agua se les incorporó el hidrogel en las proporciones que se indican.

Llegando a observar que el valor más alto es de 9,5% el cual se sometió el ensayo con una incorporación de 1,5 g de hidrogel, esto quiere decir que al tener mayor cantidad de hidrogel este pudo absorber más agua, llegando a estar mejor Hidratado el Polímero.

Tabla 4.5. Resultados de la compactación del punto de extracción N°2

Muestra Punto de extracción N°2	Compactación	Densidad Máxima (g/cm^3)	Humedad Óptima (%)	Densidad al 95% (g/cm^3)
Suelo Natural	C8	2,04	11,75	1,94
Suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado	C9	2,03	8,57	1,92
Suelo Natural + 1g Hidrogel hidratado	C10	2,04	9,32	1,94
Suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado	C11	2,02	9,13	1,91
Suelo Natural + Hidrogel hidratado en su CHO	C12	2,05	11,03	1,95

Fuente: Elaboración Propia

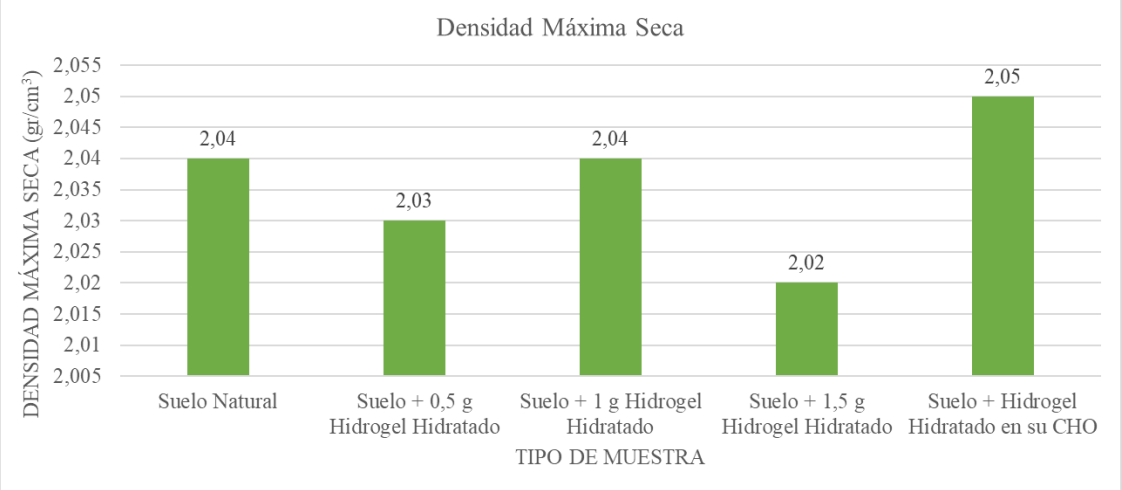
Los resultados obtenidos de los ensayos de compactación se graficaron para diferenciar y comparar el comportamiento de la úumedad óptima y los valores del peso unitario seco máximo, observando la mejor compactación del suelo del segundo punto de extracción.

Tabla 4.6. Resumen de resultados de compactación del punto N°2

Muestras	Densidad Máxima Seca (g/cm^3)	Contenido de Humedad %
Suelo Natural	2,04	11,75
Suelo + 0,5 g Hidrogel Hidratado	2,03	8,57
Suelo + 1 g Hidrogel Hidratado	2,04	9,32
Suelo + 1,5 g Hidrogel Hidratado	2,02	9,13
Suelo + Hidrogel Hidratado en su CHO	2,05	11,03

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.3. Densidad máxima seca del punto N°2



Fuente: Elaboración Propia

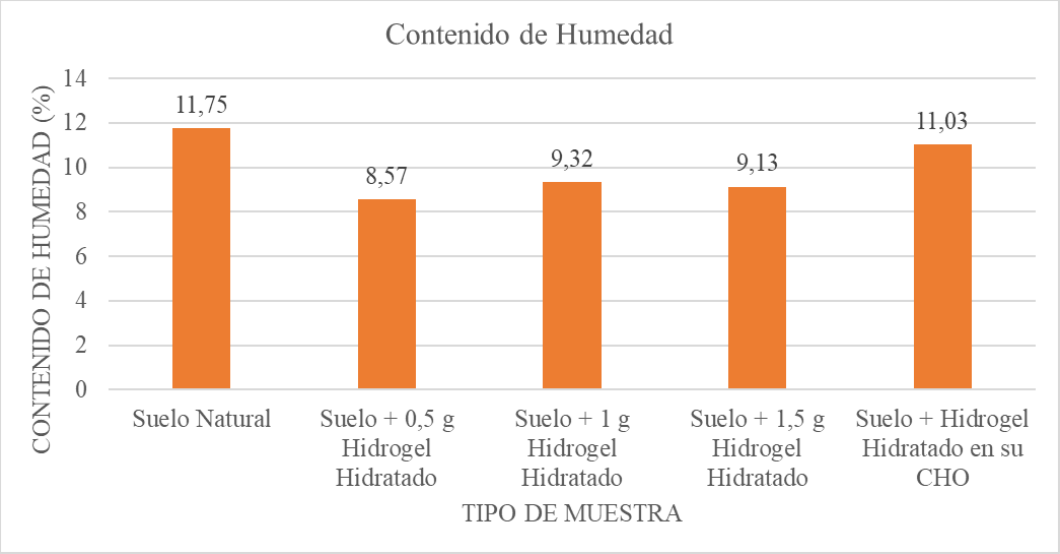
Se puede observar en la gráfica 4.3, el comportamiento que toma el suelo natural al ser sometido a las distintas cantidades de hidrogel hidratado incorporado. El suelo natural más el hidrogel hidratado en su CHO tiene mayor peso por volumen estando en sus condiciones mejoradas.

Mientras más se introduce el polímero que es el hidrogel, esta densidad del suelo es variable, su varianza no es muy alta equivale a un 0,03 g/cm^3 en el caso más extremo que es al incorporar el hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima.

Al someterse el suelo con una cantidad de 1,5 g de hidrogel hidratado, se observa una disminución en su densidad, alcanzando un valor de 2,02 g/cm³, que es el valor más bajo

según la gráfica mostrada. Esto representa una diferencia de 0,02 g/cm³ respecto al suelo natural y 0,03 g/cm³ respecto al valor más alto.

Gráfica 4.4. Contenido de humedad del punto N°2



Fuente: Elaboración Propia

En la Grafica de Contenido de Humedad, se puede observar el comportamiento del suelo natural que llega a tener un valor de 11,75 % de humedad esta sería la humedad natural del suelo.

Cuando se va introduciendo las cantidades de hidrogel este comportamiento opta por ir disminuyendo, esto se refiere que se utilizó el porcentaje de 8%, 10%, 12% y 15% de agua para los ensayos de compactación, a estas cantidades se les va incorporando el hidrogel en las proporciones que indica.

Se observa que el valor más alto corresponde al suelo natural con un 11,75%, y el siguiente valor más alto es el del ensayo con la incorporación de hidrogel hidratado en su contenido óptimo. Esto indica que, al tener mayor cantidad de hidrogel, éste pudo absorber más agua, logrando una mejor hidratación del polímero.

Una condición ideal es que, al someter el suelo natural con el hidrogel hidratado en su contenido óptimo, se reduce el consumo de agua.

4.3 Análisis del CBR según el porcentaje de Hidrogel Hidratado

4.3.1 Relación de Soporte de California con el suelo natural

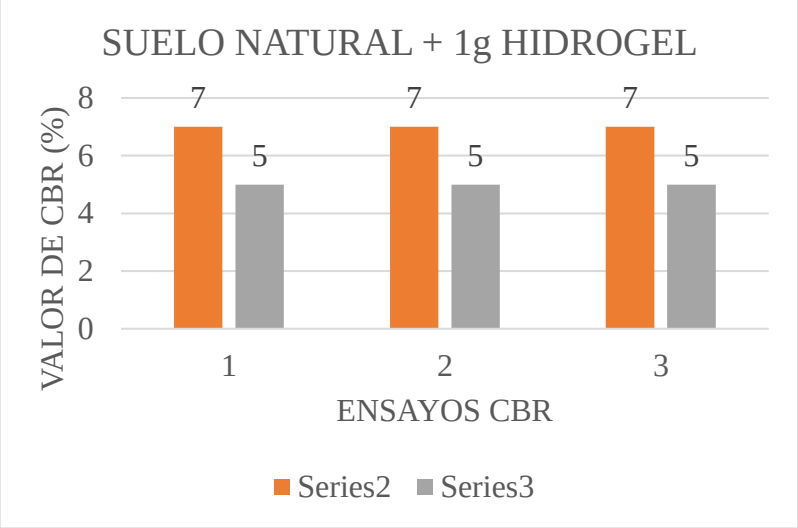
La muestra a ensayar es un suelo natural clasificado como A-2-4, arena - limosa**.**

Tabla 4.7. CBR suelo natural punto de extracción N°1

Muestras Punto de extracción N°1	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo Natural	1	7	5
	2	7	5
	3	7	5

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.5. CBR del suelo natural, punto de extracción N°1



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio se obtuvo un resultado de C.B.R. al 100% un valor de 7% y un C.B.R. al 95% tiene un valor de 5% este resultado de 7% como sub rasante llega a ser una sub rasante mala.

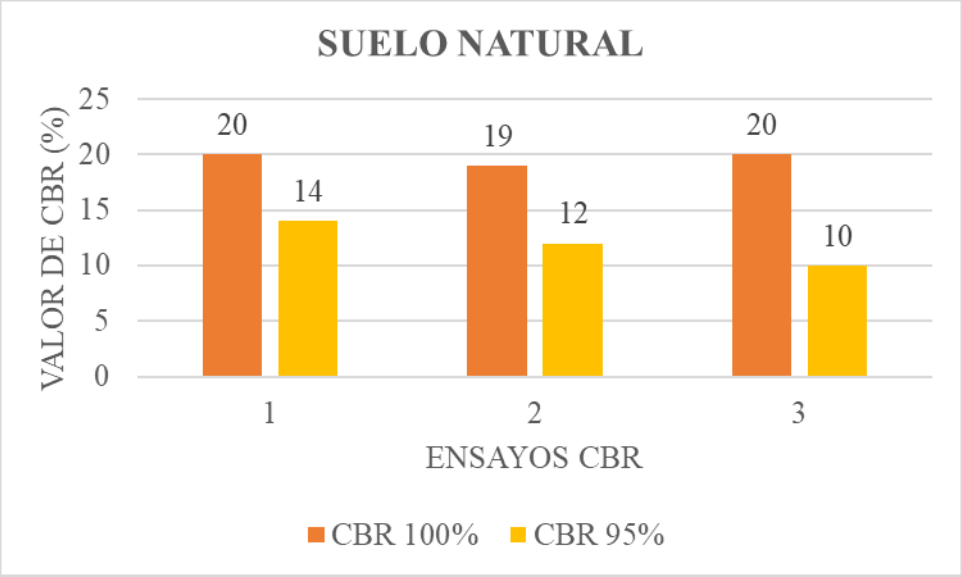
En este C.B.R. se puede apreciar que el suelo es más limoso, sus partículas son más finas.

Tabla 4.8. CBR suelo natural punto de extracción N°2

Muestras Punto de extracción N°2	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo Natural	16	20	14
	17	19	12
	18	20	10

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.6. CBR del suelo natural, punto de extracción N°2



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 20% y un valor de C.B.R. al 95% de 12%. Este resultado de 20% indica que la subrasante clasifica como regular a buena.

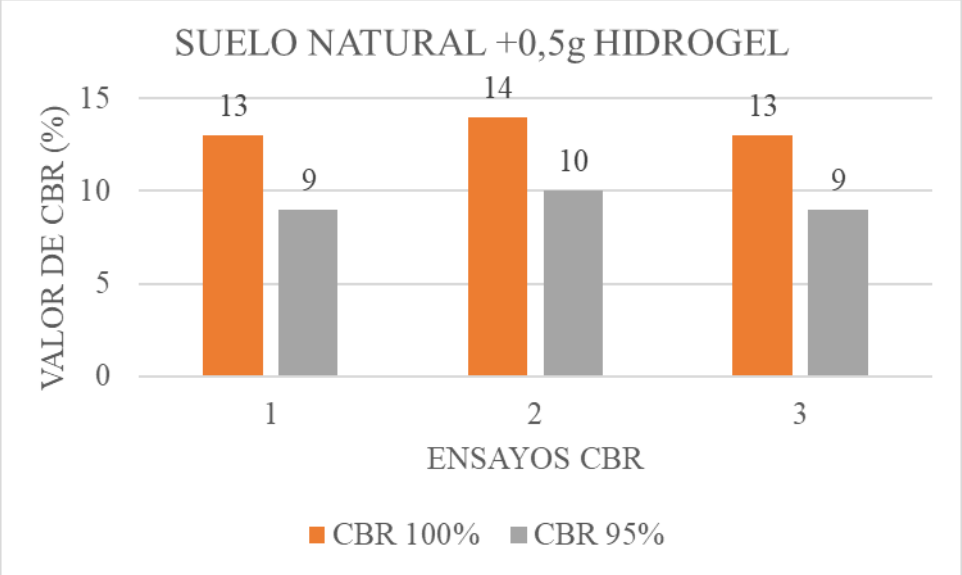
4.3.2 Relación del CBR con el suelo Natural + 0,5g Hidrogel hidratado

Tabla 4.9. CBR suelo natural + 0,5g hidrogel punto de extracción N°1

Muestras Punto de extracción N°1	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 0,5 g Hidrogel Hidratado	4	13	9
	5	14	10
	6	13	9

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.7. CBR del suelo natural + 0,5g hidrogel, punto de extracción n°1



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 13% y un valor de C.B.R. al 95% de 9%. Este resultado de 13% indica que la subrasante clasifica como regular a buena.

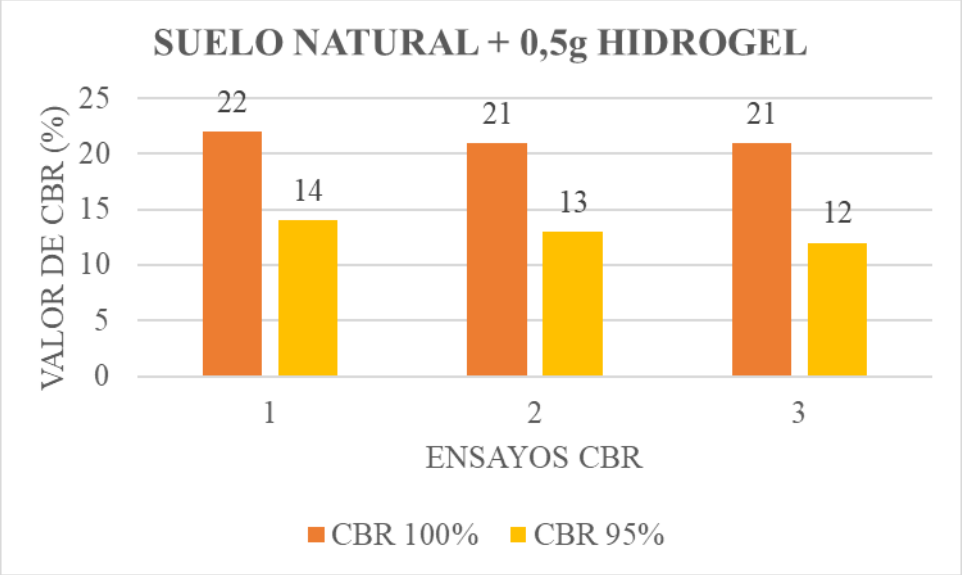
En este punto de extracción N°1, se puede observar que el C.B.R. mejora con el aumento de una pequeña proporción de hidrogel hidratado, lo que resultó en un 6% de mejora respecto al suelo natural.

Tabla 4.10. CBR suelo natural + 0,5g hidrogel punto de extracción N°2

Muestras Punto de extracción N°2	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 0,5 g Hidrogel Hidratado	**19**	22	14
	20	21	13
	21	21	12

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.8. CBR del suelo natural + 0,5g hidrogel, punto de extracción n°2



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 21% y un valor de C.B.R. al 95% de 13%. Este resultado de 21% indica que la subrasante clasifica como muy buena.

En este punto de extracción N°2, se puede observar que el C.B.R. mejora con el aumento de la proporción de 0,5 gramos de hidrogel hidratado, lo que resultó en una mejora del 1% respecto al suelo natural.

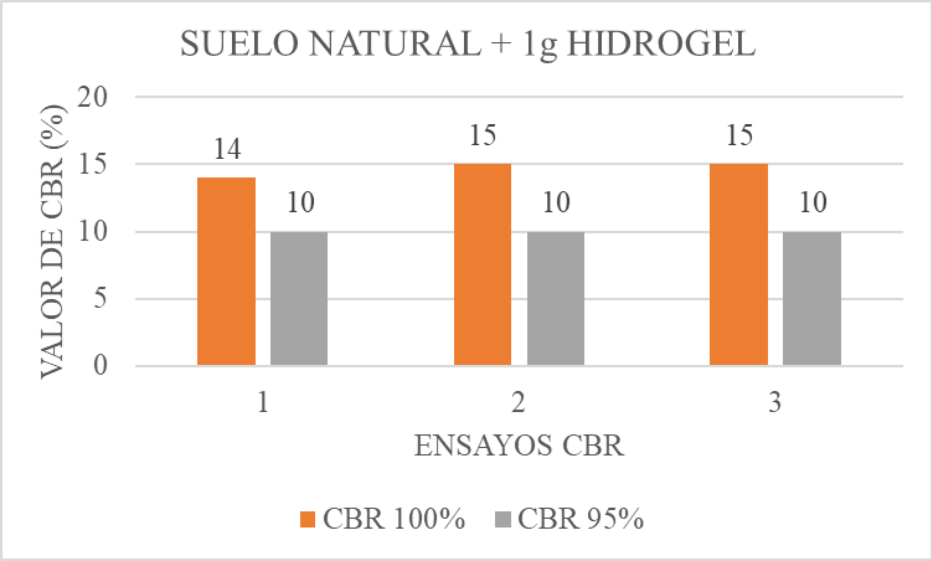
4.3.3 Relación del CBR con el suelo Natural + 1g Hidrogel Hidratado

Tabla 4.11. CBR suelo natural + 1g hidrogel, punto de extracción N°1

Muestras Punto de extracción N°1	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 1 g Hidrogel Hidratado	7	14	10
	8	15	10
	9	15	10

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.9. CBR del suelo natural + 1g hidrogel, punto de extracción N°1



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 15% y un valor de C.B.R. al 95% de 10%. Este resultado de 15% indica que la subrasante clasifica como regular a buena.

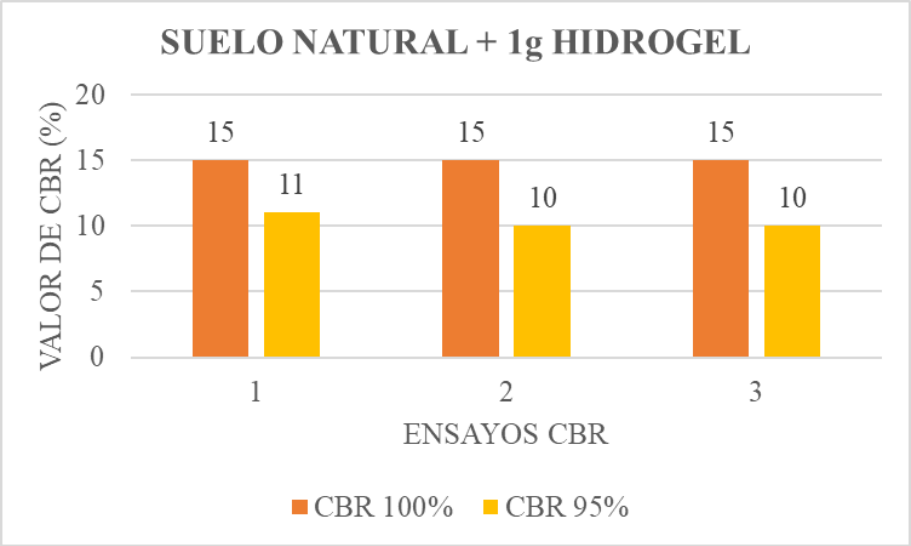
En este punto de extracción N°1, se puede observar que el C.B.R. mejora con el incremento de 1 gramo de hidrogel hidratado, lo que resultó en una mejora del 8% respecto al suelo natural.

Tabla 4.12. CBR suelo natural + 1g hidrogel, punto de extracción N°2

Muestras Punto de extracción N°2	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 1 g Hidrogel Hidratado	22	15	11
	23	15	10
	24	15	10

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.10. CBR del suelo natural + 1g hidrogel, punto de extracción N°2



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 15% y un valor de C.B.R. al 95% de 10%. Este resultado de 15% indica que la subrasante clasifica como regular a buena.

En este punto de extracción N°2, se puede observar que el C.B.R. se redujo al aumentar la proporción de 1 gramo de hidrogel hidratado, lo que resultó en una disminución del 5% respecto al suelo natural.

Este desequilibrio en los valores se debe a que el hidrogel no se dejó hidratar adecuadamente durante al menos 30 minutos, ya que se utilizó el hidrogel dentro de los primeros 10 minutos. El ensayo se realizó para evaluar el comportamiento del hidrogel en el C.B.R. sin considerar el tiempo necesario de hidratación.

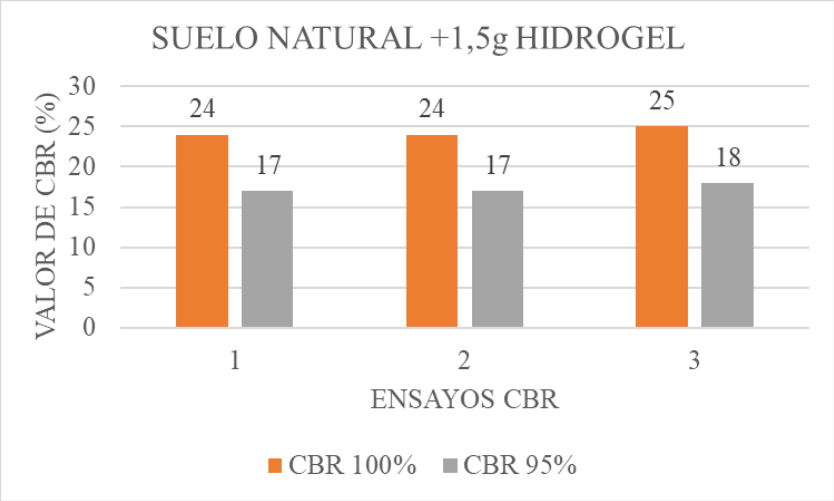
4.3.4 Relación del CBR con el suelo Natural + 1,5g Hidrogel hidratado

Tabla 4.13. CBR suelo natural + 1,5g hidrogel, punto de extracción N°1

Muestras Punto de extracción N°1	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 1,5 g Hidrogel Hidratado	10	24	17
	11	24	17
	12	25	18

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.11. CBR del suelo natural + 1,5g hidrogel, punto de extracción n°1



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 24% y un valor de C.B.R. al 95% de 17%. Este resultado de 24% indica que la subrasante clasifica como muy buena.

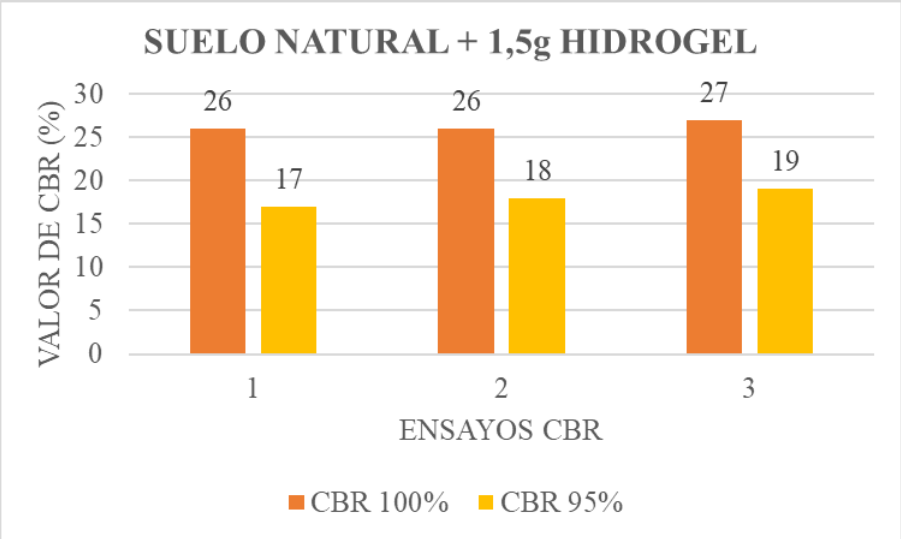
En este punto de extracción N°1, se puede observar que el C.B.R. mejora con el incremento de 1,5 gramos de hidrogel hidratado, lo que resultó en una mejora del 17% respecto al suelo natural.

Tabla 4.14. CBR suelo natural + 1,5g hidrogel, punto de extracción N°2

Muestras Punto de extracción N°2	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + 1,5 g Hidrogel Hidratado	25	26	17
	26	26	18
	27	27	19

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.12. CBR del suelo natural + 1,5g hidrogel, punto de extracción n°2



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 26% y un valor de C.B.R. al 95% de 18%. Este resultado de 26% indica que la subrasante clasifica como muy buena.

En este punto de extracción N°2, se puede observar que el C.B.R. incrementa con el aumento de la proporción de 1,5 gramos de hidrogel hidratado, lo que resultó en un aumento del 6% respecto al suelo natural.

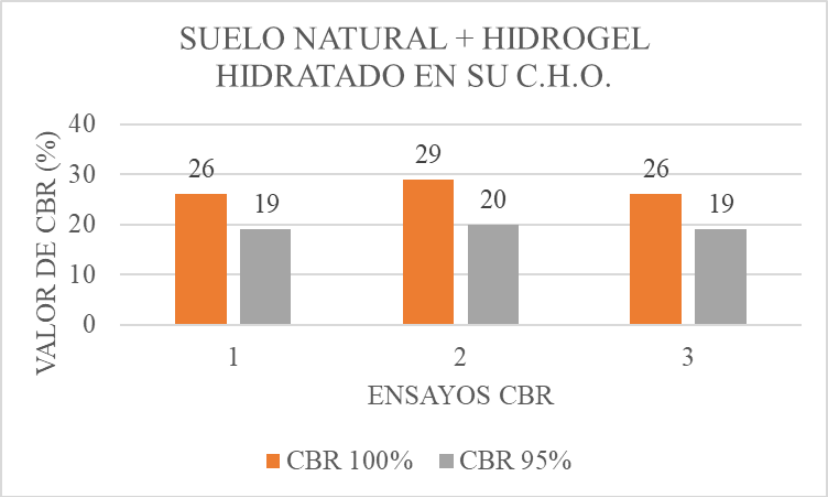
4.3.5 Relación del CBR con el suelo natural + hidrogel hidratado en su CHO.

Tabla 4.15. CBR suelo natural + hidrogel hidratado en su CHO., punto N°1

Muestras Punto de extracción N°1	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + Hidrogel Hidratado en su C.H.O.	13	26	19
	14	29	20
	15	26	19

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.13. CBR del suelo natural + hidrogel hidratado en su CHO, punto N°1



Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 26% y un valor de C.B.R. al 95% de 19%. Este resultado de 26% indica que la subrasante clasifica como muy buena.

En este punto de extracción N°1, se puede observar que el C.B.R. mejoró con el incremento de hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima, lo que resultó en una mejora del 19% respecto al suelo natural.

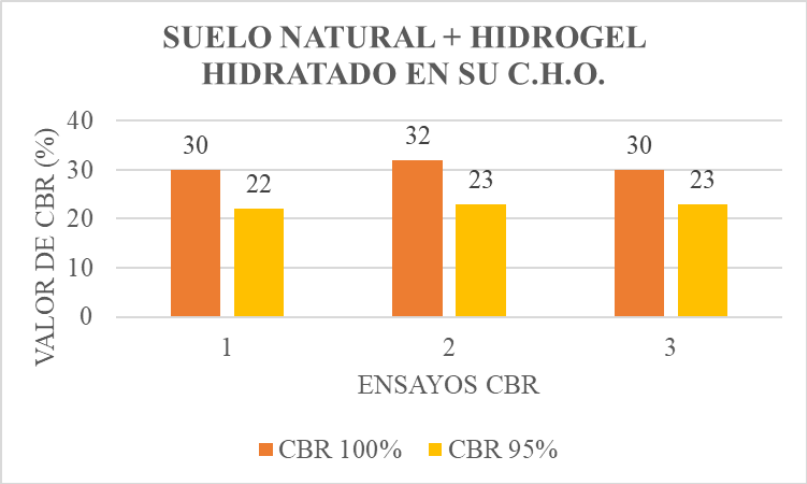
Este es un incremento favorable para la subrasante. A medida que se incrementa la cantidad de hidrogel, el C.B.R. mejora. El hidrogel presenta un mejor comportamiento cuando se hidrata con el tiempo necesario.

Tabla 4.16. CBR suelo natural + hidrogel hidratado en su cho, punto N°2

Muestras Punto de extracción N°2	ENSAYO	CBR (%) 0,1" al 100% D. Max.	CBR (%) 0,1" al 95% D. Max.
Suelo + Hidrogel Hidratado en su CHO	28	30	22
	29	32	23
	30	30	23

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4.14. CBR del suelo natural + hidrogel hidratado en su CHO, punto N°2



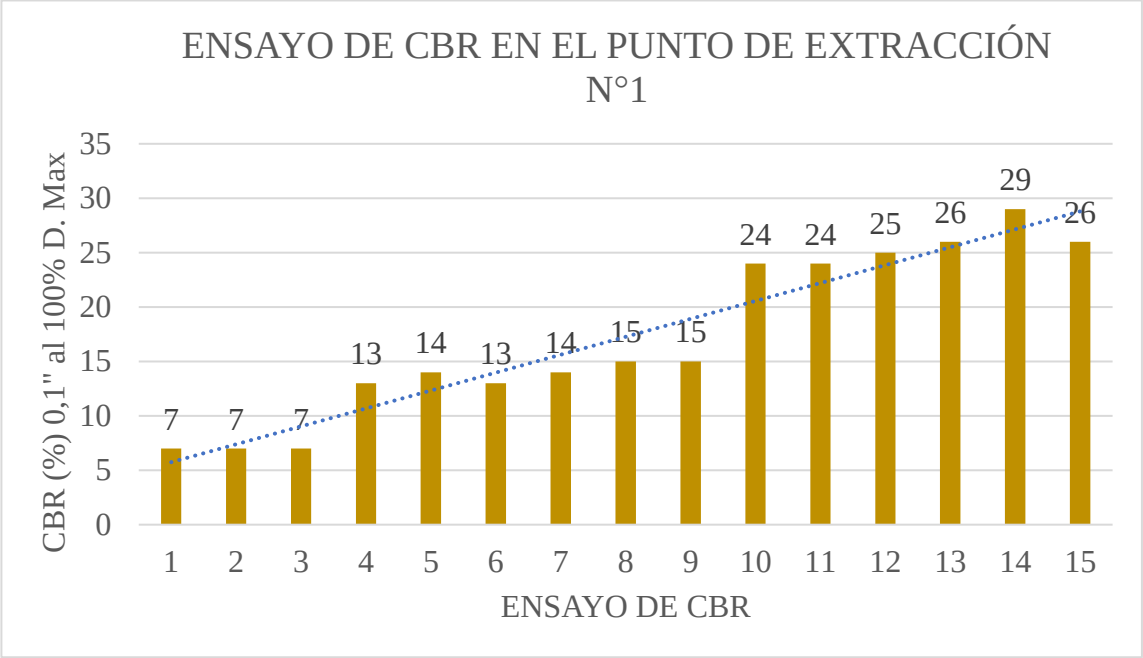
Fuente: Elaboración Propia

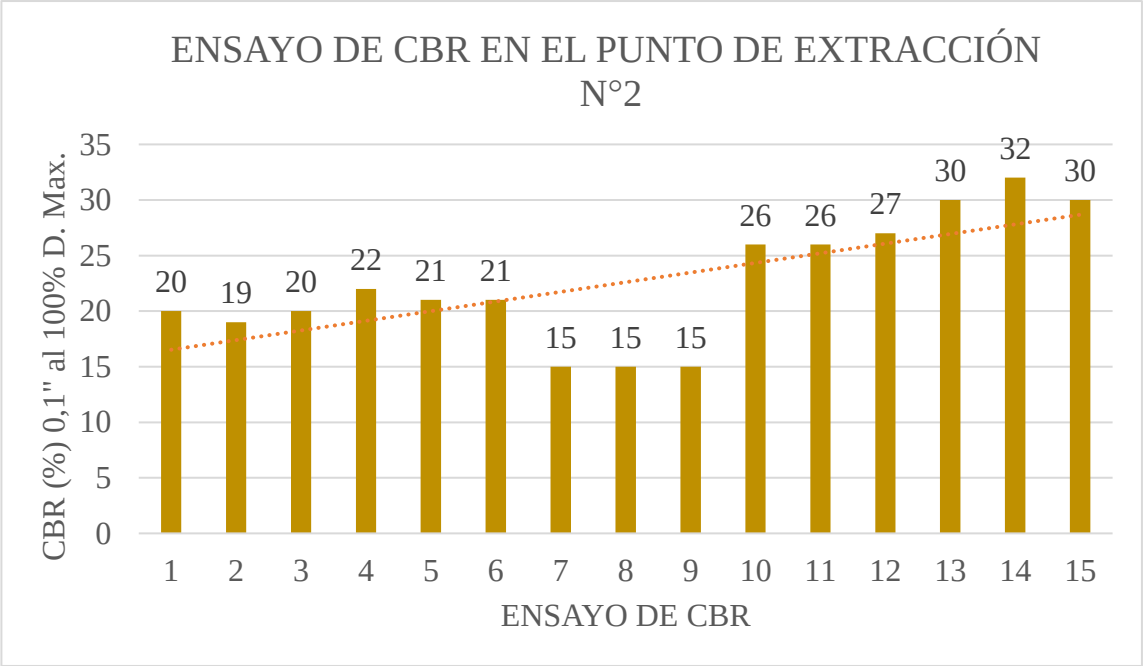
Como resultado del ensayo en laboratorio, se obtuvo un valor de C.B.R. al 100% de 30% y un valor de C.B.R. al 95% de 23%. Este resultado de 30% indica que la subrasante clasifica como muy buena y llega a ser una sub-base buena.

En este punto de extracción N°2, se puede observar que el C.B.R. incrementó su valor con el aumento del hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima, obteniendo un 10% más respecto al suelo natural.

Para este punto de extracción, se obtuvieron mejores valores de C.B.R., comenzando con la clasificación que correspondía, y con la implementación del hidrogel, estos valores mejoraron sucesivamente. Al realizar el ensayo con el hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima, se alcanzaron los valores que se buscaban en esta investigación.

4.4 Comparación de gráficas de resultados de CBR al 100%





4.5 Análisis del comportamiento de los CBR en el punto de extracción N° 1.

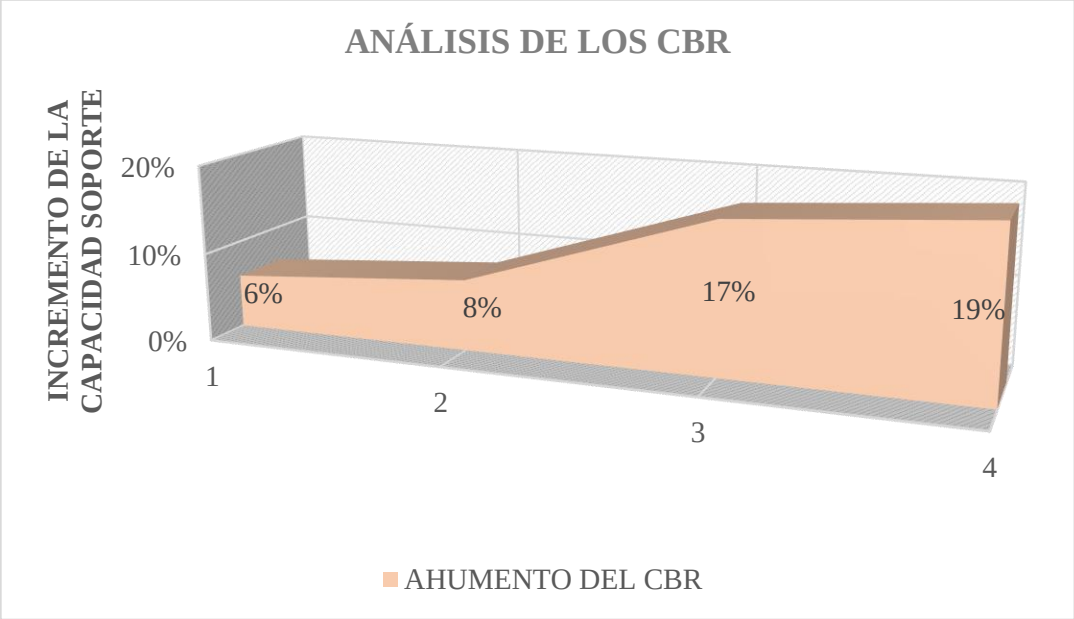
1 El incremento de la capacidad soporte, al añadir 0,5 gramos de hidrogel hidratado al suelo natural, aumenta la capacidad de soporte en un 6%.

2 El incremento de la capacidad de soporte, al añadir 1 gramo de hidrogel hidratado al suelo natural, aumenta la capacidad soporte en un 8%.

3 El incremento de la capacidad de soporte, al añadir 1,5 gramos de hidrogel hidratado al suelo natural, aumenta la capacidad soporte en un 17%.

4 El incremento de la capacidad de soporte, al añadir hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima al suelo natural, aumenta la capacidad de soporte en un 19%.

Gráfica 4.15. Análisis de los C.B.R. en el punto de extracción N°1



Fuente: Elaboración Propia

4.6 Análisis del comportamiento de los CBR en el punto de extracción N° 2.

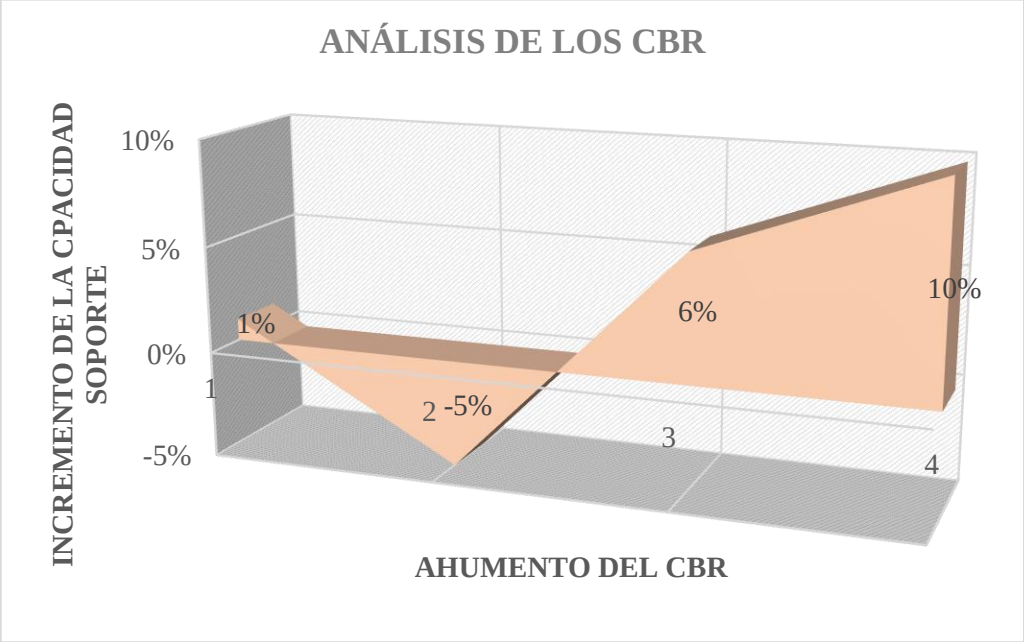
1 El incremento de la capacidad de soporte, al añadir 0,5 gramos de hidrogel hidratado al suelo natural, aumenta la capacidad de soporte en un 1%.

2 La disminución de la capacidad de soporte, al añadir 1 gramo de hidrogel hidratado al suelo natural, reduce la capacidad de soporte en un 5%.

3 El incremento de la capacidad de soporte, al añadir 1,5 gramos de hidrogel hidratado al suelo natural, aumenta la capacidad de soporte en un 6%.

4 El incremento de la capacidad soporte, al añadir hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima al suelo natural, aumenta la capacidad de soporte en un 10%.

Gráfica 4.16. Análisis de los C.B.R. en el punto de extracción N°2



Fuente: Elaboración Propia

4.7 Tratamiento estadístico descriptivo

Cálculos previos	
N° datos	30
Límite inferior	7
Límite superior	32
Rango R	25
N° clases k= 1+3,3 log(n)	5,9
Tamaño de clase W= R/K	4,3

Tabla 4.17. Intervalos de clase

N° de clases	Intervalos de clases		Clases	Frecuencia	F Acumulado	% Frecuencia	%F Acumulado
	L inf.	L. sup					
1	7,0	11,3	9,1	12	12	40,00	40,00
2	11,3	15,5	13,4	5	17	16,67	56,67
3	15,5	19,8	17,6	4	21	13,33	70,00
4	19,8	24,0	21,9	6	27	20,00	90,00
5	24,0	28,3	26,2	3	30	10,00	100,00

Fuente: Elaboración Propia

4.7.1 Medidas de tendencia central

Media

$$\overline{X} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n}$$

$$U = \frac{79}{6} = 13{,}167\ (Suelo\ natural)$$

$$\overline{X} = \frac{518}{24} = 21{,}583\ (Suelo + Hidrogel\ Hidratado)$$

Cálculo de la desviación estandar de la muestra

$$Sx = \sqrt{\frac{(\overline{X} - \mu)^2}{n - 1}}$$

$$Sx = \sqrt{\frac{(21{,}583 - 13{,}167)^2}{30 - 1}}$$

$$Sx = 1{,}56$$

4.8 Tratamiento estadístico inferencial

Tabla 4.18. Media de datos – media de la media

	Suelo natural	**Suelo + Hidrogel Hidratado**			
	x1	**0,5 g**	**1g**	**1,5g**	**CHO**
Media	13,17	17,33	14,83	25,33	28,83
M. Media	13,17	21,58			

Fuente: Elaboración Propia

Hipótesis nula (HO)

La media de la capacidad soporte del suelo + Hidrogel Hidratado es menor o igual a la media de la capacidad soporte del suelo natural.

$$Ho: \overline{X} <= 13{,}17$$

Hipótesis alternativa (HA)

La media de la capacidad soporte del suelo + Hidrogel Hidratado es mayor a la media de la capacidad soporte del suelo natural.

$$Ho: \overline{X} > 13{,}17$$

Grados de libertad (DF)

$$df = n - 1 = 30 - 1$$

$$df = 29$$

t crítico

$$t(1-\alpha)(n-1)$$

$$t = (1-0{,}05)(30-1)$$

$$t = 27{,}55$$

Aplicando la distribución de probabilidad

Calculando t

$$t = \frac{\overline{X} - \mu}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

$$\overline{X} = Media$$

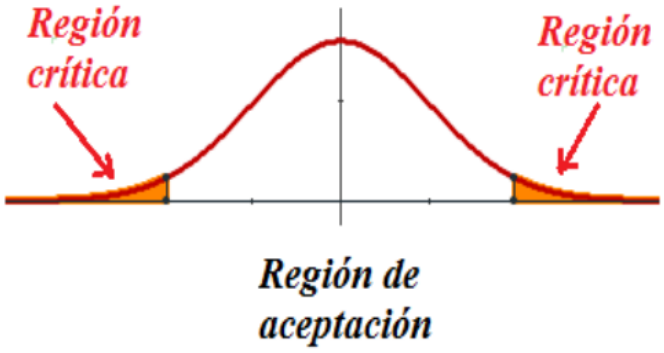
$$\mu = Valor\ a\ analizar$$

$$Sx = Desviación\ estándar$$

$$n = Tamaño\ de\ la\ muestra$$

$$t = \frac{21{,}58 - 13{,}17}{\frac{1{,}56}{\sqrt{30}}}$$

$$t = 29{,}53$$



Se observa que el valor de la capacidad de soporte promedio del suelo natural con hidrogel hidratado es mayor que el valor de la capacidad de soporte del suelo natural. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que existe una gran diferencia en la capacidad de soporte del suelo debido a la influencia del hidrogel hidratado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En base a las características físicas de los suelos de los dos puntos de extracción, mediante los ensayos realizados en laboratorio de granulometría, límites de consistencia y clasificación de los suelos por el método AASHTO, se evaluaron las propiedades físicas de los suelos y se corroboró que se trataba de un suelo arenoso fino, denominándose A-2-4. Por lo tanto, al ser este tipo de suelo, se procedió favorablemente a mejorarlo con la implementación de distintas cantidades de Hidrogel Hidratado.

- El incremento de la capacidad de soporte es progresivo; a medida que se incorpora más cantidad de hidrogel en los ensayos, las propiedades del suelo mejoran. En el punto de extracción N°1, se alcanzó una capacidad de soporte de 13% con 0,5 gramos de Hidrogel Hidratado, 15% con 1 gramo de Hidrogel Hidratado, 24% con 1,5 gramos de Hidrogel Hidratado, y 26% con Hidrogel Hidratado en su contenido de humedad óptima. En el punto de extracción N°2, se alcanzó una capacidad de soporte de 21% con 0,5 gramos de Hidrogel Hidratado, 15% con 1 gramo de Hidrogel Hidratado, 26% con 1,5 gramos de Hidrogel Hidratado, y 30% con Hidrogel Hidratado en su contenido de humedad óptima.

- En función del mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo con la influencia del hidrogel, se pudo evidenciar que la dosificación ideal para el trabajo ejecutado es el hidrogel hidratado en su contenido de humedad óptima. Esto significa que se debe integrar el hidrogel seco al contenido de agua requerido y dejar actuar durante un período mínimo de 30 minutos para que el hidrogel se hidrate completamente. La dosificación del hidrogel es de 1 gramo por cada 400 ml de agua.

- La ventaja de aumentar la capacidad soporte del suelo natural con la influencia del hidrogel es que se proporciona estabilidad volumétrica, lo que reduce la permeabilidad del agua.

- Una desventaja es que se debe esperar como mínimo 30 minutos para que el hidrogel seco se pueda hidratar completamente con el agua.

5.2 Recomendaciones

- Cuando se trabaje con este polímero, se debe considerar que, al ser sometido al agua, empieza a hincharse y cambia su textura, volviéndose un poco más pegajoso.
- Una vez abierta la bolsa de hidrogel, se debe mantener en un ambiente fresco y seco, ya que, al tener contacto con el agua, sufre alteraciones inmediatas.
- Este tipo de influencia del hidrogel sobre las propiedades de los suelos es factible cuando se requiera estabilizar con cemento, lo que resultará en un ahorro de agua.
- Se recomienda utilizar el contenido de humedad óptima para obtener una capacidad de soporte ideal en la ejecución de proyectos.