

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. INTRODUCCIÓN

Los suelos se pueden estabilizar de dos formas, una de ellas de forma mecánica, mezclando dos o más suelos y gravas de características complementarias, la otra forma es empleando el uso de aditivos, algunos de los más conocidos son la cal, cemento, polímeros, encimas que actúan de forma física y/o químicos. Y además el mercado existe otro producto con mucho auge en otros países como ser el Terrasil, tratamiento revolucionario ya que se trata de una estabilización de suelos con nanotecnología, esta tecnología actúa de forma química y permanente sobre las propiedades del material granular.

Uno de los complementos que es objeto de estudio en los últimos años, es la aplicación del material del producto Terrasil. El aditivo Terrasil es un material amigable con el medio ambiente que después de una mezcla con el suelo a tratar proporcionará un 60% y 90% de compactación. La aplicación de este químico tendrá la capacidad de brindar un suelo capaz de repeler el agua evacuando ésta en forma de evaporización.

Según investigaciones, para que el Terrasil tenga una buena compactación con el suelo a tratar se deberá realizar una escarificación, hidratación y finalmente compactación, también es aconsejable realizar un breve regado al final de que se haya compactado para así tener un suelo óptimo para el tránsito vehicular.

El tratamiento tipo estabilización, calcular la disolución apropiada de Terrasil en el agua de compactación y realizar una estabilización por vía húmeda, mezclando íntimamente la disolución de agua y Terrasil con el suelo, para luego compactar y sellar.

Terrasil, reacciona químicamente con todo tipo de suelos y su principal efecto consiste en la impermeabilización de las partículas del suelo frente a la acción del agua. Terrasil capaz de repeler el agua, y eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos.

Así, se obtiene una mejora de cualquier tipo de terreno, al conseguir que el suelo se comporte en todo momento como en condiciones “secas”. De esta manera, se establece un sistema de estabilización eficaz del suelo tratado.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El desarrollo de nuevos materiales de construcción de carreteras ha empezado a tener un auge en los últimos años en varios países del mundo. Esto ha llevado a buscar nuevas fuentes que pueden llegar a reemplazar o formar parte de ciertos materiales.

En la construcción de carreteras es común encontrarse con suelos que no cumplen las características por diferentes razones se decide estabilizarlos para mejorar sus propiedades de requerimiento, para posteriormente sobre este suelo construir un paquete estructural para un pavimento para la circulación de los vehículos.

La estabilización de suelos con aditivo Terrasil nos permite transformar un suelo inestable en suelos estables y de forma permanente sin que esto provoque pérdidas de porosidad repeler el agua, aumenta el CBR, elimina la erosión del agua, mejora la adherencia de polímeros elimina la expansividad de arcillas, mayor duración y mejores propiedades que nos permite una reducción considerable de los espesores de las capas y por tanto reducción de costos.

El estudio del análisis comparativo de la densidad y humedad del subrasante natural y la subrasante utilizando producto Terrasil, se lo realizara con la finalidad de proyectar para el futuro el uso de una nueva tecnología que nos permita la disminución de costos, aumento de prestaciones y factibilidad de aplicación, sucede que al estabilizar con el producto Terrasil se mejoran los datos de densidad y compactación en obra y reducir el consumo de agua necesaria para la compactación del material, logrando compactaciones dentro de la norma con menos pasadas logrando reducir el índice de plasticidad de los suelos y aumentando los valores de CBR reduciendo la expansividad. Para lograr vida útil prolongada y mantenimiento menos recurrente del camino.

## **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.3.1. Situación problemática**

Al momento de realizar la construcción de una carretera o de un camino, muchas veces sucede que no se encuentran suelos lo suficientemente aptos para la conformación de la subrasantes , que presentan características de inestabilidad, debido a esto es que estos suelos necesitan ser mejorados o estabilizados.

A lo largo del tiempo se fueron realizando varios estudios, experimentos, pruebas de laboratorio y llevando hasta la puesta en obra la mejor manera de estabilizar suelos.

La problemática en Tarija es que los suelos en su mayoría son suelos no aptos, y a la hora de construir una carretera se encuentran con este tipo de suelos los cuales afectan a las sub rasantes cuando llueve ya que estos suelos se alteran y cambian su volumen, haciendo que las capas de rodadura no cumplan su vida útil.

Por parte otra en el departamento se mejora el suelo estabilizando suelos finos con suelos granulares, pero muchas veces no da resultados favorables esto se debe a que los suelos no están mezclados homogéneamente, no tienen una buena compactación, otra solución sería cambiar todo el suelo pero esto implica un costo elevado.

Para evitar este tipo de problemas en las carreteras que se van a construir se busca nuevas alternativas para mejorar la estabilización de suelos, por ello el interés de este trabajo es de plantear la posibilidad de investigar de reducir la humedad óptima y obteniendo mayor densidad de la subrasante mejorando con el producto Terrasil y poder realizar un analisis comparativo de la densidad y humedad de la subrasante natural y subrasante con producto Terrasil un tratamiento revolucionario que hace que los suelos no tratados mejoren mucho sus propiedades mecánicas.

### **1.3.2. Problema**

Una subrasante tiene por lo general propiedades y características no suficientes, al mezclar el producto Terrasil en la subrasante natural puede optimizar y mejorar sus características y trabajabilidad?

## **1.4. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1. Objetivo general**

Realizar la comparación entre material de subrasante natural e incluyendo Terrasil, para evaluar su comportamiento relacionado con la densidad y humedad.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Fundamentar la teoría de estabilización de la subrasante con el producto Terrasil.
- Identificar la zona de aplicación del proyecto que tenga una subrasante natural con características mínimas para utilizar el producto Terrasil.
- Caracterizar el suelo natural y suelo utilizando producto Terrasil que son la base del estudio.
- Realizar la comparación de la densidad máxima y humedad óptima del suelo natural y diferentes porcentajes con Terrasil.
- Establecer conclusiones y recomendaciones sobre la investigación realizada.

## **1.5. HIPÓTESIS**

Si utilizamos el producto Terrasil en la subrasante natural entonces mejorará la densidad y humedad.

## **1.6. DEFINICIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES Y DEPENDIENTE**

### **1.6.1. Variable independiente**

Utilización de Terrasil para mejorar la condición en densidad y humedad.

### **1.6.2. Variable dependiente**

Comportamiento en densidad y humedad de material de subrasante.

### 1.6.3. Conceptualización y operacionalización de variables

Tabla 1.1. Operacionalización de variables

Variable Nominal	Conceptualización	Operacionalización		
		Dimensión	Indicador	Valor Acción
<b>VIndependiente</b>  Utilización de Terrasil para mejorar la condición en densidad y humedad.	Se refiere a la utilización de Terrasil al material subrasante para poder mejorar las condiciones de densidad y humedad.	Subrasante natural	Caracterización	Granulometría
				Límite líquido
				Límite plástico
		Subrasante natural + Terrasil	Caracterización + Terrasil 0.2 kg/m <sup>3</sup> 0.5 kg/m <sup>3</sup> 0.75 kg/m <sup>3</sup> 1 kg/m <sup>3</sup> 2.0 kg/m <sup>3</sup> 2.5 kg/m <sup>3</sup>	Granulometría
				Límite líquido
				Límite plástico
<b>VDependiente</b>  Comportamiento en compactación y humedad del material subrasante.	Se refiere al Comportamiento que tendrá el material subrasante en densidad y humedad	Subrasante natural	Compactación	Densidad máxima
				Humedad óptima
				Resistencia
		Subrasante natural + Terrasil 0.2 kg/m <sup>3</sup> 0.5 kg/m <sup>3</sup> 0.75kg/m <sup>3</sup> 1 kg/m <sup>3</sup> 2.0 kg/m <sup>3</sup> 2.5 kg/m <sup>3</sup>	Compactación	Densidad máxima
				Humedad óptima
				Resistencia

Fuente: Elaboración propia

## **1.7. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **1.7.1. Unidades de estudio y decisión muestral**

#### **1.7.1.1. Unidades de estudio**

Estabilización de la subrasante natural.

#### **1.7.1.2. Población**

Estabilidad de la subrasante natural incorporando producto Terrasil.

#### **1.7.1.3. Muestra**

Comportamiento de la densidad y humedad con producto Terrasil a la subrasante.

#### **1.7.1.4. Muestreo**

Se obtendrá muestra del aditivo Terrasil de la distribuidora BREM SRL AMBIENTAL SOLUTIONS ubicada en la ciudad de Santa Cruz calle Acacia N° 32 Cond. Sevilla Pinatar.

Aditivo Terrasil para suelos de última generación, su dosificación mezclada será 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 Kg/m<sup>3</sup> dosificaciones recomendadas, la solución definitiva se obtendrá de los ensayos de laboratorio realizados a cada tipo de material.

Se obtendrá material de subrasante natural.

### **1.7.2. Métodos y técnicas empleadas**

#### **1.7.2.1. Diseño experimentales**

La realización de la investigación se planteará como experimental ya que se realizarán ensayos de caracterización en el laboratorio del comportamiento de la subrasante natural y subrasante con producto Terrasil.

#### **1.7.2.2. Técnica**

Con la subrasante natural y subrasante con producto Terrasil se utilizara la técnica experimental con ensayos de laboratorio que caracterizaran dichos materiales, se procede a diseñar la mezcla del suelo con Terrasil haciendo variar el porcentaje, obteniendo así una subrasante mejorada con Terrasil modificando la densidad y humedad óptima.

Se obtendrá el material de la subrasante de banco de Obrajes, los tipos de suelos serán los siguientes:

Suelo A-4 (Banco Obrajes) se va utilizar este tipo de suelo que esté entre los rangos de índice de plasticidad de 5 a 10 máx.

Suelo A-6 (Banco Obrajes) se va utilizar este tipo de suelo que esté entre los rangos de índice de plasticidad de 11 min.

**Se realizará ensayos de caracterización a todos los materiales que son los siguientes:**

Tabla 1.2. Caracterización de los materiales

<b>Caracterización</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Normativa</b>
<b>Física</b>	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
<b>Mecánica</b>	Ensayo de compactación método (Proctor modificado)	ASTM D422 AASHTO T180
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia

### **1.7.2.3. Descripción de equipos e instrumentos**

#### **A. Para la caracterización de la subrasante**

##### **Para la subrasante natural**

Extracción y preparación de muestras

Picota.- Para cavar las muestras del lugar donde se analizara.

Pala.- Para recolectar los suelos.

Bolsas.- Serán usadas para traer las muestras al laboratorio y estas no pierdan humedad.

**Horno eléctrico.-** El horno eléctrico es utilizado para el secado de los agregados de aportación, y debe contar con una temperatura constante de 100 a 110 °C.

**Balanza.-** La balanza es usada para obtener los distintos pesos que se requiera, con una sensibilidad de 0.1 gr.

**Juego de tamices.-** El juego de tamices debe seguir la norma ASTM E-11, lo cual contiene los tamices 3", 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", N° 4, N° 10, N° 40, N° 200, tapa y fondo.

**Casa grande.-** Copa de Casagrande compuesto de un casquete esférico metal utilizado para determinar el límite líquido.

### **B. Para Proctor y CBR**

**Molde para Proctor.-** El molde mantiene su altura e incrementa su diámetro a 152,4 mm con el martillo de pesa 44,5 N equivalente a 10 lb o 4,54 kg compactando a cinco capas con un número de golpes de 56.

**Molde para CBR.-** El molde para CBR tiene un diámetro interno 6" (152,4 mm) y es de 7" (177,8 mm) de altura. Se suministra completo con una placa de base perforada y un collarín de extensión.

### **C. Para ensayo de resistencia (capacidad portante)**

**Prensa para CBR.-** Comprende de un anillo de carga 10000 lb con dial y puente metálico, viga en aluminio en soporte, dos pesas abiertas de 10 lb set de pistones de penetración, placa circular.

### **1.7.3. Procedimiento de aplicación**

Se realizara un reconocimiento preliminar para constatar las condiciones generales del suelo. Se plantea disponer de muestras de suelos de subrasante para ensayar en el laboratorio tanto como el suelo normal y después con el suelo mejorado con aditivo Terrasil.

Se obtendrán muestras del material de cada calicata para determinar los contenidos de humedad.

Este plan de trabajo consiste en trabajar con diferentes disoluciones apropiada del aditivo Terrasil, para que en base al análisis de las propiedades físicas y mecánicas más relevantes de cada una de las combinaciones se pueda estimar el contenido adecuado de Terrasil a fin de obtener una buena estabilización del suelo tratado.

Por otro lado también cuando se proceda a someter los especímenes de suelos a pruebas de compactación, C.B.R. y tomando como referencia los resultados de los distintos ensayos se optará como óptimo al primer valor que proporcione el C.B.R.

Se adoptará un criterio de diseño semejante al método de dosificación de suelo-Terrasil, para encontrar la mezcla óptima.

Las mezclas con aditivo Terrasil se darán entre un 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 kg/m<sup>3</sup>.

Suelo natural

Suelo natural + 0.2 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

Suelo natural + 0.5 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

Suelo natural + 0.75 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

Suelo natural + 1.0 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

Suelo natural + 2.0 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

Suelo natural + 2.5 (kg/m<sup>3</sup>) Terrasil

#### **1.7.4. Procedimiento para el análisis y la interpretación de la información**

##### **1.7.4.1. Método del error experimental promedio**

Para este estudio se utilizará la estadística descriptiva que es una rama de las matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos, con el fin de describir apropiadamente las diversas características de ese conjunto.

##### **Media aritmética**

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

Dónde:

X= Datos de la serie

n= Número de datos de la serie

## **Moda**

La moda de un conjunto de datos numéricos es el valor que más se repite es decir, el que tiene el mayor número de frecuencias absolutas. La moda puede ser no única e inclusive no existir.

La moda es una medida de tendencia central muy importante, porque permite planificar, organizar y producir para satisfacer las necesidades de la mayoría.

## **Mediana**

La mediana es el punto central de una serie de datos ordenados de forma ascendente o descendente.

## **Desviación estándar**

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n - 1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}$$

## **Varianza**

La varianza mide la mayor o menor dispersión de los valores de la variable respecto a la media aritmética. Cuanto mayor sea la varianza mayor dispersión existirá y por tanto, menor representatividad tendrá la media aritmética. La varianza se expresa en las mismas unidades que la variable analizada, pero elevadas al cuadrado.

La varianza de un conjunto de datos se define como el cuadrado de la desviación estándar y está dada por:

$$v = s^2$$

## **Coefficiente de variación**

Cuando se quiere comparar el grado de dispersión de dos distribuciones que no vienen dadas en las mismas unidades o que las medias no son iguales se utiliza el coeficiente de variación de Pearson que se define como el cociente entre la desviación estándar y el valor absoluto de la media aritmética:

$$\% CV = \frac{S^2}{\bar{X}} * 100$$

Este coeficiente representa el porcentaje que la desviación estándar contiene a la media aritmética y por lo tanto cuanto mayor es CV mayor es la dispersión y menor la representatividad de la media.

## **1.8. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

En resumen el alcance que tendrá este trabajo es el análisis comparativo de la densidad y humedad de la subrasante natural y la subrasante utilizando producto Terrasil.

**En el primer capítulo.-** Se describe de manera general de que trata la investigación para el contenido de Terrasil que se aplicará en la subrasante natural donde se dará a conocer, la situación problemática, los objetivos, la justificación y la hipótesis del presente proyecto.

**El segundo capítulo.-** Comprende la parte teórica, donde se detalla el estado de conocimiento es decir, toda la información necesaria y relevante al proyecto, como es todo lo referente a las estabilizaciones y el producto a utilizar, según normas AASTHO.

**El tercer capítulo.-** Describe los medios y criterios para obtener los datos de caracterización de la subrasante natural, que luego son procesados y analizados según normas.

También se aplica la dosificación adecuada con dos tipos de análisis, el primero con la mezcla subrasante natural sin Terrasil y el segundo con una mezcla de subrasante con Terrasil con 6 diferentes porcentajes de dosificación 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 kg/m<sup>3</sup>, para luego hacer un análisis final de datos, según curvas de correlación de la variable independiente porcentajes de dosificación de Terrasil en la subrasante, con la variable dependiente que es el comportamiento de la densidad y humedad. Para luego con estos resultados realizar una propuesta final del proyecto.

**El cuarto capítulo.-** Establece las conclusiones a partir de lo planteado en los objetivos, dándose a conocer los resultados finales de las comparaciones que se tendrá la subrasante con Terrasil del presente proyecto y las recomendaciones para la correcta aplicación y ejecución de este trabajo.

## **CAPÍTULO II**

### **ESTADO DE CONOCIMIENTO DE LA SUBRASANTE NATURAL Y SUBRASANTE CON TERRASIL**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

A nivel mundial, los productos químicos son los materiales más utilizados en la construcción de vías, adecuación de taludes y carreteras, y a menos que haya una revolución en los materiales para el mejoramiento de suelos, seguirá siéndolo; gran parte de la infraestructura de los países está elaborado con este producto, por lo que su conocimiento y tecnología son básicos para el ingeniero civil encargado de alguna etapa del proceso constructivo.

La tecnología ha ido desarrollándose con el paso del tiempo y con ésta el descubrimiento de nuevos métodos para diseñar pavimentos a un bajo costo que los tradicionales, pero no se lo aplica, ya que existe el factor suelo o rasante, el mismo que constituye la base para realizar un ahorro en la estructura del pavimento, ya que de éste depende los espesores de cada una de las capas del pavimento.

La solución con Terrasil consiste en el uso de un órganosilano iónico, capaz de repeler el agua, y eliminar el hinchamiento y la absorción de suelos. Así, se obtiene una mejora de cualquier tipo de terreno, al conseguir que el suelo se comporte en todo momento como en condiciones “secas”. De esta manera, se establece un sistema de estabilización eficaz del suelo tratado. El suelo se convierte en una superficie hidrófoba en los áridos, convierte éstos en sustancias apolares, y por tanto compatibles con compuestos de la misma naturaleza. En definitiva la unión con conglomerantes se ve favorecida al formarse un mayor número de enlaces de gran fortaleza. Así, en ausencia de Terrasil, las partículas de suelo se comportarían como la piel de una naranja, de manera que la cobertura (de betún, polímero...) se desprende fácilmente. Sin embargo, una vez tratado con Terrasil, el árido presenta una adhesión mucho mayor con la cobertura, libre de huecos, al formarse más enlaces de fortaleza mayor. Esta situación sería la que se produce en una manzana. En el caso de suelos sin tratamiento, las interacciones de las partículas de suelo-ligante son mucho más débiles, de manera que sólo existe el fenómeno de adhesión, existiendo un gran número de huecos.

En cambio, cuando se trata el suelo con Terrasil, las interacciones son mucho mayores, hay un efecto de “recubrimiento total” de la partícula, y no hay huecos.

El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor).

Elimina el índice de plasticidad de los suelos.

Mejora la adherencia con polímeros y betún, lo que permite y mejora la aplicación de capas de rodadura, riegos de imprimación.

## **2.2. SUELO**

El suelo es la capa superficial de la corteza terrestre en la que viven numerosos organismos y crece la vegetación. Es una estructura de vital importancia para el desarrollo de la vida, el suelo sirve de soporte a las plantas y le proporciona los elementos nutrientes necesarios para subdesarrollo. El suelo es una mezcla de minerales, materia orgánica, bacterias, agua y aire. Se genera por la acción de la temperatura, el agua, el viento, los animales y las plantas sobre las rocas. Con el pasar del tiempo y debido a fenómenos de meteorización, la roca va perdiendo progresivamente su resistencia mecánica y se transforma en suelo. El suelo está constituido por tres fases: Sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo, la fase líquida está conformada por agua, aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación, la fase gaseosa está constituida fundamentalmente por los gases atmosféricos y es muy variable en su constitución.

### **2.2.1. El contenido de agua en la masa del suelo (w%)**

El contenido de humedad es la relación que existe entre el peso de agua contenida en la muestra en estado natural y el peso de la muestra después de ser secada en el horno a una temperatura entre los 105°-110°C. Se expresa de forma de porcentaje, puede variar desde cero cuando está perfectamente seco hasta un máximo determinado que no necesariamente es el 100%. La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este, por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica. 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.

## **2.2.2. Suelos arcillosos características y propiedades**

### **2.2.2.1. Definición**

Se puede entender a los materiales arcillosos como aquéllos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento, frente a los restantes materiales existentes en las obras o en el terreno.

### **2.2.2.2. Arcillas**

Las arcillas están constituidas básicamente por silicatos de aluminio hidratados, presentando además, en algunas ocasiones, silicatos de magnesio, hierro u otros metales, también hidratados. Estos minerales tienen, casi siempre, una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas. Existen dos variedades de tales láminas: la silícica y la alumínica.

### **2.2.2.3. Características de las arcillas**

Material de estructura laminar

Sumamente higroscópico

Su masa se expande con el agua

Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica

Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600 °C

### **2.2.2.4. Clasificación de las arcillas**

Desde el punto de vista geológico, se pueden distinguir entre primarias las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación, y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

Fluviales.- Depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad

Lacustres.- Asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad

En deltas.- Son arenosas y de composición irregular

Glaciales.- Formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas

## **2.2.3. Plasticidad**

La plasticidad y el uso extenso que de ella hace el especialista en mecánica de suelos, constituyen una de las cuestiones más difíciles de comprender para el ingeniero ajeno a la especialidad. Y sin embargo, el concepto que se halla debajo de la utilización de las ideas de plasticidad es ampliamente familiar en nuestra vida cotidiana. Es común que en

la naturaleza existan magnitudes cuya medición directa sea difícil o costosa; en tal caso, el intentar una medición indirecta constituye una técnica común a muchos campos de la actividad científica. Se trata de buscar una magnitud, diferente de la que se desea medir, que sea fácilmente medible y cuya correlación con la magnitud problema sea conocida y confiable. Dentro de los límites del sentido que se da al término en la mecánica de suelos, plasticidad puede definirse como la propiedad de un material por la que es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

Según su contenido de agua decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg: límite líquido, estado semilíquido, estado plástico, estado semisólido y estado sólido.

#### **2.2.3.1. El índice de plasticidad (IP)**

Es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con algunos productos químicos.

#### **2.2.3.2. Límites de Atterberg**

Cuando un suelo arcilloso se mezcla con una cantidad excesiva de agua, éste puede fluir como un semilíquido. Si el suelo es secado gradualmente, se comportara como un material plástico, semisólido o sólido, dependiendo de su contenido de agua. Este, en por ciento, con el que el suelo cambia de un estado líquido a un estado plástico se define como límite líquido (LL). Igualmente, los contenidos de agua, en por ciento con el que el suelo cambia de un estado plástico a un semisólido y de un semisólido a un sólido se definen como el límite plástico (PL) y el límite de contracción (SL), respectivamente. Esos se denominan límites de Atterberg.

#### **2.2.3.3. Determinación del límite líquido**

El límite líquido es el contenido de humedad, expresado mediante el peso del suelo seco, que se encuentra entre el estado plástico y el estado líquido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el contenido de humedad necesario para que las dos

mitades de una pasta de suelo de 1 cm. de espesor fluyan y se unan en una longitud de 12 mm, aproximadamente, en el fondo de la muesca que separa las dos mitades, cuando la cápsula que la contiene golpea 25 veces desde una altura de 1 cm., a la velocidad de 2 golpes por segundo. Forma parte de los límites de consistencia que se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, al agregarse agua poco a poco va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y finalmente líquido.

Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de 3 mm, de espesor con el suelo, siguiendo estos procedimientos se definen tres límites:

Límite Líquido.- Cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse, para la determinación de éste se utiliza la cuchara de casa grande.

Límite plástico.- Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.

Límite de Retracción o Contracción.- Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder la humedad.

#### **2.2.3.4. Determinación del límite plástico**

Es el contenido de humedad, expresado en porcentaje del peso del suelo seco, existente en un suelo en el límite entre el estado plástico y el estado semi-sólido del mismo. Este límite se define arbitrariamente como el más bajo contenido de humedad con el cual el suelo, al ser moldeado en barritas cilíndricas de menor diámetro cada vez, comienza a agrietarse cuando las barritas alcanzan a tener 3 mm, de diámetro.

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

Al llegar a este diámetro se desarma el cilindro y vuela a amasar hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es

posible obtener un cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad). Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico.

Si el suelo presenta características de plasticidad bien definidas, se amasa el suelo común contenido de humedad que satisfaga las condiciones establecidas en el ensayo de límite plástico y se ejecuta este. Luego se agrega más agua a la pasta restante en la cápsula y se realiza el ensayo de límite líquido.

Si el suelo tiene poca plasticidad, se realiza primeramente el ensayo de límite líquido y de inmediato con la pasta restante se ejecuta el ensayo de límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces para disminuir los errores de interpolación o medición.

#### **2.2.4. Compactación de los suelos**

En general, la compactación es la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. Si se agrega una pequeña cantidad de agua a un suelo y luego éste se compacta, el suelo tendrá un cierto peso específico. Si el contenido de agua del mismo suelo es incrementado gradualmente y la energía de compactación es la misma, el peso específico del suelo se incrementará gradualmente. La razón es que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo y, bajo la compactación ésta ayuda a reacomodar las partículas sólidas a un estado más denso. El incremento en peso específico seco con el incremento del contenido de agua en un suelo alcanzara un valor límite más allá del cual cantidades adicionales de agua conducirán a una reducción del peso específico seco. El contenido de agua para el cual se obtiene el peso específico seco máximo se llama contenido de agua óptimo.

Las pruebas de laboratorio usadas para evaluar las densidades secas máximas y los contenidos de agua para varios suelos son:

Prueba de Proctor estándar (ASTM D698)

Prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557)

##### **2.2.4.1. Prueba Proctor estándar**

En la prueba Proctor, el suelo es compactado en un molde que tiene un volumen de  $943,3 \text{ cm}^3$ . El diámetro del molde es de 101,6 mm. Durante la prueba de laboratorio el

molde se une a una placa de base en el fondo y a una extensión en la parte superior.

El suelo se mezcla con cantidades variables de agua y luego se compacta en tres capas iguales por medio de un pisón que transmite 25 golpes a cada capa. El pisón pesa 24,4 N que equivale a 5,5 lb o (2,5 kg) y tiene una altura de caída de 304,8 mm. Para cada prueba, el peso específico húmedo de compactación  $\gamma$  se calcula como:

$$\gamma = \frac{W}{V_m}$$

Dónde:

W = Peso específico húmedo

$V_m$  = Volumen del molde

Para cada prueba, el contenido de agua del suelo compactado se determina en el laboratorio. Con un contenido de agua conocido, el peso específico seco  $\gamma_d$  se calcula con la siguiente ecuación:

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

Dónde:

W (%) = Porcentaje de contenido de agua

Los valores de  $\gamma_d$  determinados con la anterior ecuación se grafican contra los correspondientes contenidos de agua para obtener el peso específico seco máximo y el contenido de agua óptimo para el suelo.

#### **2.2.4.2. Prueba Proctor modificada**

Con el desarrollo de los rodillos compactadores de campo se notó un incremento de energía, la prueba de Proctor estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A ésta se la llama prueba Proctor modificada (Prueba D-1557 de la ASTM y prueba T-180 de la AASHTO). Para llevar a cabo la prueba de Proctor modificada se usa el mismo molde, con un volumen de 943,3 cm<sup>3</sup> como en el caso de la prueba de Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un

pisón que pesa 44,5 N equivalente a 10 lb o 4,54 kg. La caída del martillo por capa es de 457,2 mm. El número de golpes de martillo es de 25 como en la prueba de Proctor estándar.

Las pruebas de Proctor adoptadas por la ASTM y la AASTHO respecto al volumen del molde (943,3 cm<sup>3</sup>) y número de golpes (25 golpes/capa), son generalmente las adoptadas para los suelos de grano fino que pasan la malla N° 4, sin embargo para suelos de grano más grueso el molde mantiene su altura e incrementa su diámetro a 152,4 mm con el martillo de pesa 44,5 N equivalente a 10 lb o 4,54 kg compactando a cinco capas con un número de golpes de 56. Sin embargo, bajo cada designación de prueba, tres métodos sugeridos diferentes reflejan el tamaño del molde, el número de golpes por capa y el tamaño máximo de la partícula de un suelo usado para la prueba.

Tabla 2.1. Especificaciones para prueba de Proctor estándar

<b>Concepto</b>	<b>Método A</b>	<b>Método B</b>	<b>Método C</b>
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pizón	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)	5,5 lb (2,5 kg)
Altura de caída del pizón	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)	12 pulg (304,8 mm)
Número de golpes del pizón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas de compactación	3	3	3
Energía de compactación	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )	12400 pie.lb/pie <sup>3</sup> (600 N/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,75 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla 3/4 pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla 3/4 pulg (19,0 mm).

Fuente: “Principios de ingeniería de cimentaciones”, Braja. M Das. Quinta edición

Tabla 2.2. Especificaciones para prueba de Proctor modificada (ASTM D 1557-91)

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	4 pulg (101,6 mm)	4 pulg (101,6 mm)	6 pulg (152,4 mm)
Volumen del molde	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,0333 pie <sup>3</sup> (944 cm <sup>3</sup> )	0,075 pie <sup>3</sup> (2124 cm <sup>3</sup> )
Peso del pizón	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)	10 lb (4,54 kg)
Altura de caída del pizón	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)	18 pulg (457,2 mm)
Numero de golpes del pizón por capa de suelo	25	25	56
Numero de capas de compactación	5	5	3
Energía de compactación	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )	56000 pie.lb/pie <sup>3</sup> (270 N/m <sup>3</sup> )
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla No 4 (4,57 mm). Puede usarse el 20% o menos por peso de material que es retenido en la malla No. 4.	Porción que pasa la malla de 3/8 pulg (9,5 mm). Puede usarse si el suelo retenido sobre la malla No. 4 es más del 20% y 20% o menos por peso retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm).	Porción que pasa la malla 3/4 pulg (19,0 mm) Puede usarse si más de 20% es retenido en la malla de 3/8 pulg (9,5 mm) y menos de 30 % por peso es retenido en la malla 3/4 pulg (19,0 mm).

Fuente: “Principios de ingeniería de cimentaciones”, Braja. M. Das. Quinta edición

### 2.2.5. Método CBR

Fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter, del Departamento de Carreteras del Estado de California. Desde esa fecha, tanto en Europa como en América, el método C.B.R. (California Bearing Ratio= Relación de Soporte California) se ha generalizado y es, hoy en día, uno de los más empleados para el cálculo de pavimentos flexibles.

Se establece en él una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo, y su capacidad de soporte como base de la sustentación para pavimentos flexibles. Si bien este método es empírico, se base en un sinnúmero de trabajos de investigación terreno,

lo que permite considerarlo como uno de los mejores procedimientos prácticos sugeridos hasta hoy. Dado que el comportamiento de los suelos varía de acuerdo con su “grado de alteración”, con su granulometría y sus características físicas, el método a seguir para determinar el C.B.R. será diferente en cada caso. Así tendremos:

Determinación del C.B.R. de suelos perturbados y remoldeados

Gravas y arenas

Suelos cohesivos y expansivos

Determinación del C.B.R. de suelos inalterados

Determinación del C.B.R. in situ

### **2.3. SUBRASANTE**

Es el suelo de fundación (suelo natural libre de vegetación y compactado) en el que se apoya todo el paquete estructural. Este material puede ser tanto granular como afirmado, empedrados u otras carpetas granulares, seleccionados o cribados, producto de cortes y extracciones de canteras. Si el terreno de fundación es malo, debe desecharse el material que lo compone, sustituyéndolo por un suelo de mejor calidad, si no es tan malo se le puede colocar una sub-base prescindiendo de ésta última si el material de fundación es bueno o regular.

La subrasante es la capa en la que se apoya la estructura del pavimento y la característica especial que define la propiedad de los materiales que componen la subrasante, se conoce como módulo de resiliencia ( $M_r$ ).

La subrasante tiene una gran influencia en la construcción del pavimento y en la eficiencia del mismo, así las subrasantes inestables presentan problemas relativos a la colocación y compactación de los materiales de la base y subbase y no dan el soporte adecuado para las subsiguientes operaciones de pavimentación, los problemas que se presentan no serán observados sino hasta después de la culminación de la construcción, cuanto la estructura entre en funcionamiento y deba soportar las cargas del tránsito.

Los esfuerzos, desplazamientos y agrietamientos son influidas en gran porcentaje por ésta capa, un gran porcentaje de las deflexiones que se producen en la superficie de un pavimento se le puede atribuir a las subrasantes, por este motivo se debe asegurar una buena caracterización de la subrasante.

### **2.3.1. Propiedades de los suelos como subrasante en carreteras**

**Conceptos básicos necesarios.-** El pavimento es un sistema estructural a base de capas que le dan las propiedades y resistencias necesarias para cumplir con las solicitaciones funcionales y estructurales. A nivel de capacidad funcional, debe poseer una calidad aceptable en la carpeta de rodadura, una adecuada fricción superficial, una buena geometría por seguridad, y determinado aspecto estético. A nivel estructural debe soportar las solicitaciones a las que se somete todo el paquete estructural (base, subbase y subrasante), teniendo en cuenta las cargas impuestas por el tránsito y las condiciones ambientales.

**Las fallas que presente el pavimento serán el resultado de la interacción de los siguientes factores:**

Mal diseño.- El diseño del pavimento debe estar orientado a cumplir los requisitos estructurales y funcionales.

Mala práctica en la construcción.

Falta de mantenimiento o mantenimiento inadecuado.

Tránsito.- Influye en magnitud y frecuencia, la frecuencia es importante porque en cada punto del pavimento habrá situaciones de carga y descarga. La principal característica de esta variable es que tiene una naturaleza cíclica o repetitiva.

Materiales inadecuados.- Aquellos materiales que no cumplen con las especificaciones técnicas para la construcción de carreteras.

Condiciones ambientales.- Como la temperatura ambiente que tiene influencia directa durante la construcción ya que hay que ver la humedad necesaria para la compactación del terreno de fundación, la napa freática, que puede alterar considerablemente la temperatura de equilibrio, el régimen de precipitaciones, que en nuestro medio se presenta en la estación de verano y que puede causar el incremento del nivel freático además de infiltración, pudiendo afectar el funcionamiento de la superficie del pavimento ocasionando desprendimientos, hundimientos, etc.

**Entre las propiedades requeridas para estos suelos tenemos:**

Resistencia

Drenaje

Fácil compactación

Conservación de la compactación

Estabilidad volumétrica

### **2.3.2. Funciones de los materiales subrasante – terraplén**

La función de la sub-rasante es soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación, además de considerarse la cimentación del pavimento. Entre mejor calidad se tenga en esta capa el espesor del pavimento será más reducido y habrá un ahorro en costos sin mermar la calidad. Las características con las que debe cumplir son:

f máximo de 3", expansión máxima del 5%, grado de compactación mínimo del 95%, espesor mínimo de 30 cm para caminos de bajo tránsito y de 50 cm en caminos con un TPDA > de 2000 vehículos.

Otra de las funciones de la sub-rasante es evitar que el terraplén contamine al pavimento y que sea absorbido por las terracerías.

#### **Las principales funciones de la capa subrasante son:**

Recibir y resistir las cargas de tránsito que le son permitidas por el pavimento.

Transmitir y disminuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén.

Estas dos funciones son estructurales y comunes todas las capas de las secciones transversales de un pavimento.

Entre las cualidades de una subrasante, que generalmente son deseables por los ingenieros de vías se tienen las siguientes:

Una alta resistencia.- Permanencia de la resistencia por lo menos durante la vida útil del pavimento.

Una buena uniformidad en todas las direcciones.

Una alta densidad.- Poco susceptibles a los cambios volumétricos.

Poco susceptibles a la acción del agua.

Buena trabajabilidad durante el proceso de compactación.

Permanencia de las propiedades inducidas mediante la compactación.

La parte superior de la capa subrasante coincide con la subrasante coincide con la subrasante o línea subrasante del proyecto geométrico la cual debe cumplir con las especificaciones de pendiente longitudinal para la obra. Esta línea marca la altura de las terracerías y por tanto su espesor, que la mayor de las veces es mayor que el necesario en la estructura. En los procedimientos de construcción, los materiales se deben

compactar con el equipo más adecuado, de acuerdo con sus características. Cuando los materiales encontrados en las zonas cercanas a la obra no cumplen con las características marcadas en las normas, se requiere reestabilizarlos mecánica y químicamente.

#### **2.3.2.1. Terraplén**

La finalidad del cuerpo del terraplén es proporcionar la altura necesaria para cumplir con el proyecto, deberá resistir las cargas de las capas superiores y distribuirlas adecuadamente en el terreno natural. Por normatividad no se acepta material del tipo MH, OH, Y CH cuando su límite líquido sea mayor del 80%, deberá tener un VRS mínimo de 5%. Si está compuesto de rocas, se recomienda formar capas del espesor del tamaño máximo y se pasara un tractor de oruga en tres ocasiones por cada lugar con un movimiento de zig-zag que se conoce como bandeado, el grado de compactación será del 90% y si es necesario realizar modelos en barrancas donde no es fácil el empleo del equipo, se permite que el material se coloque a volteo hasta una altura donde ya pueda operar la máquina.

#### **2.3.3. Terrenos de fundación para subrasante**

De manera muy general, los terrenos en que se cimentará una estructura de pavimento, se puede clasificar en:

Roca

Suelo

##### **2.3.3.1. La roca como subrasante**

En la mayoría de los casos, la roca no plantea problemas como terreno de fundación ya que la estructura de pavimento le comunica esfuerzos de baja intensidad en relación a su resistencia. Las propiedades de la roca como terreno de fundación varían entre límites muy amplios, Nos interesa el desgaste bajo la acción de los agentes mecánicos, que sean resistentes a los agentes atmosféricos y sean medianamente trabajables por medio de maquinaria o explosivos.

##### **2.3.3.2. Los suelos como subrasante**

Este tipo de subrasante se puede dividir en dos grandes grupos:

Subrasante constituida por suelos friccionalante

Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas

### **2.3.3.2.1. Subrasante constituida por suelos friccionantes**

Los suelos friccionantes tales como: gravas, arenas y limos no plásticos, constituyen generalmente un excelente terreno de fundación, con capacidad de carga suficiente y sin problema de asentamientos de importancia.

Algunos problemas que se pueden presentar con estos suelos, están ligados al flujo de agua a través de ellos y su grado de compacidad, entre los más frecuentes se pueden nombrar:

#### **Colapso rápido de la estructura**

Se presentan en las arenas y limos muy sueltos, los cuales presentan problemas de asentamiento brusco por colapso rápido de su estructura simple; este efecto, sin embargo, es poco importante bajo rellenos, pues estos absorben los movimientos producidos con facilidad; el efecto es más importante cuando el terreno de fundación soporta las estructuras rígidas que suelen construirse en una vía terrestre.

#### **Tubificación**

Este fenómeno se produce cuando el agua se filtra a través del suelo de cimentación con un gradiente hidráulico superior al crítico, de modo que produce arrastre de partículas. Este fenómeno aunque no es muy común en la subrasante de vías terrestres, se presenta en ocasiones cuando la estructura

Corta el drenaje superficial en una zona, embalsándose el agua, de manera que alcance diferentes niveles en ambos lados del terraplén.

#### **Licuación**

Las fuerzas producidas por el flujo ascendente del agua provocan, al vencer el peso de las partículas, efectos de flotación que hacen que el suelo pierda total o casi totalmente su capacidad de carga. El flujo de agua es lento comparado con la velocidad de disipación de las altas presiones intersticiales, disminuyendo los valores de resistencia al esfuerzo cortante hasta valores nulos o muy próximos a ceros.

### **2.3.3.2.2. Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas**

En los terrenos de fundación constituidos por limos plásticos y arcillas han de distinguirse dos casos diferentes, a saber:

Subrasantes constituidas por suelos de baja compresibilidad (CL, ML, OL)

Subrasantes constituidas por suelos de alta compresibilidad (CL, MH, OH)

En el primer caso, no suelen presentarse problemas especiales que repercutan desfavorablemente en la estructura del pavimento. Los asentamientos son absorbidos por la estructura y la resistencia del terreno de cimentación es suficiente para soportar los terraplenes que hayan de ser construidos. Los suelos clasificados como OL, pueden no ser apropiados para su uso como cuerpo de terraplén, debido a su contenido de materia orgánica. Los suelos plásticos de alta compresibilidad que constituyen gran parte de terrenos de cimentación, esta asociados a grandes problemas de falta de resistencia y compresibilidad, a no ser que su contenido de agua sea permanentemente muy bajo. Esto terrenos blandos y compresibles suelen ser típicos de formaciones fluviales (deltas o llanuras deyección), lacustre o marinas. El problema más grave que ocasionan los suelos finos de alta plasticidad es el asentamiento que se produce en ellos al aplicarle la sobrecarga de la estructura vial, dichos asentamientos producen entre otros efectos los siguientes:

Perdida de bombeo

Aparición de asentamientos diferenciales en el sentido longitudinal

Disminución de la altura de un terraplén

#### **2.3.4. Tipos de estabilización**

##### **Estabilización mecánica**

Se realiza por medio del proceso de compactación. La compactación mejora las propiedades del suelo y en particular la densificación del suelo, el aumento de resistencia y la capacidad de carga, asimismo ayuda a reducir su compresibilidad y aptitud para absorber agua.

##### **Estabilización física**

Busca aumentar la fricción, la cohesión y la impermeabilidad. Cuando un material se ajusta granulométricamente por medio de adición de material o ajustes a su banda granulométrica, genera en el material resultante mayor fricción entre las partículas y cohesión de la masa del suelo.

##### **Estabilización físico-química**

Se realiza en suelos con gran cantidad de finos plásticos, como limos y arcillas especialmente. Si el suelo es tratado con hidróxido de calcio produce en la masa de suelo

resultante un intercambio iónico y cimentación.

Generalmente, con este tipo de estabilización se busca reducir la plasticidad del suelo, aumentar su resistencia, trabajabilidad y estabilidad volumétrica.

### **Estabilización química**

Se realiza en suelos finos tipo arenas, mediante la adición de un agente hidráulico, como es el caso del cemento Portland, que al mezclarse íntimamente con el suelo y al desarrollar su propiedad hidráulica, produce una reacción química, intercambio iónico y cimentación. La resistencia del suelo y su estabilidad aumentan significativamente.

### **2.3.5. Características y control**

El material deberá cumplir con las normas y características de calidad, a continuación presentamos tablas en las cuales clasificamos de acuerdo al C.B.R., el tipo de terracerías y subrasantes:

Tabla 2.3. Categorías de suelos para terracerías y capa subrasante

<b>Característica</b>	<b>Suelos tolerables</b>	<b>Suelos adecuados</b>	<b>Suelos seleccionados</b>
Tamaño máximo	25 % > 15 cm	< 10 cm	< 8 cm
Contenido de finos %	....	35	25
Limite líquido %	40	40	30
Índice de plasticidad %	....	....	10
Peso vol. máximo Kg/m <sup>3</sup>	1450	1750	....
C.B.R. %	> 3	> 5	> 10
Expansión %	....	< 2	0

Fuente: Instituto Mexicano del cemento y del concreto IMCYC

### **Para el control tecnológico se ejecutan los siguientes ensayos:**

Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180-D para cada 1000 m<sup>3</sup> del mismo material, con un espaciamiento máximo de 100 metros lineales; con las muestras recogidas en puntos que obedezcan siempre el orden: borde derecho, eje, borde izquierdo y viceversa.

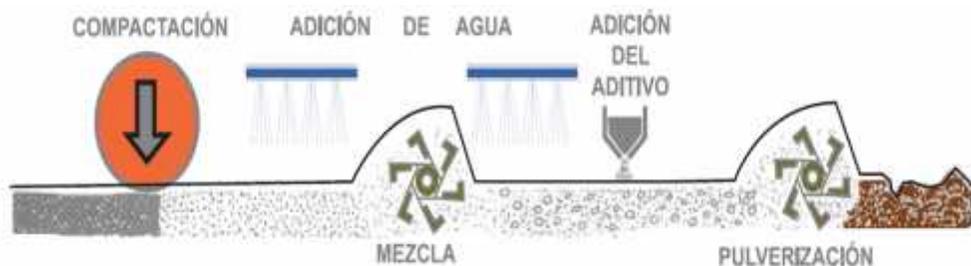
Determinación de la densidad en sitio cada 100 metros. Lineales en los puntos donde fueran obtenidas las muestras para los ensayos de compactación.

Determinación del contenido de humedad cada 100 metros lineales inmediatamente antes de la compactación.

Ensayos de granulometría AASHTO 27, de límite líquido AASHTO T-89 y límite plástico AASHTO T-90, espaciamiento máximo de 250 metros lineales.

### 2.3.6. Procedimientos de construcción

Figura 2.1. Fases de la estabilización en sitio



Fuente: Ingeniería de carreteras vol II. Del val Melús, Miguel Ángel; Kraemer Heilperno, Carlos; Pardillo, José María; Rocci, Sandro; Romana, Manuel G. & Sánchez Blanco, Victor. Primera Edición, 2004

El procedimiento básico para la construcción de una modificación con cal o cemento es muy similar, puede realizarse en sitio o en planta. En el caso de la estabilización en sitio puede dividirse en dos etapas (Figura 2.1), la preparación y el procesamiento o construcción, cuyas fases se detallan a continuación:

#### Preparación inicial

Conformar la superficie, coronar y preparar pendientes transversales

De ser necesario, escarificar, pulverizar y rehumedecer el suelo

Reconformar la superficie

#### Procesamiento

Dispersar el aditivo y mezclar

Aplicar agua y mezclar

Compactar

Afinar

Curar

El proceso constructivo incluye una serie de variables que dependen del aditivo, del material e inclusive del equipo que se utilice para la construcción, entre otros. En la guía se presentan indicaciones específicas para cada caso.

## **2.4. ADITIVO ESTABILIZADOR TERRASIL**

Terrasil es un aditivo para suelos de última generación formado al 100% por organosilanos, capas de repeler el agua, eliminar el hinchamiento, la absorción de suelos, estable al calor y a la radiación ultravioleta. Es por lo tanto un agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización tradicional de suelos.

Terrasil, reacciona químicamente con todo tipo de suelos y su principal efecto consiste en la impermeabilización/hidrofugación de las partículas del suelo frente a la acción del agua. Es por tanto un agente impermeabilizante de suelos, que aporta ventajas adicionales a la estabilización tradicional de suelos. Terrasil posee la cualidad de poder estabilizar todo tipo de suelos, independientemente de las propiedades mineralógicas del suelo a tratar y aportando mejoras significativas en la capacidad portante. Los suelos inestables pueden provocar problemas graves en estructuras y pavimentos.

La estabilización de suelos con Terrasil nos permite transformar un suelo inestable en suelos estables químicamente y de forma permanente, sin que esto provoque pérdidas de porosidad, repele el agua, aumenta el CBR, elimina la erosión del agua, mejora la adherencia de polímeros, elimina la expansividad de arcillas, mayor duración y mejores propiedades que nos permite una reducción considerable de los espesores de las capas y por tanto la reducción de costes.

### **2.4.1. Aplicación del aditivo Terrasil en suelos**

Los suelos se pueden estabilizar de dos formas, una de ellas de forma mecánica, mezclando dos o más suelos y gravas de características complementarias, la otra forma es empleando el uso de aditivos, algunos de los más conocidos son la cal, cemento, polímeros, enzimas que actúan de forma física y química.

Además en el mercado existe otro producto no tan conocido en España pero con mucho auge en otros países como el Terrasil tratamiento revolucionario ya que se trata de una

estabilización de suelos con nanotecnología esta tecnología actúa de forma química y permanente sobre las propiedades de materia granular.

El Terrasil está unido a las técnicas de estabilización de suelos ya que estas se desarrollan debido a la necesidad de mejorar artificialmente las características de un suelo de tal modo que sea apto para integrar una determinada capa de firme. En la estabilización de suelos en primer lugar se pretende aumentar la resistencia mecánica, consiguiendo una adecuada estabilidad a las cargas y una escasa variación volumétrica. El proceso de estabilización de suelos no solo nos ayuda a la mejora de suelos de mala calidad con problemas de plasticidad y granulometrías finas, si no que se ha extendido a realizar tratamiento con áridos de buena calidad. La estabilización de suelos se viene desarrollando en España desde los años 90, con el fin principal de mejorar los suelos arcillosos. Los efectos y ventajas en los que se basan las técnicas de estabilización de suelos han hecho que su aplicación actual no se limite a capas de infraestructura como terraplenes, coronación y fondos de desmonte en carreteras sino que se apliquen en multitud de tipos y partes de las explanaciones:

Estabilización y reparación de caminos y vías de servicio

Estabilización de explanaciones aeroportuarias (pistas de vuelo)

Estabilización de infraestructuras ferroviarias, especialmente de alta velocidad

Estabilización de terrenos para las explanaciones en grandes obras de urbanización

Estabilización de zonas de vertederos para construir sobre ellas instalaciones deportivas

Terrasil posee la cualidad de poder estabilizar todo tipo de suelos, independientemente de las propiedades mineralógicas del suelo a tratar y aportando mejoras significativas en la capacidad portante. Los suelos inestables pueden provocar problemas graves en estructuras y pavimentos.

La estabilización de suelos con nanotecnología nos permite transformar un suelo inestable en suelos estables químicamente y de forma permanente, sin que esto provoque pérdidas de porosidad, repele el agua, aumenta el CBR, elimina la erosión del agua, mejora la adherencia de polímeros, elimina la expansividad de arcillas, mayor duración y mejores propiedades que nos permite una reducción considerable de los espesores de las capas y por tanto la reducción de costes.

#### 2.4.2. Estabilizaciones viales con Terrasil

El extraordinario poder de Terrasil hace que los suelos no tratados mejoren mucho sus propiedades mecánicas. De este modo, caminos y pistas no pavimentadas, bases de carreteras, pavimentos ecológicos de aspecto natural, etc. quedan protegidos frente a las acciones del tráfico y de la naturaleza. Los suelos tratados resisten mucho más tiempo antes de que se haga necesario cualquier tipo de mantenimiento, que en otro caso sería mucho más frecuente e incurriendo en los correspondientes costes asociados.

Los siguientes ejemplos son situaciones típicas en las que Terrasil despliega toda su capacidad para estabilizar un suelo y conseguir el objetivo propuesto.

Figura 2.2. Estabilizaciones viales sin asfaltar



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

Estabilización de bases y sub-bases, permitiendo para su ejecución en muchos casos el aprovechamiento de suelo natural existente sin necesidad de aportación de cantera.

Figura 2.3. Estabilización de bases y sub-bases



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

Un caso particular e interesante es la ejecución de pavimentos ecológicos con terrizos para caminos multiuso. Ejecución ecológica, aspecto natural y economía para actuaciones de paisajismo.

Figura 2.4. Pavimentos ecológicos con terrizos



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

También se pueden estabilizar suelos en la construcción de áreas de aparcamiento de aspecto natural, con alta resistencia a la abrasión. Ecología y estética se unen en proyectos emblemáticos.

Figura 2.5. Áreas de Aparqueamiento



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

Terrasil aplicado en arcenes no pavimentados (o sus recorridos cuando se extienden nuevas capas de rodadura) mantienen aquellos en buen estado y aumentan la seguridad en caso de invasión por vehículo.

Figura 2.6. Arcenes no pavimentados



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

Terrasil es una alternativa muy interesante desde los puntos de vista medioambiental y económico para la estabilización de bases de campos de fútbol.

Figura 2.7. Estabilización de bases de campos de fútbol



Fuente: <http://www.optimasoil.com/index.php/productos/Terrasil>

### **2.4.3. Ventajas técnicas**

#### **2.4.3.1. Suelos resistentes al agua permeabilidad**

Con la tecnología de Terrasil como método de estabilización de suelos conseguimos que los grupos silanol del reactivo provoquen una modificación química en los silicatos presentes en el suelo de tal forma que le confiera propiedades hidrófobas permanentes. Esta transformación del suelo nos afecta a un parámetro denominado permeabilidad que se define como la medida de la velocidad a la que un fluido atraviesa los poros de un sólido. Si el grado de permeabilidad del suelo es alto, el agua lo penetrará fácilmente.

Normalmente, el tamaño de los poros y su conectividad determinan si el suelo posee una alta o baja permeabilidad. El agua podrá fluir fácilmente a través de un suelo de poros grandes con una buena conectividad entre ellos. Los poros pequeños con el mismo grado de conectividad tendría una baja permeabilidad, ya que el agua fluiría a través del suelo más lentamente, es el caso de los suelos arcillosos.

#### **2.4.3.2. Incremento de densidades**

La compactación es el procedimiento de aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando su capacidad de soporte y estabilidad entre otras propiedades. La densidad del suelo nos indica el grado de compactación, por lo tanto si conseguimos aumentar las densidades, estamos aumentando la resistencia superficial de un terreno sobre el cual se va construir una carretera u obra.

Los suelos tratados con Terrasil alcanzan mayores densidades con menor energía de compactación y menor aporte de agua debido a que el organosilano reacciona con el suelo, envolviendo a las partículas, favoreciendo a una mayor lubricación y por tanto a la ordenación de sus partículas.

#### **2.4.3.3. Multiplica el índice CBR**

El índice CBR (California Bearin Ratio) nos indica la capacidad portante de un suelo en función de su estado, densidad y humedad así como de la sobrecarga que se le aplique. Con la adición del estabilizador conseguimos mantener el suelo seco, por lo que la fricción entre partículas es la más alta y por tanto, se maximizan las propiedades mecánicas, relacionadas con la compresión. Terrasil no cohesiona las partículas, por lo que no se espera resistencia a la tracción. Este índice se utiliza actualmente en España para caracterizar los suelos a emplear en la formación de la explanada. A mayor índice CBR, mayor es la capacidad de soporte de un suelo.

#### **2.4.3.4. Evita la absorción de agua**

Al convertir el suelo en repelente al agua, eliminamos la absorción por capilaridad. Esto asegura que el suelo se mantenga seco y con gran fricción entre partículas independientemente de la humedad de la capa inferior.

En el método de diseño de pavimentos AASHTO 93 se establecen unos coeficientes de drenaje a partir de la calidad del drenaje y del tiempo que se considera que el pavimento puede encontrarse con una cantidad de agua cercana a la saturación. El reactivo Terrasil en el suelo tiene la repercusión sobre el coeficiente de drenabilidad AASHTO 93 llegando a incrementar el valor hasta el máximo (1.40%).

Tabla 2.4. Coeficientes de drenaje

Calidad del drenaje	P= % del tiempo en que el pavimento eta expuesto a niveles de humedad cercanos a la saturación				El agua se remueve en
	1%	1% - 5%	5% - 25%	25%	
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20	2 – 4 horas
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00	12 – 24 horas
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80	3 – 6 días
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60	18 – 36 días
Muy pobre	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40	Más de 36 días

Fuente: Guía para diseño de pavimentos AASHTO 1993

#### **2.4.3.5 Mantiene la transpirabilidad**

El aditivo Terrasil no tapa los poros del suelo para entender este concepto definiremos previamente la porosidad como el volumen de todos los espacios abiertos (poros) que hay entre los granos sólidos del suelo. La porosidad es importante ya que permite que los suelos mantengan la transpirabilidad.

Esto significa que el suelo eliminará el agua en forma de vapor, mientras impide la entrada de agua en forma líquida. Gracias a la constitución de está membrana in-situ unidireccional, los suelos tratados serán mucho más tolerantes a posibles fallos de ejecución o asentamientos diferenciales.

#### **2.4.3.6. Minimiza la expansividad del suelo**

La expansividad es un fenómeno que afecta algunos suelos, y que puede acarrear múltiples problemas a la edificación, por lo cual requiere de un estudio pormenorizado.

La capacidad expansiva del suelo depende de su naturaleza; si un suelo arcilloso modifica el contenido de humedad, el cambio de volumen puede ser significativo. Tanto por aumento de volumen por mayor tenor de humedad como, al reducir la humedad,

suele producirse retracción por desecación. El Terrasil al nanosiliconizar el suelo, evita que el árido pueda mojarse y, por tanto, se elimina la acción expansiva de las partículas. El resultado global es un suelo en el que la expansión/hinchamiento es mínimo o inexistente y evita movimientos de finos.

#### **2.4.3.7. Beneficios del Terrasil**

El suelo tratado consigue características hidrófobas de forma permanente

El suelo mantiene la transpiración (expulsa el agua en forma de vapor)

Reduce el índice de plasticidad de los suelos

Se aumentan los valores del CBR

El hinchamiento se reduce

Mejora el módulo resiliente

#### **El CBR**

Se mejoran los datos de densidad y compactación en obra

El hinchamiento se reduce

Mejora el módulo resiliente

Es posible reducir el consumo de agua necesaria para la compactación del material

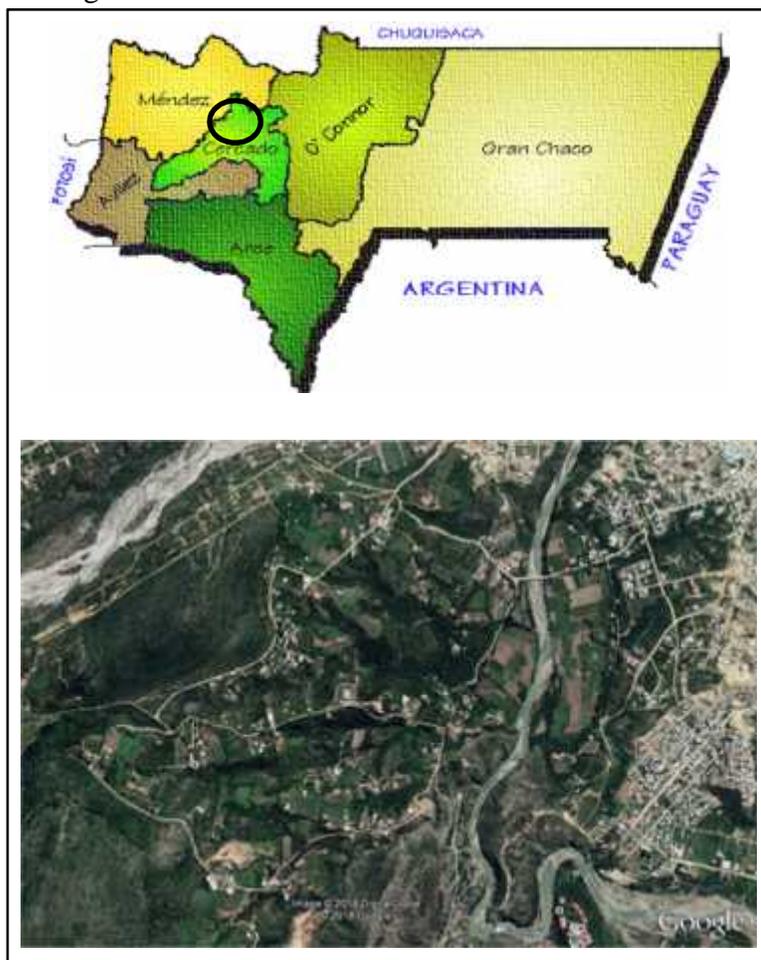
## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD DE LA SUBRASANTE NATURAL Y LA SUBRASANTE UTILIZANDO PRODUCTO TERRASIL

#### 3.1. UBICACIÓN DEL PROYECTO

La zona del proyecto se ubica en la Provincia de Cercado, Municipio de Cercado del Departamento de Tarija, se encuentra entre  $21^{\circ} 30' 43.87''$  de Latitud Sud,  $64^{\circ} 46' 12.10''$  de Longitud Oeste y una altura promedio de 1975 m.s.n.m. y tiene una longitud de 5.85 kilómetros.

Figura 3.1. Localización satelital del área de estudio



Fuente: Google earth

### 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En primer lugar se realizó una visita de campo al circuito de Obrajes, en la misma se observan las características físicas generales del suelo y se tomaron decisiones respecto a la ubicación de las calicatas al ser excavadas para la obtención de las muestras del suelo.

En la otra visita se obtuvieron las muestras de suelo a lo largo del circuito y con ellas se procedió a realizar en el laboratorio de suelos y materiales, La muestra se la extrajo cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en las guías de laboratorio para la extracción de muestra (ASTM D4220) del manual de carreteras V4C. Las mismas que consistieron en los siguientes ensayos:

Humedad

Granulometría

Límites de Atterberg

Compactación

#### 3.2.1. Muestra

Se tomaran muestras cada 500 metros del circuito de Obrajes sumando así un total de 6 muestras.

Tabla 3.1. Número de muestras

<b>Progresivas</b>	<b>N° Muestras</b>
2+000	1
2+500	1
3+000	1
3+500	1
4+000	1
4+500	1

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2. Muestreo de la calicata progresiva 2+000

Para este muestreo se procedió a recoger el material realizando por excavación y estaba libre de materia orgánica, las muestras tomadas se las colocaron en bolsas de nylon para la caracterización del mismo y especialmente para evitar la pérdida de humedad natural del suelo y saquillos para los ensayos debido a que se trabajará con muestras secas. En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.2. Zona de procedencia del material extraído



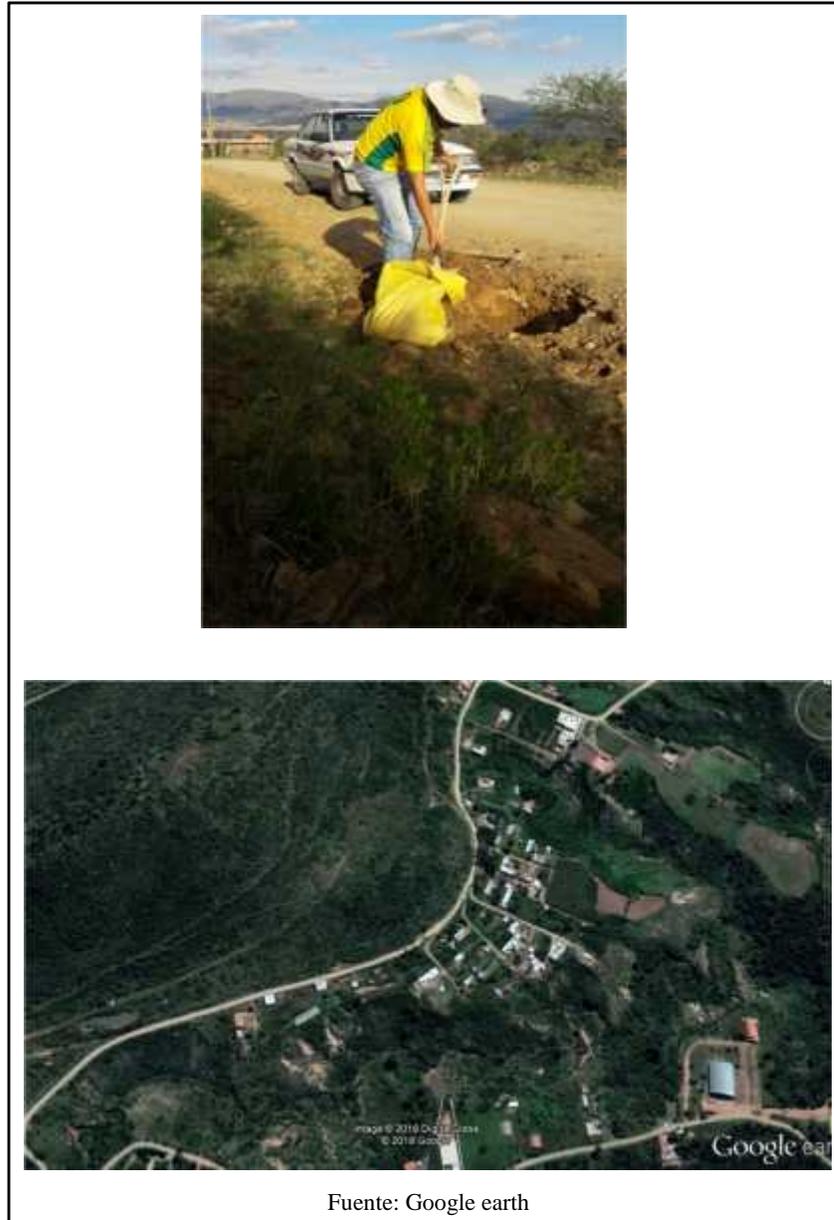
Fuente: Google earth

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.3. Muestreo de la calicata progresiva 2+500

El muestreo consistió en recoger el material seleccionado cual se obtuvo mediante excavación, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos. . En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.3. Zona de procedencia del material extraído



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.4. Muestreo de la calicata progresiva 3+000

El muestreo consistió en recoger el material seleccionando cual se realizó por excavación, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos. En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.4. Zona de procedencia del material extraído



Fuente: Google earth

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.5. Muestreo de la calicata progresiva 3+500

El muestreo consistió en recoger el material seleccionando cual se realizó por excavación, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos. En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.5. Zona de procedencia del material extraído



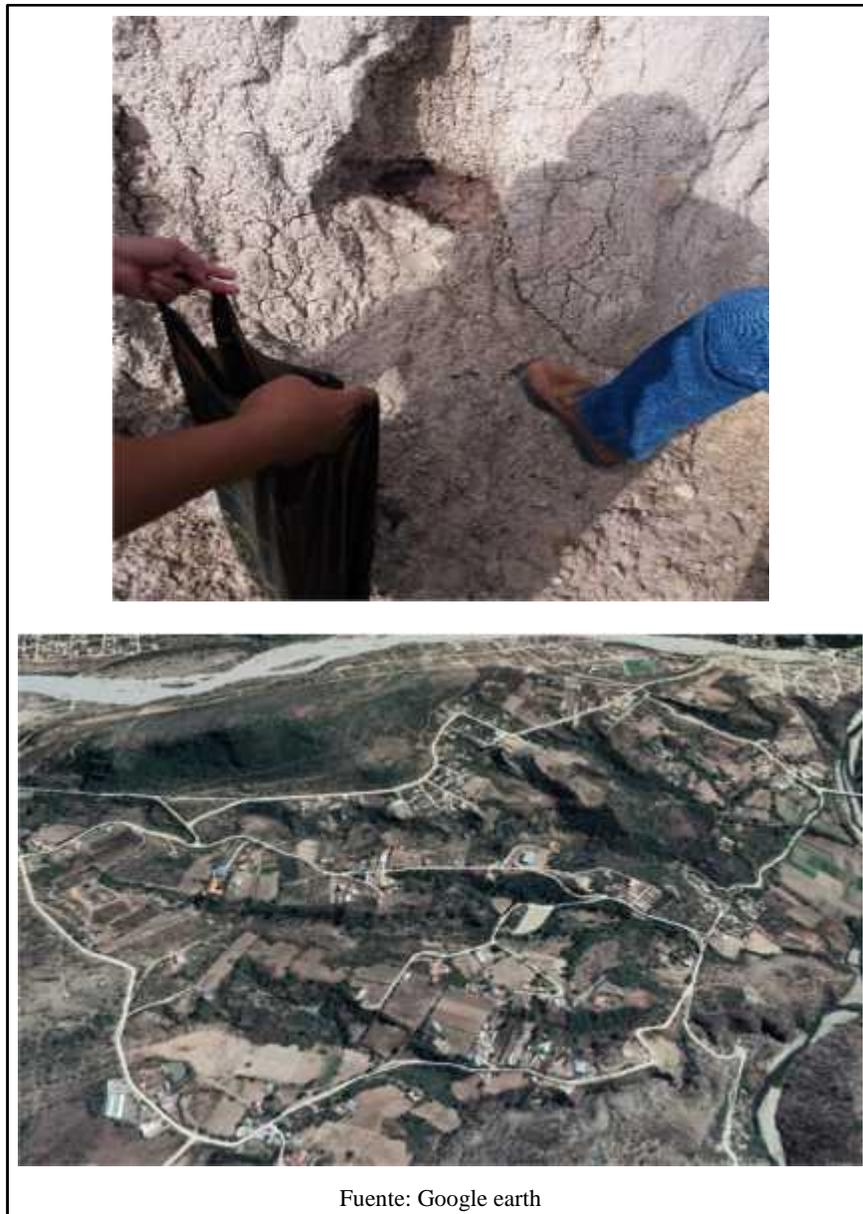
Fuente: Google earth

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.6. Muestreo de la calicata progresiva 4+000

El muestreo consistió en recoger el material seleccionando cual se realizó por excavación, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos. En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.6. Zona de procedencia del material extraído



Fuente: Elaboración propia

### 3.2.7. Muestreo de la calicata progresiva 4+500

El muestreo consistió en recoger el material seleccionando cual se realizó por excavación, luego se procedió a recoger el material en bolsas para los respectivos ensayos. En la siguiente figura se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

**Figura 3.7.** Zona de procedencia del material extraído



Fuente: Google earth

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.8. Proceso de obtención del producto de Terrasil

El aditivo que se utilizara para la investigación será el producto Terrasil proporcionada por la empresa BREAM SRL Environmental Solutions ubicada calle Acacia N° 32 Cond. Sevilla Pinatar Santa Cruz-Bolivia, encargado gerente general de Bolivia Ing. Cesar Vinueza quien realizo ensayos del referente aditivo a la institución SEDECA TARIJA.

Figura 3.8. Producto aditivo Terrasil



Fuente: Elaboración propia

Para realizar este estudio se optó por una dosificación de  $0.2-2.5 \text{ Kg/m}^3$  de aditivo Terrasil referido al suelo seco, según una recomendación general de estudios que recomiendan usarla para suelos cohesivos dosificaciones entre 3% hasta 12%.

Figura 3.9. Dosificación mezclada

Agua	Terrasil
Necesaria para alcanzar el optimo de compactación	0,2-2 kg/m <sup>3</sup>
Aplicar en el procedimiento mezclado con el material a estabilizar y en disolución con el agua optima para alcanzar la densidad máxima.	

Fuente: Ficha técnica OPTIMASOIL aditivo estabilizador químico.

### **3.2.9. Criterio de selección de la muestra**

Los procedimientos de muestreo son las técnicas que se aplican para obtener muestras de suelo, alteradas o inalteradas durante una exploración del subsuelo.

**Muestra alterada.**- Una muestra alterada se define como aquella donde parte de ella o toda, ha sufrido una alteración tal, que ha perdido la estructura que poseía in-situ. En general las muestras alteradas se usan para la identificación del suelo como ser:

Análisis granulométrico

Determinación de los límites líquido y plástico

Clasificación del suelo

Sin embargo, las muestras alteradas no deben usarse para pruebas de consolidación, permeabilidad o de resistencia cortante, ya que estas deben hacerse con muestras inalteradas.

**Muestra inalterada.**- Es aquella muestra que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones de campo.

Para este trabajo de tesis de grado, las muestras con la que se trabajan son de tipo alterada o perturbadas debidos a que los ensayos que se realizan son de tipo identificativo para cada uno de los suelos, para esto se someten a estudios de caracterización mediante el cual se determinan sus propiedades físicas y mecánicas.

Un procedimiento adecuado de muestreo, facilitarán la correlación de los respectivos datos con propiedades ingenieriles.

### **3.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES**

Los estudios de caracterización son de vital importancia para conocer al material a tratar, así también es importante conocer las propiedades del material que se adicionarán, por lo tanto se recurre a pruebas de laboratorio para conocer las características del suelo natural y del producto Terrasil, materiales que componen este estudio, para así tener un criterio más amplio del comportamiento de un suelo tratado.

Por lo tanto para la caracterización de los materiales (suelos) son necesarios los siguientes tipos de caracterización: física, mecánica.

Para la caracterización son necesarios los ensayos de: contenido de humedad, análisis

granulométrico por tamizado, determinación del límite líquido, determinación del límite plástico e índice de plasticidad, compactación y capacidad portante CBR.

### 3.3.1. Ensayos de caracterización en los suelos naturales

Se refiere a los ensayos físico-mecánicos y químicos para la caracterización del suelo sin tratar es decir el suelo sin agente estabilizador (sin aditivo Terrasil) y se realizara los siguientes ensayos:

Tabla 3.2. Ensayos de caracterización a los suelos naturales

Caracterización	Ensayo	Normativa
<b>Física</b>	Contenido de humedad	ASTM D2216
	Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
	Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
<b>Mecánica</b>	Ensayo de compactación método (Proctor modificado)	ASTM D422 AASHTO T180
	Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia

#### 3.3.1.1 Contenido de humedad de la muestra (ASTM D2216)

El contenido de agua o más comúnmente la humedad de la muestra del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

#### Procedimiento del ensayo

Consiste en obtener una muestra húmeda representativa del material utilizado, colocarlo en un recipiente al horno, pesar el recipiente vacío y luego el recipiente más la muestra húmeda obteniendo así un peso del material más el recipiente, luego llevarla al horno a temperatura  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) en la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente, sacar del horno y pesar nuevamente el material, obteniendo un peso seco del material más el recipiente.

Figura 3.10. Pesado de la muestra húmeda y secada en el horno



Fuente: Elaboración propia

### Cálculos

El contenido de agua se calcula mediante la siguiente formula:

$$w(\%) = \frac{Pa}{P_{ss}} * 100$$

Dónde:

W (%)= Contenido de humedad en porcentaje

P1 = Peso de la tara y de la muestra húmeda (g)

P2 = Peso de la tara y de la muestra seca (g)

Pa = (P1-P2) = Peso del agua presente en el suelo (g)

Pss = (P2-Pc) = Peso del suelo después de secar al horno (g)

### Resultados

Tabla 3.3. Resultados del contenido de humedad natural

Humedad natural	
Muestra N°	Porcentaje de humedad w (%)
2+000	3.23
2+500	2.92
3+000	5.15
3+500	4.53
4+000	5.23
4+500	4.88

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.2. Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 - AASTHO T-88)

#### Objetivo

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm (tamiz N° 200), de una muestra de suelo.

Para determinar la granulometría del suelo se realizó por el método del lavado, debido a que se trata de material fino.

#### Material utilizado

Balanza

Tamices

Horno

Herramientas y accesorios.- brochas, recipientes y platos

#### Procedimiento del ensayo

a) Se toma una muestra representativa de suelo que pasa el tamiz N° 4 en una cantidad de 500 gr.

Figura 3.11. Cortado de material por tamiz N° 4 y cantidad de muestra



Fuente: Elaboración propia

b) A continuación se deja el material reposar en agua durante 24 horas hasta que este saturate completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo.

Figura 3.12. Muestra en saturación



Fuente: Elaboración propia

c) Hacer pasar el material por el tamiz N° 200, lavar cuidadosamente con agua potable el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

Figura 3.13. Lavado de la muestra en tamiz N° 200



Fuente: Elaboración propia

d) Posteriormente el material retenido en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo hasta una masa constante en horno a una temperatura de  $110 \pm 5$ .

Figura 3.14. Muestra retenida en tamiz N° 200



Fuente: Elaboración propia

- e) Una vez secado todo el material se procede a retamizar por las mallas, N° 10, N° 40 y N° 200, registrando los pesos de suelo retenido en cada tamiz.

Figura 3.15. Retamizado de suelo seco y cantidades retenidas en cada malla



Fuente: Elaboración propia

### Cálculos

La granulometría se presenta como porcentaje acumulado que pasa por cada tamiz, indicando como primer resultado el del menor tamiz en que pasa el 100% y expresando el resultado para los siguientes tamices como la diferencia entre el porcentaje que pasa en el tamiz inmediatamente anterior al de cálculo y el retenido en el tamiz de cálculo.

Los resultados de la granulometría se muestran en forma gráfica en un sistema de coordenadas ortogonales, en las abscisas, a escala logarítmica, se indican las aberturas

de los tamices y en las ordenadas, a escala lineal, los valores de los porcentajes que pasan en cada tamiz, obtenidos de acuerdo a lo calculado en porcentaje del retenido en cada tamiz.

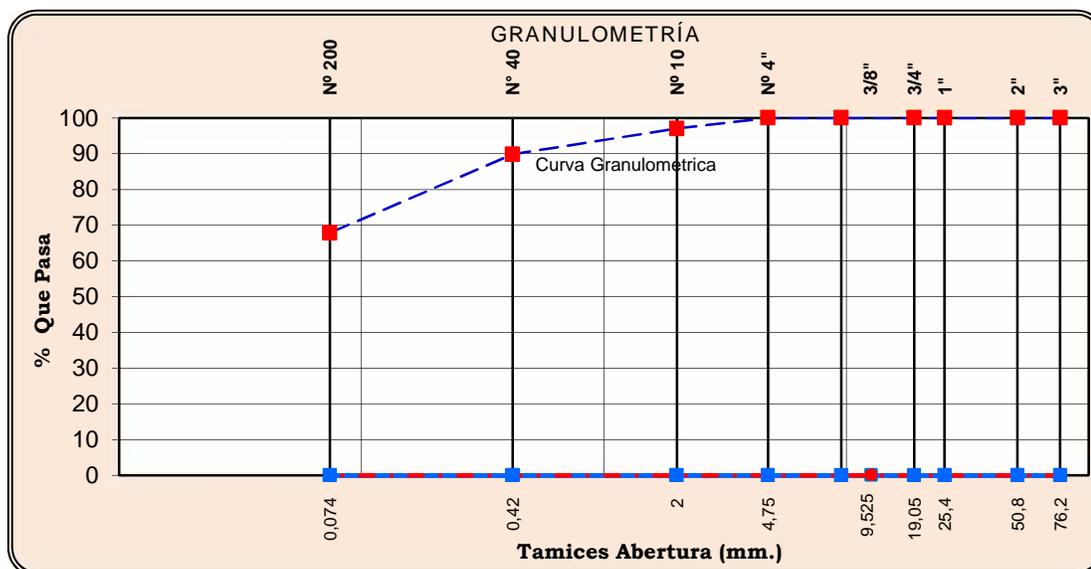
## Resultados

Tabla 3.4. Resultados de granulometría del suelo natural

Progresivas N°	2+000	2+500	3+000	3+500	4+000	4+500
Tamiz N°	% Que pasa					
3"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/4"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/8"	100.0	87.8	100.0	100.0	100.0	100.0
4	100.0	82.2	100.0	100.0	100.0	100.0
10	93.8	78.7	8.9	99.8	97.0	99.9
40	83.0	73.2	96.2	99.4	90.0	99.5
200	58.2	48.8	83.7	72.7	68.6	89.0

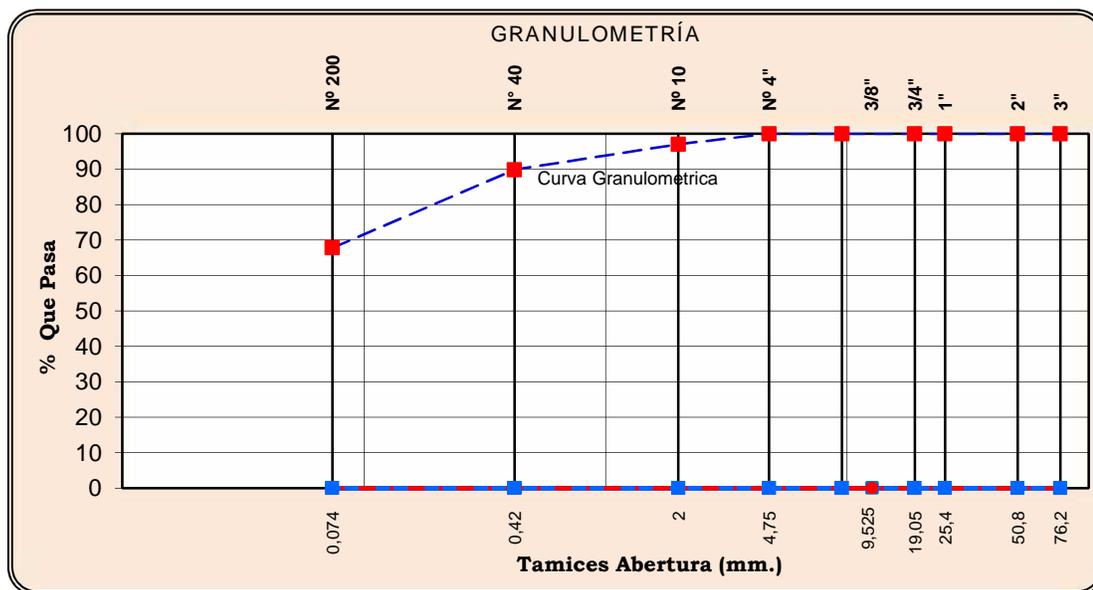
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.1. Granulometría progresiva 2+000



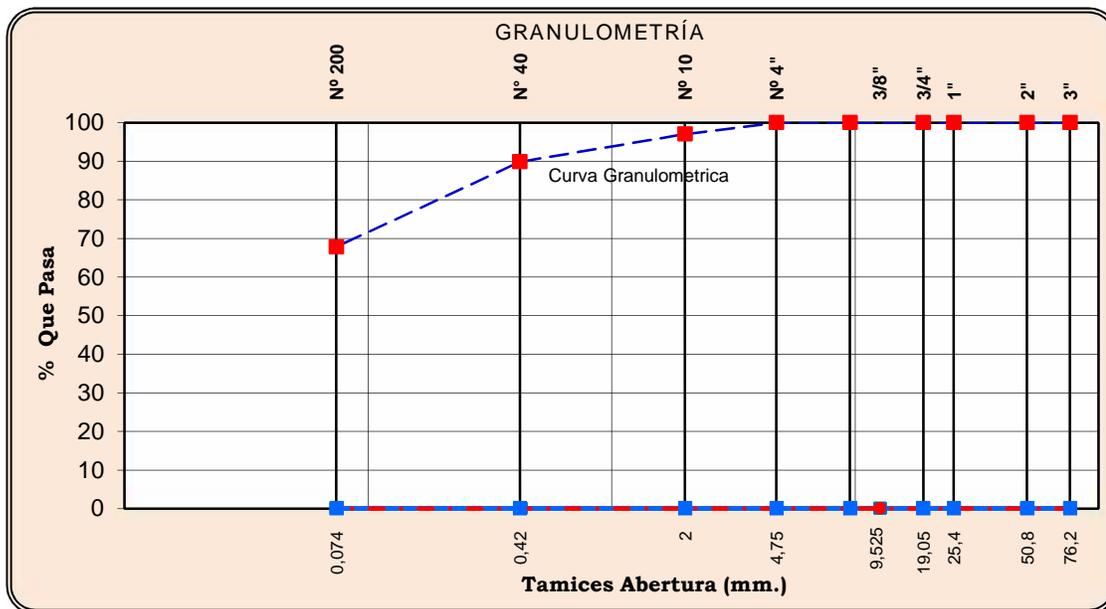
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.2. Granulometría progresiva 2+500



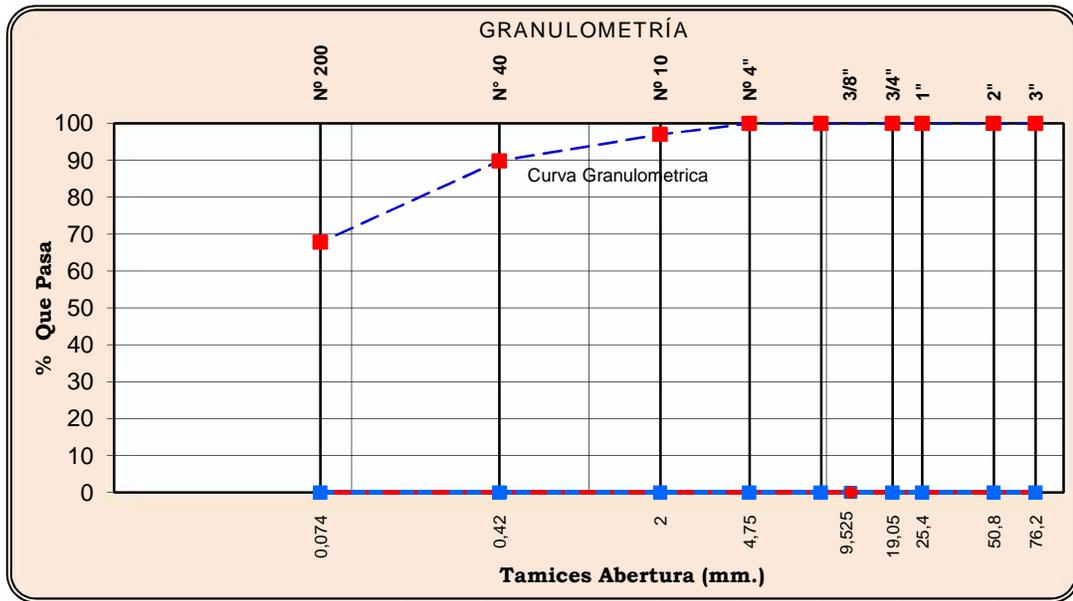
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.3. Granulometría progresiva 3+000



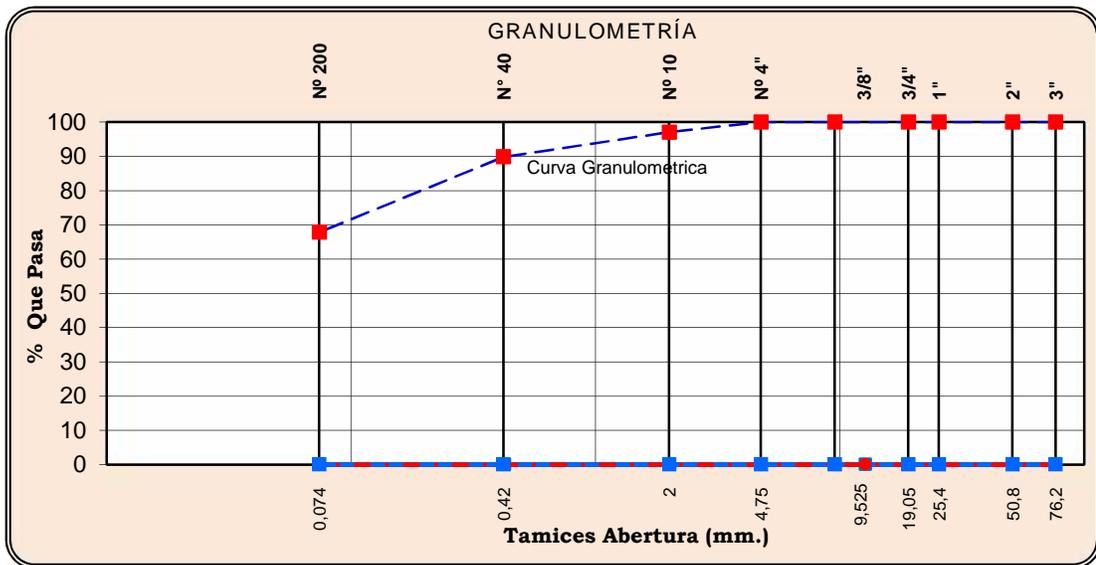
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.4. Granulometría progresiva 3+500



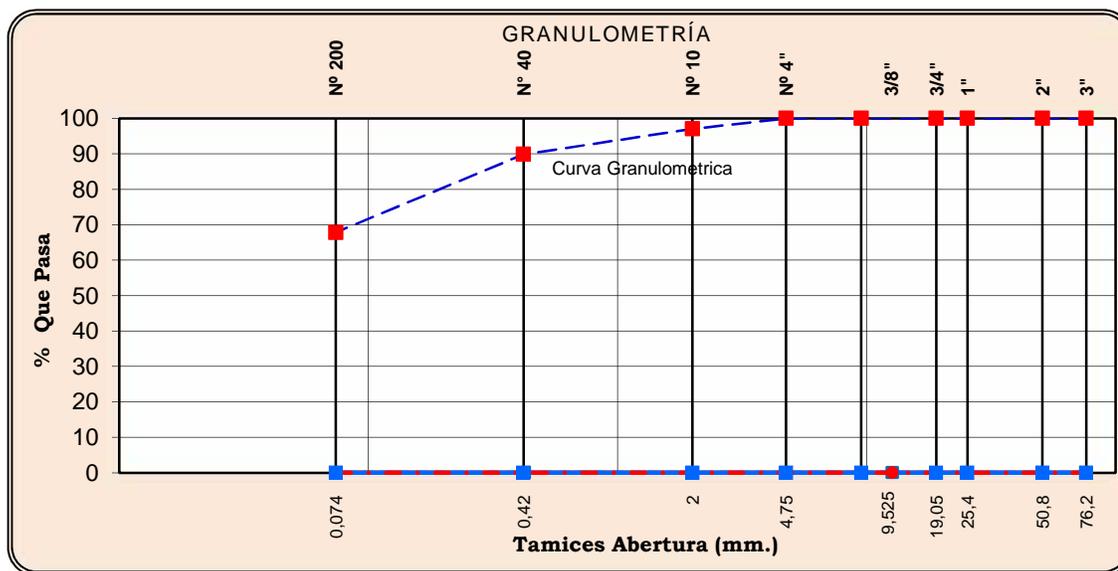
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.5. Granulometría progresiva 4+000



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.6. Granulometría progresiva 4+500



Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.3. Determinación del límite líquido (ASTM D4318 AASHTO T89)

#### Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar el límite líquido de los suelos, mediante la máquina Casagrande.

El límite líquido es un contenido de humedad específico que divide la consistencia plástica de la líquida del suelo.

#### Ajuste y control del aparato de límite líquido casagrande

Girar la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adosado al ranurador), verificar que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. Caso contrario se debe aflojar los tornillos de fijación y mover el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida.

Figura 3.16. Calibración de aparato casagrande



Fuente: Elaboración propia

### **Preparación de la muestra**

- a) Se desmenuza los terrones que presentaban los suelos, con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.
- b) Se extrae una muestra de suelo de aproximadamente unos 500 gramos que pasa el tamiz 0,425 mm (N° 40).

Figura 3.17. Material pasante por el tamiz N° 40



Fuente: Elaboración propia

c) Se coloca la muestra en un plato, agregar agua y mezclar completamente mediante la espátula. Se continúa la operación durante el tiempo y con la cantidad de agua necesarios para asegurar una mezcla homogénea.

Figura 3.18. Preparación de la mezcla



Fuente: Elaboración propia

### **Procedimiento del ensayo**

- a) Colocar el aparato de límite líquido sobre una base firme.
- b) En la taza del equipo se coloca una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula; la masa de suelo deberá colocarse centrándola en el punto de apoyo de la taza con la base.
- c) Moldear la masa de suelo con la espátula hasta obtener una forma uniforme evitando incorporar burbujas de aire en la mezcla.

Figura 3.19. Colocado y moldeado de la muestra



Fuente: Elaboración propia

- d) Enrasar y nivelar a 10 mm en el punto de máximo espesor y reincorporar el material excedente al plato.
- e) Dividir la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente a lo largo del diámetro que pasa por el eje de simetría de la taza, de modo que se forme una ranura clara y bien delineada de las dimensiones especificadas. Pasar el acanalador, manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza; en ningún caso, debe existir desprendimiento de la pasta del fondo de la taza; si ello ocurre, se retira todo el material y se reinicia el procedimiento. La formación de la ranura se debe lograr con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.

Figura 3.20. Conteo de golpes



Fuente: Elaboración propia

- f) Girar la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes de la ranura entren en contacto en el fondo del surco a lo largo de un tramo de 10 mm. Registrar el número de golpes obtenido (N), retirar el material que se junta en el fondo del surco y colocar en una cápsula de secado para determinar su humedad (w).

Figura 3.21. Corte y retiro del material



Fuente: Elaboración propia

g) Se debe realizar al menos 3 veces los mismos pasos a diferentes humedades se recomienda que debe estar entre los 15 a 40 golpes.

Figura 3.22. Peso de muestra húmeda y muestra seca



Fuente: Elaboración propia

### **Cálculos**

Con los valores del contenido de humedad y el número de golpes se construye un gráfico semi logarítmico, con la humedad ( $w$ ) como ordenada y el número de golpes ( $N$ ) como abscisa en escala logarítmica, luego se ajusta a una curva que relaciona estos puntos. El Límite Líquido (LL) del suelo será la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

#### **3.3.1.4. Determinación del límite plástico (ASTM D4318 AASHTO T89)**

##### **Objeto**

Este método establece el procedimiento para determinar el Límite Plástico y el Índice de Plasticidad de los suelos.

##### **Procedimiento del ensayo**

- a) Para determinar el límite plástico se debe extraer una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensayo de 200 gr. de material bajo tamiz 0,425 mm (N° 40).
- b) Agregar agua a la muestra en un plato y mezclar uniformemente hasta obtener una masa pastosa, la cual se pueda amasar hasta que no se pegue en la mano, con la mano

encima de un vidrio proceder a realizar rollitos de aproximadamente 3 mm diámetro, al llegar a este diámetro aproximado el rollito debe empezar a fisurarse, entonces se debe cortar en la parte fisurada en trozos, y no puede ser re amasado ni reconstituido. Realizar entre 3 a 5 pruebas, extrayendo de cada prueba unas 3 muestras de rollitos para pesarlos y llevarlos al horno para el secado correspondiente y determinar la humedad.

Figura 3.23. Descripción de realización del ensayo



Fuente: Elaboración propia

### Cálculos

El Límite plástico (LP) se calcula como el promedio de las determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensayo. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; cuando no se cumpla esta condición, se repite todo el ensayo.

El índice de plasticidad (IP) del suelo se determina de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP = Índice de plasticidad (%)

LL= Límite líquido (%)

LP= Límite plástico (%)

## Resultados

Tabla 3.5. Resultados correspondientes a la plasticidad de los suelos naturales

Progresivas N°	Límites de Atterberg		
	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)
2+000	20.1	14.2	6.0
2+500	20.5	15.4	5.1
3+000	31.8	17.6	14.2
3+500	36.3	18.3	18.0
4+000	24.0	15.7	8.3
4+500	29.7	17.5	12.2

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.5. Clasificación del suelo

En función a la granulometría por lavado, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad se determina la clasificación del suelo en base a dos normativas que son:

Sistema de clasificación AASTHO

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Tabla 3.6. Clasificación de los suelos según AASTHO y SUCS

Progresivas N°	Clasificación		Descripción
	ASSTHO	SUCS	
2+000	A - 4 (5)	CL-ML	Arcilla limosa arenosa
2+500	A - 4 (3)	SC - SM	Arena arcillosa-limosa con grava
3+000	A - 6 (10)	CL	Arcilla de baja plasticidad con arena
3+500	A - 6 (11)	CL	Arcilla media plasticidad con arena
4+000	A - 4 (7)	CL	Arcilla baja plasticidad arenosa
4+500	A - 6 (9)	CL	Arcilla media plasticidad

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.6. Ensayo de compactación método modificado (Método “C” ASTM D422 AASHTO T180)

#### Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar la relación entre la humedad y la densidad de un suelo, compactado en un molde normalizado, mediante un pisón de 4,5 Kg. en caída libre, desde una altura de 460 mm, con una energía específica de compactación de  $2,67 \text{ J/cm}^3$  ( $27,2 \text{ kgf cm/cm}^3$ ).

#### Material

Molde metálico de 6 pulg de diámetro

Martillo metálico de 4.5 Kg y altura de caída de 46 cm

Probeta graduada

Balanza

Horno

Regla de acero

Tamiz N° 4

Bandeja, martillo, cuchara y alicate

#### Procedimiento del ensayo

a) Se debe preparar el suelo aproximadamente 24 kg, desintegrando los terrones y grumos hasta que pase el tamiz N° 4, y desechar lo retenido en este tamiz, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad, antes de compactarlo.

Figura 3.24. Preparación de la muestra



Fuente: Elaboración propia

b) Dividir el material en cuatro partes iguales de 6000 gramos cada uno, depositar en fuentes y lavadores ya que en cada uno se incrementará agua en diferentes porciones., para esto se debe aplicar el incremento de la humedad de acuerdo al siguiente ejemplo: Siendo el contenido de humedad calculado de 2%, para llegar a 4% nos faltaría 2%, entonces, pesamos el material para el primer molde con 6000 gramos. Y asumiendo que en este peso se encontraría al 100% de agua, por lo que se trataría de 6000 cm<sup>3</sup> (ya que la densidad del agua se asume 1gr/cm<sup>3</sup> suponiendo una temperatura de 21°C), por simple regla de tres solo resta realizar la siguiente operación:

$$Ca = \frac{2\% * 6000\text{ g}}{100\%} = 120\text{ cm}^3$$

Dónde:

Ca= Cantidad de agua (cm<sup>3</sup>)

c) Se pesa el molde sin la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo, mezclando y homogeneizando la muestra, para luego introducir al molde compuesto con su extensión o collarín, cada capa de material se debe colocar aproximadamente en un quinto de la altura del molde más el collar.

Figura 3.25. Mezclado del suelo



Fuente: Elaboración propia

d) Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo se extrae una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado.

e) Posteriormente se compacta 5 capas cada una a 56 golpes, uniformemente distribuidos en el molde. Al compactar la última capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde.

Figura 3.26. Compactado



Fuente: Elaboración propia

f) Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enraza con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde sin base con el suelo compactado y enraza, registrando en la planilla de cálculos.

Figura 3.27. Peso del molde con muestra



Fuente: Elaboración propia

g) Se repite todas las operaciones anteriormente mencionadas con cada una de las fracciones restantes, hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo. El ensaye se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda al menos 4 a 5 veces.

### **Cálculos**

Fórmula para obtener la densidad húmeda del suelo compactado:

$$\gamma_h = \frac{m}{v}$$

Dónde:

h= Densidad húmeda del suelo compactada (Kg/m<sup>3</sup>)

m= Peso de suelo húmedo (Kg)

v= Volumen del molde (m<sup>3</sup>)

### **Densidad seca**

La densidad seca del suelo compactado para cada determinación, de acuerdo con la fórmula siguiente, aproximando a 10 Kg/m<sup>3</sup>.

$$\gamma_{max} = \frac{10 * \gamma_h}{w + 100}$$

Dónde:

max= Densidad seca del suelo compactado (kg/m<sup>3</sup>)

h= Densidad húmeda del suelo compactada (kg/m<sup>3</sup>)

W=Humedad del suelo compactado (%)

Para obtener la humedad óptima que será donde se dé la máxima densidad de compactación se grafica la curva de densidades en el eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas, para obtener una ecuación polinómica y de esta manera determinar estos dos datos importantes que nos servirán para realizar el ensayo de CBR.

## Resultados

Tabla 3.7. Resultados de compactación del suelo natural

Progresivas N°	Proctor T-180 modificado	
	Densidad máxima del suelo seco (Kg/m <sup>3</sup> )	Humedad óptima (%)
2+000	1930	11.0
2+500	1940	9.1
3+000	1886	14.3
3+500	1813	14.5
4+000	1921	11.9
4+500	1899	13.1

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.7. Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

#### Objeto

Este método establece el procedimiento para determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). El ensayo se realiza normalmente a suelos compactados en laboratorio, con la humedad óptima y niveles de energía variables.

Este método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, como también de materiales empleados en la construcción de terraplenes, subbases, bases y capas de rodadura granulares.

#### Procedimiento del ensayo

- Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de Proctor, se compacta 3 moldes o probetas en un rango de 95% de la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.
- Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo por ensayar. Agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado

homogéneo del suelo, se extrae una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.

Figura 3.28. Preparación de material para CBR y muestras para contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

- c) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro grueso sobre el espaciador.
- d) Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas igual al de las probetas usadas en el ensayo de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de 12, 25 y 56 golpes.
- e) Luego se retira el collar, y se enrasa cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde del molde. Rellenar con material fino bajo 5 mm cualquier hueco que pueda haber quedado en la superficie.
- f) Posteriormente se saca el disco espaciador y sobre la placa base perforada se coloca papel filtro grueso, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo compactado en contacto con el papel filtro y pesar.
- g) Finalmente colocar el vástago ajustable sobre el molde de muestra compactada y se acomoda el aparato de expansión (extensómetro) a cada uno de los moldes, nivelando a un valor de cero en el trípode de extensómetro para poder controlar la expansión que sufrirá el suelo durante el tiempo de inmersión.

h) Dejar sumergidas durante 96 horas los moldes. Durante este período se debe mantener la muestra sumergida a un nivel de agua constante, sin producir vibraciones que puedan alterar las mediciones de expansión.

i) Una vez concluido el tiempo de inmersión se retira los moldes del agua dejando drenar la probeta, para esto se procedió a inclinarlas para eliminar el agua superficial durante 15 min.

j) Retirar las cargas para pesar el molde con el suelo compactado después de la inmersión.

Figura 3.29. Procedimiento de inmersión



Fuente: Elaboración propia

## Penetración

k) Aplicar la carga en el pistón de penetración. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0.025; 0.050; 0.075; 0.100; 0.150; 0.200; 0.300; 0.400; 0.500 pulg. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce. El ensayo debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 0,300pulgadas.

Figura 3.30. Procedimiento de rotura de CBR



Fuente: Elaboración propia

## Resultados

Tabla 3.8. Resultados de CBR de los suelos naturales

Muestra N°	C.B.R. (%)	Expansión (%)
2+000	4.4	2.9
2+500	5.7	2.5
3+000	2.6	3.8
3+500	2.4	3.9
4+000	4.1	3.1
4+500	2.6	3.6

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### 3.3.1.8. Resumen de resultados

<b>Resumen de la caracterización de los suelos naturales</b>
--

Tabla 3.9. Resumen de la caracterización de los suelos naturales

Prog.	Contenido Humedad	Granulometría				Límites			Clasificación		
		No	W%	%Pasa No 4	% Pasa No 10	% Pasa No 40	% Pasa No 200	LL	LP	IP	SUCS
2+000	3.23	100.0	93.8	82.9	58.2	20.1	14.2	6.0	CL-ML	A-4	5
2+500	2.92	82.1	78.7	73.2	48.8	20.5	15.4	5.1	SC-SM	A-4	3
3+000	5.15	100.0	98.9	96.2	83.7	31.8	17.6	14.2	CL	A-6	10
3+500	4.53	100.0	99.8	99.4	72.7	36.3	18.3	18.0	CL	A-6	11
4+000	5.23	100.0	97.0	90.0	68.6	24.0	15.7	8.3	CL	A-4	7
4+500	4.88	100	99.9	99.5	89.0	29.7	17.5	12.2	CL	A-6	9

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

Tabla 3.10. Resumen de la caracterización de los suelos naturales (Proctor y CBR)

Prog.	Proctor T-180 modificado método		Expansión	C.B.R. al 95%
	Densidad. Max. al 95% (Kg/m <sup>3</sup> )	H. OP. (%)		
2+000	1930	11.0	2.9	4.4
2+500	1940	9.1	2.5	5.7
3+000	1886	14.3	3.8	2.6
3+500	1813	14.5	3.9	2.4
4+000	1921	11.9	3.1	4.1
4+500	1899	13.1	3.6	2.6

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo II

### **3.4. ESTUDIO DE SUELO – ADITIVO TERRASIL**

#### **3.4.1. Enfoque general**

Una vez determinado todas las características de los suelos naturales, se desarrolla el estudio de la mezcla "suelo Terrasil" el cual es analizado a partir de los ensayos de compactación, humedad, Razón Soporte de California (CBR).

Por lo tanto lo que se busca es mejorar ciertas propiedades de la subrasante mejor compactación lograr compactaciones dentro de la norma con menos pasadas mejorando el manejo del suelo para rangos más amplios de humeada óptima de compactación, reducción de expansividad reteniendo finos a largo plazo lo que produce menos grietas y baches, en dosis adecuadas puede incrementar los valores de CBR.

Para esto se someterá a cada muestra con 6 diferentes dosificaciones de terrasil para determinar cómo varia su evolución entre una y otra prueba y con el análisis de todas las mezclas realizadas determinar un valor óptimo.

#### **3.4.2. Dosificación**

La finalidad de la dosificación es determinar la cantidad de Terrasil capaz de garantizar una mezcla con permanencia de sus características mejoradas.

Según la teoría la dosificación mezclada para el suelo-Terrasil es de los rangos de  $0.2 - 2 \text{ kg/m}^3$  de Terrasil por lo tanto, de acuerdo a esta base teórica se elige los rangos para el estudio a lo que se quiere hacer en este proyecto.

Se propone una dosificación experimental en donde se utiliza varios contenidos de Terrasil para la preparación de las mezclas, para posteriormente someterlas a ensayos de compactación y CBR.

Entonces la dosificación propuesta son 6 dosificaciones diferentes de Terrasil que serán aplicadas a cada una de las muestras. Las dosificaciones están referidas siempre al peso del suelo seco, y son los siguientes:

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil utilizado	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
--------------------------------------	-----	-----	------	-----	-----	-----

#### **3.4.3. Preparación de mezclas de prueba variando dosificaciones de Terrasil**

Después de haber obtenido los resultados de la caracterización de los suelos naturales se procederá a la mezcla del suelo con el terrasil en dosificaciones de **(0.2 kg/m<sup>3</sup> - 2.5**

kg/m<sup>3</sup>), luego del mezclado se realiza los mismos ensayos que se ejecutaron en la caracterización de los suelos naturales, donde se obtendrá resultados que posteriormente serán analizados.

Tabla 3.11. Distribución de dosificaciones en cada muestra

Progresivas N°	Dosificaciones del Terrasil (Kg/m <sup>3</sup> )					
	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
2+000	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
2+500	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
3+000	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
3+500	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
4+000	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
4+500	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5

Fuente: Elaboración propia

Para la preparación de la mezcla suelo-Terrasil, es necesario que el suelo se encuentre suelto y pase por los tamices especificados para cada ensayo, es importante conocer el contenido de humedad la que se encuentra el suelo antes de la adición del Terrasil, esto puede conocerse por diferentes métodos, otra opción es que el suelo se lo deje secar al horno, pero no es muy recomendable dejarlo más de 24 horas, esto porque el suelo puede sufrir algunas alteraciones al entrar en calor, por lo que se trabajó a partir del contenido de humedad a la que se encontraba el suelo. Para el cálculo del agua de compactación necesaria a colocarse, depende de la humedad óptima de compactación que se obtiene a través de un ensayo Proctor. En ese volumen de agua calculada se colocara el estabilizador Terrasil de acuerdo a la cantidad de agua debidamente calculada.

Figura 3.31. Mezcla de suelo con Terrasil



Fuente: Elaboración propia

Las siguientes formulas indican el procedimiento para obtener la cantidad de Terrasil de acuerdo al peso de suelo seco.

### Calculo del estabilizador Terrasil

Se tomara como base la cantidad de suelo de la subrasante necesaria para el ensayo del Proctor que son 6 kg, por lo tanto para este peso se realizara el siguiente cálculo:

$$\text{Densidad maxima seca de suelo} = 1930 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen de suelo} = \frac{6.0 \text{ kg}}{1930 \text{ kg/m}^3} = 0.0031 \text{ m}^3$$

$$\text{Terrasil} = 0.0031 \text{ m}^3 * 0.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1000 = 1.55 \text{ gr}$$

### 3.4.4. Evaluación del suelo - Terrasil

La evaluación al suelo-terrasil se lo realiza en base a los siguientes ensayos:

Tabla 3.12. Ensayos realizados para suelo Terrasil

Ensayo	Normativa
Contenido de humedad	ASTM D2216
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422 AASHTO T88
Determinación del límite líquido	ASTM D4318 AASHTO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318 AASHTO T90
Ensayo de compactación método Proctor modificado.	(ASTM D422 AASHTO T180)
Determinación de la relación de soporte del suelo en laboratorio (CBR de laboratorio)	ASTM D1883 AASHTO T193

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.4.1 Caracterización del suelo-Terrasil

La caracterización en base a límite líquido, límite plástico, granulometría y compactación tiene el mismo procedimiento que se dio a conocer en parte de caracterización de los suelos naturales. Por lo tanto para no ser repetitivos en este subtítulo se explica la elaboración de la práctica en función a los cuadros siguientes:

Figura 3.32. Práctica de granulometría del suelo-Terrasil ASTM D422 AASHTO T88



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33. Practica de límites del suelo-Terrasil (ASTM D4318 AASHTO T89, AASHTO T90)



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34. Práctica de compactación del suelo-Terrasil (ASTD 422 AASHTO T180)



Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.4.2. Determinación de la relación de soporte del suelo-Terrasil (CBR de laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193).

Para determinar el CBR del suelo-Terrasil se realiza después de la compactación de los 3 moldes de 56, 25 y 12 golpes, se dejó los moldes en proceso de curado del material tratado con terrasil para que este reaccione, durante 7 días en la intemperie.

##### Procedimiento del ensayo

a) Con la dosificación establecida de  $0.2 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.5 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.75 \text{ kg/m}^3$ ,  $1.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $2.0 \text{ kg/m}^3$ ,  $2.5 \text{ kg/m}^3$  se prepara el material para cada tipo de suelo, calculando la cantidad de Terrasil y suelo que se necesita en cada ensayo.

Figura 3.35. Proporción de Terrasil en la mezcla



Fuente: Elaboración propia

b) Con el contenido óptimo de humedad y la densidad seca máxima compactada de acuerdo al ensayo de Proctor, se compacta 3 moldes o probetas a la densidad máxima compactada seca determinada anteriormente.

c) Se mezcla homogéneamente con agua cada una de las tres muestras de suelo-Terrasil por ensayar. Agregando la cantidad de agua necesaria para alcanzar la humedad óptima

determinada en “Relación humedad-densidad”. Una vez logrado el mezclado homogéneo del suelo-Terrasil, se extrae una muestra del suelo para determinar el contenido de humedad real en el momento de compactado del CBR.

Figura 3.36. Preparación de suelo-Terrasil para CBR y muestras para contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

- d) Para cada molde se coloca el disco espaciador sobre la placa base. Fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro sobre el espaciador.
- e) Compactar cada una de las porciones de suelo-Terrasil húmedo en el molde, en un número de 5 capas. Cada probeta se debe compactar con distinta energía, de 12, 25 y 56 golpes. Luego se retira el collar, y se enrasa cuidadosamente el suelo compactado con una regla al nivel del borde del molde.
- f) Posteriormente se saca el disco espaciador y sobre la base perforada se coloca papel filtro, invertir el molde y fijarlo a dicha placa, con el suelo-cemento compactado en contacto con el papel filtro y pesar.

Figura 3.37. Compactación del suelo-Terrasil con diferentes energías

Muestra de suelo-Terrasil compactada



Fuente: Elaboración propia

### Penetración

g) Aplicar la carga en el pistón de penetración. Anotar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración: 0,64; 1,27; 1,91; 2,54; 3,18; 3,81; 4,45; 5,08; 7,62; 10,16 y 12,7 mm. Anotar la carga máxima alcanzada, registrando la penetración a la que se produce. El ensayo debe realizarse hasta alcanzar una penetración mínima de 7,62 mm (0,300 pulgadas).

### 3.4.5. Resultados de los ensayos de suelo-Terrasil

#### Resultados de la muestra N° 1 progresiva 2+000

#### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.13. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil muestra N° 1

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación	
					ASSTHO	SUCS
0.2	20.0	14.3	5.7	5	A-4	CL-ML
0.5	19.4	14.3	5.1	5	A-4	CL-ML
0.75	18.2	14.6	3.6	5	A-4	ML
1.0	17.0	14.1	2.9	5	A-4	ML
2.0	16.5	NP	0	4	A-4	ML
2.5	16.0	NP	0	5	A-4	ML

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

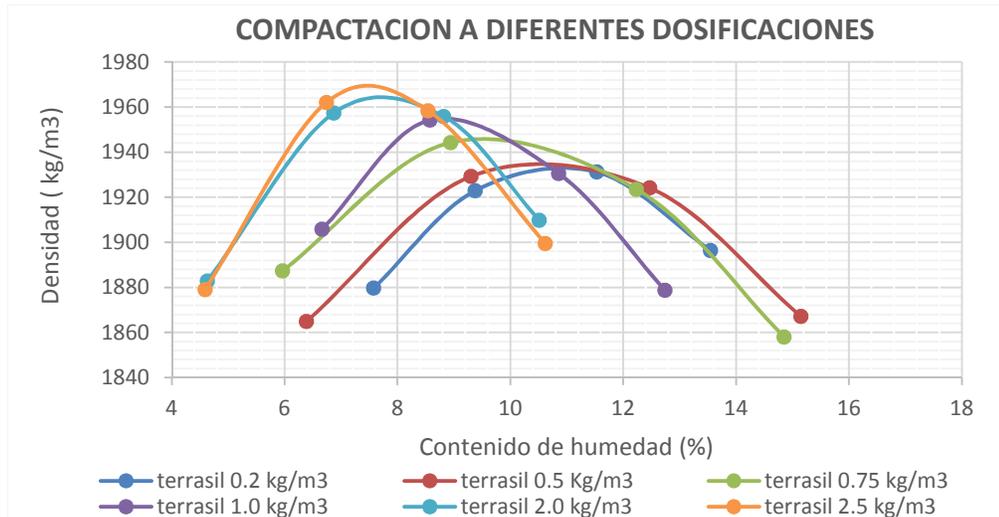
## Compactación

Tabla 3.14. Resultados de compactación con Terrasil muestra N° 1

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.2	10.8	1934
0.5	10.6	1935
0.75	9.6	1948
1.0	8.8	1955
2.0	7.8	1964
2.5	7.5	1967

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.7. Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 Kg/m<sup>3</sup> muestra N° 1



Fuente: Elaboración propia

## CBR y expansión

Tabla 3.15. Resultados de CBR y expansión con Terrasil

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	5.0	2.82
0.5	6.5	2.7
0.75	9.2	1.9
1.0	11.2	1.5
2.0	14.5	1.4
2.5	15.3	1.0

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

## Resultados de la muestra N° 2 progresiva 2+500

### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.16. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación	
					ASSTHO	SUCS
0.2	20.9	16	4.8	1	A-4	SC-SM
0.5	19.3	15.6	3.8	3	A-4	SM
0.75	19.0	16.2	2.8	3	A-4	SM
1.0	18.3	16.3	2.0	3	A-4	SM
2.0	17.1	NP	0.0	3	A-4	SM
2.5	16.6	NP	0.0	2	A-4	SM

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### Compactación

Tabla 3.17. Resultados de compactación con Terrasil

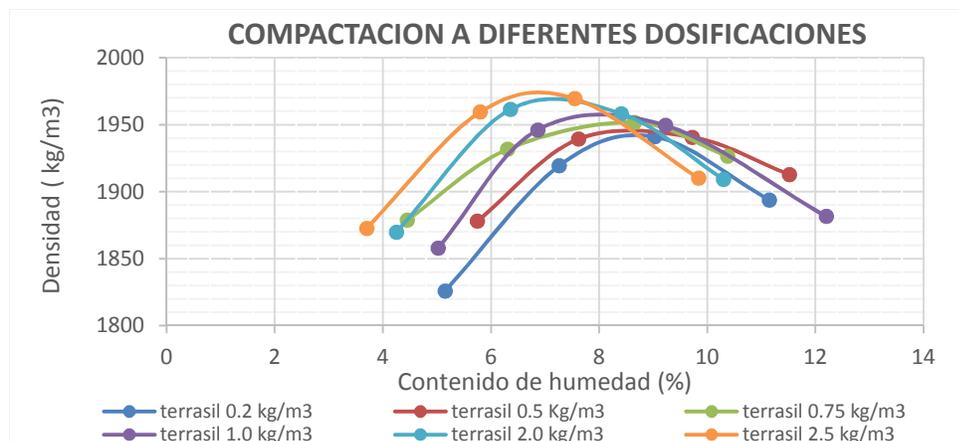
Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Humedad óptima (%)	Densidad máx. (kg/m <sup>3</sup> )
0.2	8.9	1941
0.5	8.7	1947
0.75	8.3	1952
1.0	8.0	1960
2.0	7.2	1969
2.5	7.0	1972

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

Gráfico 3.8. Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5

Kg/m<sup>3</sup> muestra N° 2



Fuente: Elaboración Propia

## CBR y expansión

Tabla 3.18. Resultados de CBR y expansión con Terrasil muestra N° 2

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	6.0	2.4
0.5	7.1	2.2
0.75	10.7	1.6
1.0	14.2	1.2
2.0	17.0	0.9
2.5	18.9	0.6

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

## Resultados de la muestra N° 3 progresiva 3 + 000

### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.19. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil muestra N° 3

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Límite líquido</b>	<b>Límite plástico</b>	<b>Índice plasticidad</b>	<b>Índice de grupo</b>	<b>Clasificación</b>	
					<b>ASSTHO</b>	<b>SUCS</b>
0.2	30.7	18.7	12.0	9	A-6	CL
0.5	30.1	16.5	13.6	10	A-6	CL
0.75	29.7	16.8	12.8	9	A-6	CL
1.0	28.1	16.1	12.0	9	A-6	CL
2.0	27.0	15.4	11.6	9	A-6	CL
2.5	26.8	15.6	11.2	8	A-6	CL

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### Compactación

Tabla 3.20. Resultados de compactación con Terrasil muestra N° 3

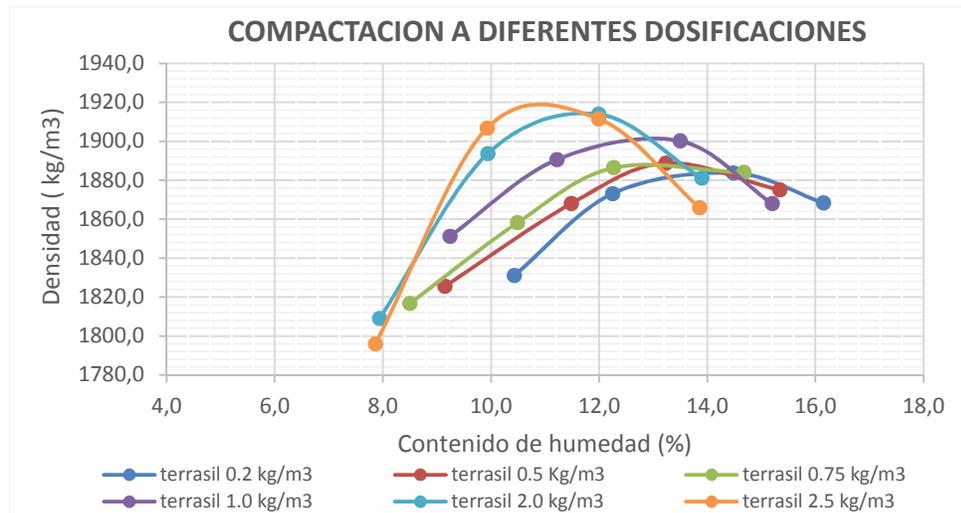
<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.2	14.0	1885
0.5	13.8	1888
0.75	13.4	1894
1.0	12.8	1902
2.0	11.6	1915
2.5	11.0	1919

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

Gráfico 3.9. Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5

Kg/m<sup>3</sup> muestra N° 3



Fuente: Elaboración propia

### CBR y expansión

Tabla 3.21. Resultados de CBR y expansión con Terrasil muestra N° 3

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	3.0	3.6
0.5	3.2	3.4
0.75	4.1	2.9
1.0	5.7	2.5
2.0	6.5	2.2
2.5	7.1	1.9

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

## Resultados de la muestra N° 4 progresiva 3 + 500

### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.22. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil muestra N° 4

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación	
					ASSTHO	SUCS
0.2	36.8	19.0	17.9	11	A-6	CL
0.5	37.2	20.2	17.0	10	A-6	CL
0.75	35.8	19.2	16.6	10	A-6	CL
1.0	34.6	19.5	15.2	10	A-6	CL
2.0	35.1	20.4	14.7	10	A-6	CL
2.5	34.8	20.6	14.2	9	A-6	CL

Fuente: Elaboración propia

Ver Planilla en anexo III

### Compactación

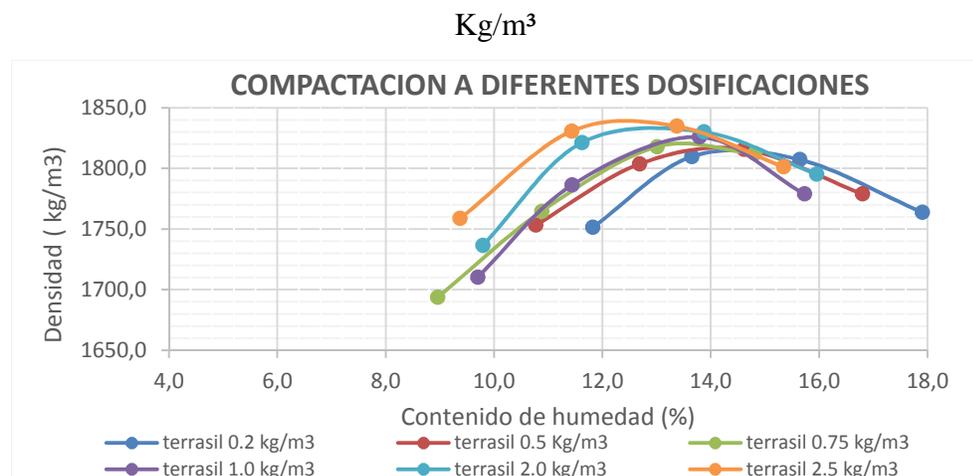
Tabla 3.23. Resultados de compactación con Terrasil

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Humedad óptima (%)	Densidad máx. (kg/m <sup>3</sup> )
0.2	14.5	1815
0.5	14.2	1819
0.75	13.8	1823
1.0	13.5	1827
2.0	12.9	1836
2.5	12.5	1839

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

Gráfico 3.10. Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5



Fuente: Elaboración propia

### CBR y expansión

Tabla 3.24. Resultados de CBR y expansión con Terrasil progresiva muestra N° 4

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	2.7	3.52
0.5	3.2	3.4
0.75	3.7	3.0
1.0	5.5	2.6
2.0	6.2	2.35
2.5	6.7	2.15

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### Resultados de la muestra N° 5 progresiva 4+000

#### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.25. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil muestra N° 5

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Límite líquido</b>	<b>Límite plástico</b>	<b>Índice plasticidad</b>	<b>Índice de grupo</b>	<b>Clasificación</b>	
					<b>ASSTHO</b>	<b>SUCS</b>
0.2	23.0	15.0	8.0	7	A-4	CL
0.5	20.9	14.3	6.6	7	A-4	CL-ML
0.75	19.5	14.1	5.4	7	A-4	CL-ML
1.0	19.1	15.1	3.9	7	A-4	ML
2.0	18.4	15.4	3.0	7	A-4	ML
2.5	18.0	NP	0.0	7	A-4	ML

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### Compactación

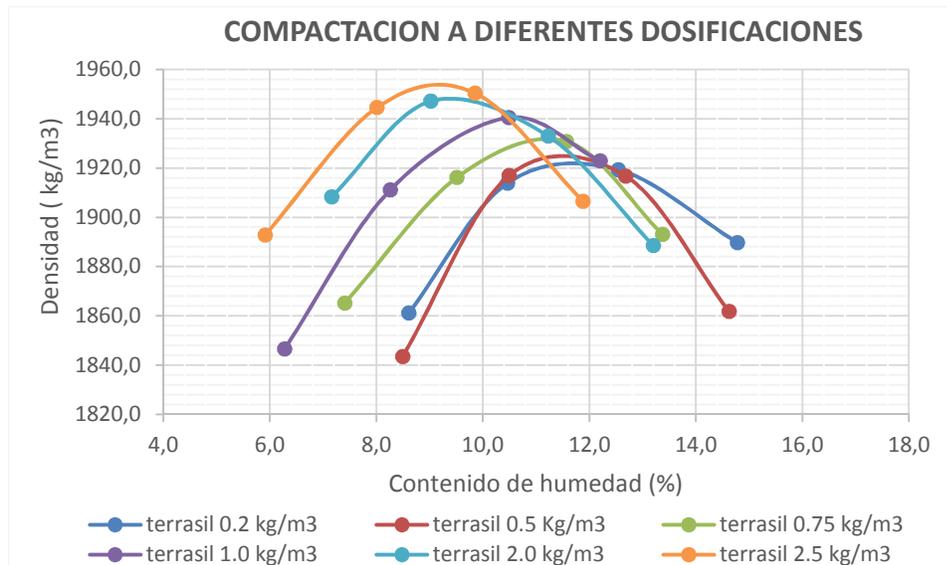
Tabla 3.26. Resultados de compactación con Terrasil muestra N° 5

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.2	11.7	1922
0.5	11.6	1926
0.75	11.2	1931
1.0	10.6	1940
2.0	9.5	1949
2.5	9.2	1953

Fuente: Elaboración propia

Ver Planilla en anexo III

Gráfico 3.11. Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 Kg/m<sup>3</sup> muestra N°5



Fuente: Elaboración propia

### CBR y expansión

Tabla 3.27. Resultados de CBR y expansión con Terrasil muestra N° 5

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	CBR (%)	Expansión (%)
0.2	4.7	2.90
0.5	6.0	2.7
0.75	8.6	2.0
1.0	10.1	1.6
2.0	13.6	1.40
2.5	14.5	1.20

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

## Resultados de la muestra N° 6 progresiva 4+500

### Clasificación de suelo con Terrasil

Tabla 3.28. Resultados de clasificación del suelo con Terrasil muestra N° 6

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Límite líquido	Límite plástico	Índice plasticidad	Índice de grupo	Clasificación	
					ASSTHO	SUCS
0.2	30.6	18.6	12.0	9	A-6	CL
0.5	28.8	17.1	11.7	9	A-6	CL
0.75	26.7	16.8	9.9	8	A-4	CL
1.0	27.0	18.2	8.8	8	A-4	CL
2.0	27.1	18.9	8.2	8	A-4	CL
2.5	26.6	15.4	11.2	8	A-6	CL

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### Compactación

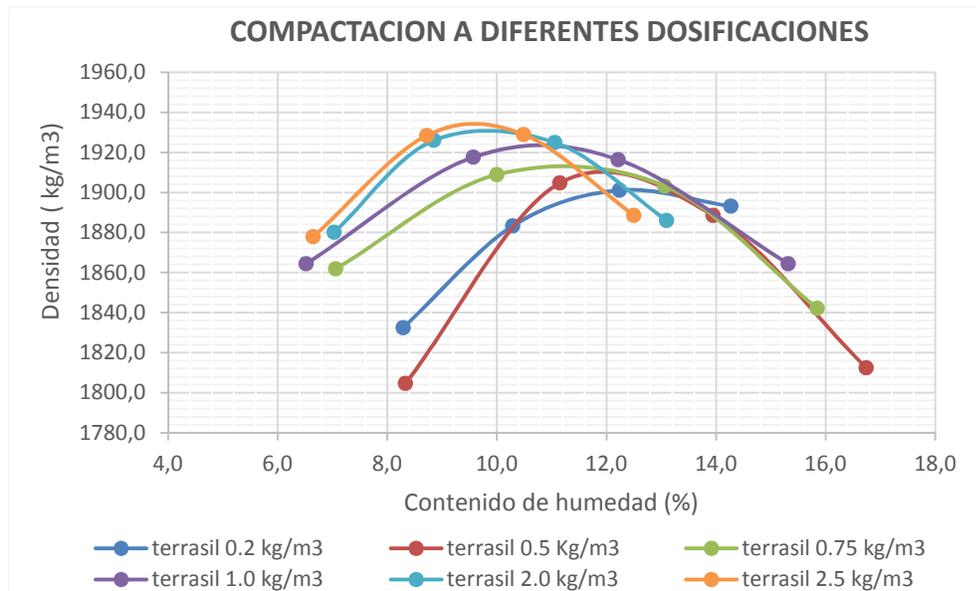
Tabla 3.29. Resultados de compactación con Terrasil progresiva 4 + 500

Kg/m <sup>3</sup> Terrasil	Humedad óptima (%)	Densidad máx. (kg/m <sup>3</sup> )
0.2	12.6	1902
0.5	11.9	1909
0.75	11.2	1914
1.0	10.7	1922
2.0	9.9	1932
2.5	9.6	1933

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

Gráfico 3.12 Curvas de compactación con dosificaciones de 0.2, 0.5, 0.75, 1.0, 2.0, 2.5 Kg/m<sup>3</sup> muestra N° 6



Fuente: Elaboración propia

### CBR y expansión

Tabla 3.30. Resultados de CBR y expansión con Terrasil progresiva 4 + 500

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	3.1	3.5
0.5	4.1	3.3
0.75	4.9	2.8
1.0	6.2	2.3
2.0	7.4	2.0
2.5	7.9	1.8

Fuente: Elaboración propia

Ver planilla en anexo III

### 3.4.6. Análisis de resultados de las mezclas de suelo -Terrasil

#### 3.4.6.1. Plasticidad

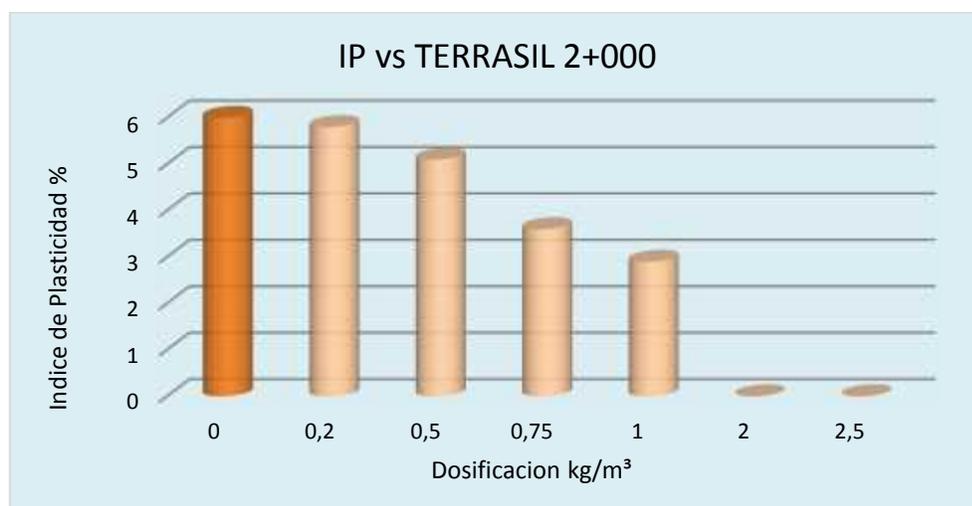
Tabla 3.31. Índice de plasticidad suelo-Terrasil

Índice de plasticidad									
Muestra	Progresiva N°	Tipo de suelo	Dosificación Terrasil kg/m <sup>3</sup>						
			0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
1	2+000	A-4(5)	6.0	5.8	5.1	3.6	2.9	NP	NP
2	2+500	A-4(3)	5.1	4.8	3.8	2.8	2.0	NP	NP
3	3+000	A-6(10)	14.2	14.0	13.6	12.8	12.0	11.5	11.2
4	3+500	A-6(11)	18.2	17.9	17.0	16.6	15.2	14.7	14.2
5	4+000	A-4(7)	8.3	8.0	6.6	5.4	3.9	3.0	NP
6	4+500	A-6(9)	12.2	12.0	11.7	9.9	8.8	8.2	7.8

Fuente: Elaboración propia

#### Muestra N° 1 “suelo A - 4 (5)”

Gráfico 3.13. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



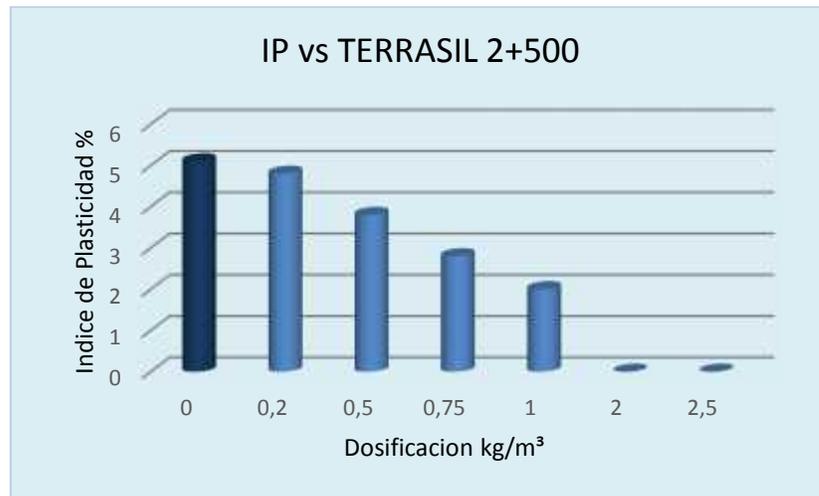
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 3.13 de barras se observa que está en función del índice de plasticidad (%) y la dosificación de Terrasil que a medida que aumenta la cantidad de Terrasil la plasticidad va disminuyendo entre 15% a 57% respecto al suelo natural. Estos resultados significarían a menor índice de plasticidad mayor CBR y menor expansión ayudando menor comportamiento de la subrasante en campo.

El índice de plasticidad de las dosificaciones de terrasil de 0.2 ,0.5 ,0.75, 1.0 ,2.0 y 2.5 kg/m<sup>3</sup> cumplen con el valor fijado por norma (IP 6) para una subrasante.

## Muestra N° 2 “suelo A - 4 (3)”

Gráfico 3.14. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



Fuente: Elaboración propia

Se observa en esta grafica 3.14 que a medida que aumenta la cantidad de Terrasil la plasticidad va disminuyendo entre 25% a 61% respecto al suelo natural.

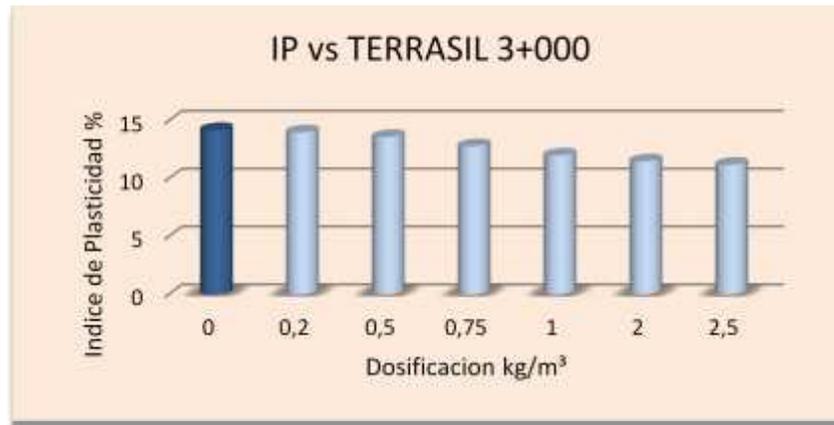
Estos resultados significarían a menor índice de plasticidad mayor CBR y menor expansión ayudando menor comportamiento de la subrasante en campo.

Se tiene una buena variación en cuanto a reducciones del índice de plasticidad frente al suelo natural tanto como para 0.2 ,0.5, 0.75 ,1.0 ,2.0 y 2.5 kg/m<sup>3</sup>.

Teniendo un mejor comportamiento con la dosificación de 1.0 y 2.0 kg/m<sup>3</sup> cumpliendo con los valores fijados en norma para una subrasante. En el estudio también se tomó en cuenta la dosificación de 2.5 kg/m<sup>3</sup> saliendo de los rangos de las especificaciones del producto terrasil llegando un resultado óptimo NP comportamiento muy bueno para la subrasante menos expansión y mal alto CBR, pero antieconómico ya que con dosificaciones menores cumple con las normas para una subrasante.

### Muestra N° 3 “suelo A – 6 (10)”

Gráfico 3.15. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



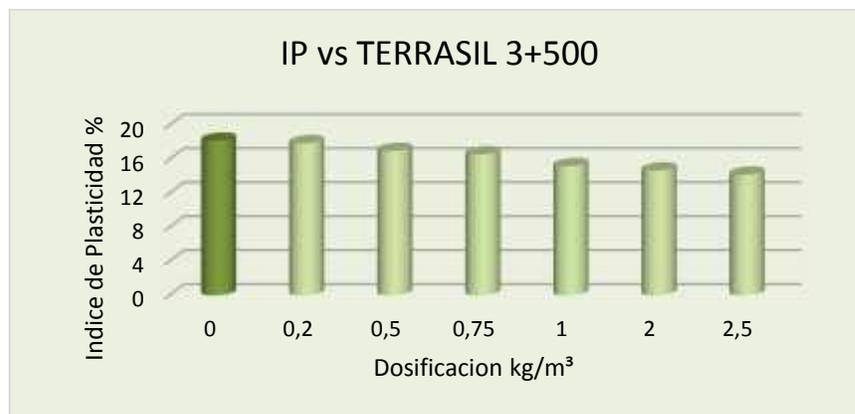
Fuente: Elaboración propia

En base a esta gráfica 3.15 de barras compuesto por el índice de plasticidad en (%) y la dosificación de Terrasil se observa que el índice de plasticidad disminuye entre 2 % al 21 % respecto al suelo natural.

A pesar que presenta una buena dosificación no es suficiente y no cumple con el valor especificado por normativa para una subrasante (IP 6).

### Muestra N° 4 “suelo A - 6 (11)”

Gráfico 3.16. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



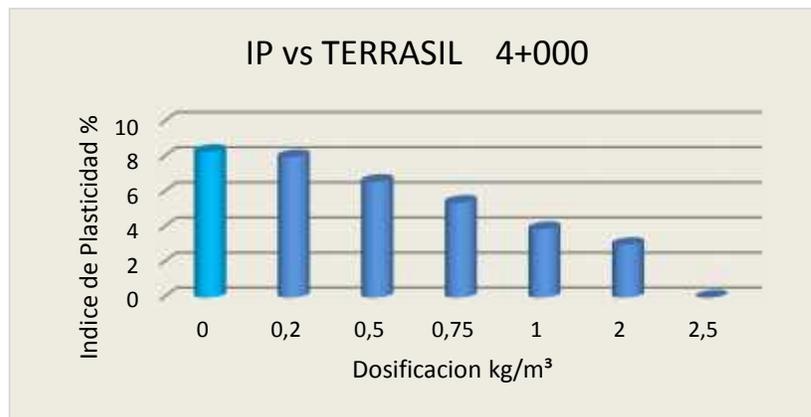
Fuente: Elaboración propia

Se observa en la gráfica 3.16 de barras compuesto por el índice de plasticidad en (%) y la dosificación de Terrasil que el índice de plasticidad disminuye entre 2% a 22% respecto al suelo natural.

A pesar que presenta una buena dosificación no es suficiente y no cumple con el valor especificado por normativa para una subrasante (IP 6).

**Muestra N° 5 “suelo A - 4 (7)”**

Gráfico 3.17. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



Fuente: Elaboración propia

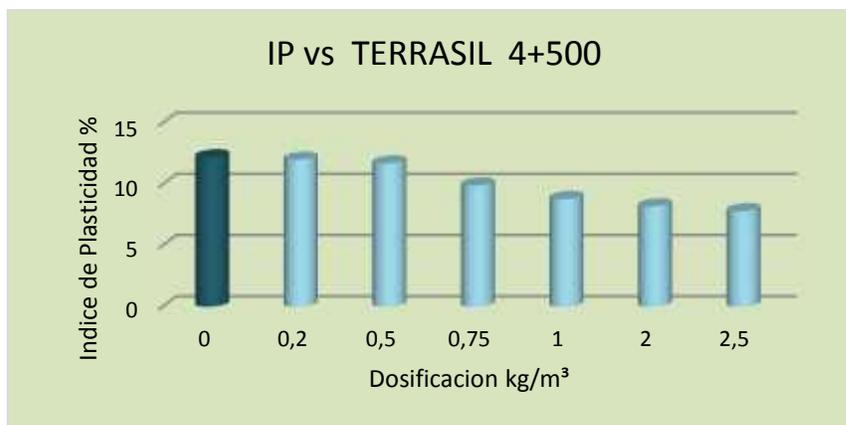
De acuerdo a la gráfica 3.17 de barras se observa que está en función del índice de plasticidad (%) y la dosificación de Terrasil que a medida que aumenta la cantidad de Terrasil la plasticidad va disminuyendo entre 19% a 48% respecto al suelo natural.

Estos resultados significarían a menor índice de plasticidad mayor CBR y menor expansión ayudando menor comportamiento de la subrasante en campo.

El índice de plasticidad de las dosificaciones de terrasil de 0.75 y 1.0 kg/m<sup>3</sup> cumplen con el valor fijado por norma (IP 6) para una subrasante.

**Muestra N° 6 “suelo A - 6 (9)”**

Gráfico 3.18. Índice de plasticidad vs Dosificación Terrasil



Fuente: Elaboración propia

Se observa en la gráfica 3.18 de barras compuesto por el índice de plasticidad en (%) y la dosificación de Terrasil que el índice de plasticidad disminuye entre 2% a 36% respecto al suelo natural.

A pesar que presenta una buena dosificación no es suficiente y no cumple con el valor especificado por normativa para una subrasante (IP 6).

#### **3.4.6.2. Clasificación**

En la clasificación de los suelos al aumentar mayor cantidad de aditivo terrasil a la muestra, hace que esta reaccione mejorando granulometría, plasticidad, lo cual repercute en la disminución del índice de grupo. Todas estas variables que sufren un cambio hacen que la muestra de suelo natural mezclado con aditivo terrasil mejore su clasificación.

Demostrando que la muestra N° 1 de A-4(5) CL-ML arcilla limo arenosa a un A-4(5) ML limo baja plasticidad arenosa a mayor cantidad de terrasil disminuye el índice de plasticidad mejorando el tipo de suelo. En la muestra N° 2 de A-4(3) SC-SM arena arcillosa-limosa con grava a un A-4(3) SM arena limosa con grava a mayor cantidad de Terrasil disminuye el índice de plasticidad mejorando el tipo de suelo teniendo un mejor comportamiento en campo.

En la muestra N° 6 de A-6 (9) CL arcilla media plasticidad a un A-4(8) CL arcilla baja plasticidad en esta muestra se nota el mejoramiento de la clasificación pero índice de plasticidad sigue bajo para cumplir con norma para una subrasante.

A continuación se presenta la siguiente tabla para una mejor observación de lo que pasa con cada uno de los suelos:

Tabla 3.32. Tabla de clasificación de la mezcla suelo-Terrasil

	L.L.	L.P.	I.P.	Clasificación	
				ASSTHO	SUCS
Muestra 1					
0	20.1	14.2	6.0	A-4 (5)	CL-ML
0.2 kg/m <sup>3</sup>	20.0	14.3	5.7	A-4 (5)	CL-ML
0.5 kg/m <sup>3</sup>	19.4	14.3	5.1	A-4 (5)	CL-ML
0.75 kg/m <sup>3</sup>	18.2	14.6	3.6	A-4 (5)	ML
1.0 kg/m <sup>3</sup>	17.9	14.1	2.9	A-4 (5)	ML
2.0 kg/m <sup>3</sup>	16.5	NP	0	A-4 (4)	ML
2.5 kg/m <sup>3</sup>	16.0	NP	0	A-4 (5)	ML
Muestra 2					
0	20.5	15.4	5.1	A-4 (3)	SC-SM
0.2 kg/m <sup>3</sup>	20.9	16	4.8	A-4 (1)	SC-SM
0.5 kg/m <sup>3</sup>	19.3	15.6	3.8	A-4 (3)	SM
0.75 kg/m <sup>3</sup>	19.0	16.2	2.8	A-4 (3)	SM
1.0 kg/m <sup>3</sup>	18.3	16.3	2.0	A-4 (3)	SM
2.0 kg/m <sup>3</sup>	17.1	NP	0.0	A-4 (3)	SM
2.5 kg/m <sup>3</sup>	16.6	NP	0.0	A-4 (2)	SM
Muestra 3					
0	31.8	17.6	14.21	A-6(10)	CL
0.2 kg/m <sup>3</sup>	30.7	18.7	12.0	A-6(9)	CL
0.5 kg/m <sup>3</sup>	30.1	16.5	13.6	A-6(10)	CL
0.75 kg/m <sup>3</sup>	29.7	16.8	12.8	A-6(9)	CL
1.0 kg/m <sup>3</sup>	28.1	16.1	12.0	A-6(9)	CL
2.0 kg/m <sup>3</sup>	27.0	15.4	11.6	A-6(9)	CL
2.5 kg/m <sup>3</sup>	26.8	15.6	11.2	A-6(8)	CL
Muestra 4					
0	36.3	18.3	18.0	A-6(11)	CL
0.2 kg/m <sup>3</sup>	36.8	19.0	17.9	A-6(11)	CL
0.5 kg/m <sup>3</sup>	37.2	20.2	17.0	A-6(10)	CL
0.75 kg/m <sup>3</sup>	35.8	19.2	16.6	A-6(10)	CL
1.0 kg/m <sup>3</sup>	34.6	19.5	15.2	A-6(10)	CL
2.0 kg/m <sup>3</sup>	35.1	20.4	14.7	A-6(10)	CL
2.5 kg/m <sup>3</sup>	34.8	20.6	14.2	A-6(9)	CL
Muestra 5					
0	24.0	15.7	8.3	A-4(7)	CL
0.2 kg/m <sup>3</sup>	23.0	15.0	8.0	A-4(7)	CL
0.5 kg/m <sup>3</sup>	20.9	14.3	6.6	A-4(7)	CL-ML
0.75 kg/m <sup>3</sup>	19.5	14.1	5.4	A-4(7)	CL-ML
1.0 kg/m <sup>3</sup>	19.1	15.1	3.9	A-4(7)	ML
2.0 kg/m <sup>3</sup>	18.4	15.4	3.0	A-4(7)	ML
2.5 kg/m <sup>3</sup>	18.0	NP	0	A-4(7)	ML
Muestra 6					
0	29.7	17.5	12.2	A-6(9)	CL
0.2 kg/m <sup>3</sup>	30.6	18.6	12.0	A-6(9)	CL
0.5 kg/m <sup>3</sup>	28.8	17.1	11.7	A-6(9)	CL
0.75 kg/m <sup>3</sup>	26.7	16.8	9.9	A-4(8)	CL
1.0 kg/m <sup>3</sup>	27.0	18.2	8.8	A-4(8)	CL
2.0 kg/m <sup>3</sup>	27.1	18.9	8.2	A-4(8)	CL
2.5 kg/m <sup>3</sup>	26.6	15.4	11.2	A-4(6)	CL

Fuente: Elaboración propia

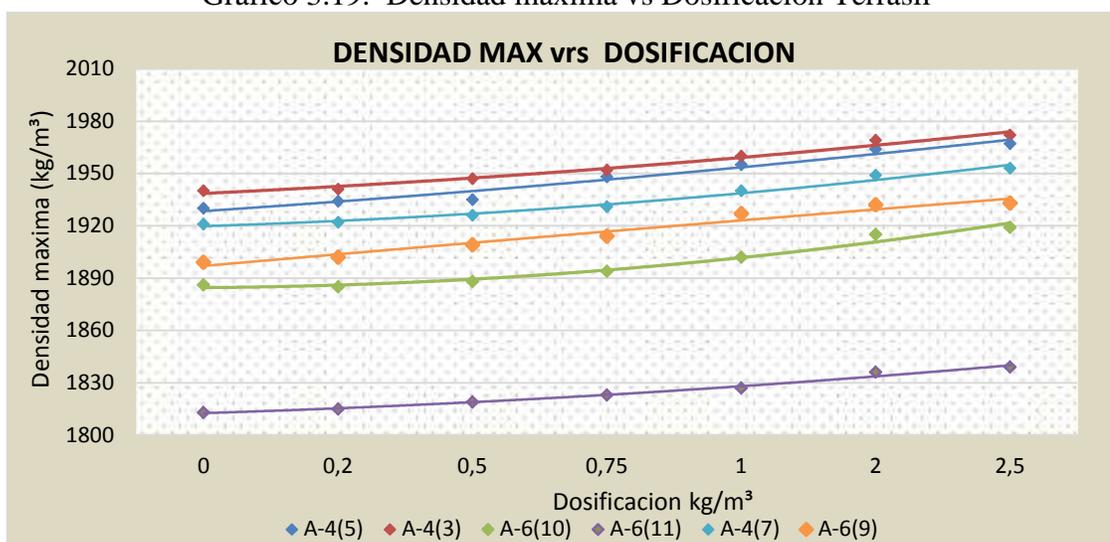
### 3.4.6.3. Compactación método modificado T-180

Tabla 3.33. Resumen de resultados de compactación

		Compactación						
		Muestra N° 1 "A-4 (5)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	11	10.8	10.6	9.6	8.8	7.8	7.5
Dmax	kg/m <sup>3</sup>	1930	1934	1935	1948	1955	1964	1967
		Muestra N° 2 "A-4 (3)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	9.1	8.9	8.7	8.3	8.0	7.2	7.0
Dmax	Kg/m <sup>3</sup>	1940	1941	1947	1952	1960	1969	1972
		Muestra N° 3 "A-6 (10)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	14.2	14.0	13.8	13.4	12.8	11.6	11.0
Dmax	kg/ m <sup>3</sup>	1886	1885	1888	1894	1902	1915	1919
		Muestra N° 4 "A-6 (11)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	14.5	14.5	14.2	13.8	13.5	12.9	12.5
Dmax	kg/ m <sup>3</sup>	1813	1815	1819	1823	1827	1836	1839
		Muestra N° 5 "A-4 (7)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	11.9	11.7	11.6	11.2	10.6	9.5	9.2
Dmax	kg/ m <sup>3</sup>	1921	1922	1926	1931	1940	1949	1953
		Muestra N° 6 "A- 6 (9)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
H.O	%	13.1	12.6	11.9	11.2	10.7	9.9	9.6
Dmax	kg/ m <sup>3</sup>	1899	1902	1909	1914	1927	1932	1933

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.19. Densidad máxima vs Dosificación Terrasil



Fuente: Elaboración propia

## Gráficos de la influencia del Terrasil en las densidades secas

Gráfico 3.20. Influencia del Terrasil al 0.2 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca

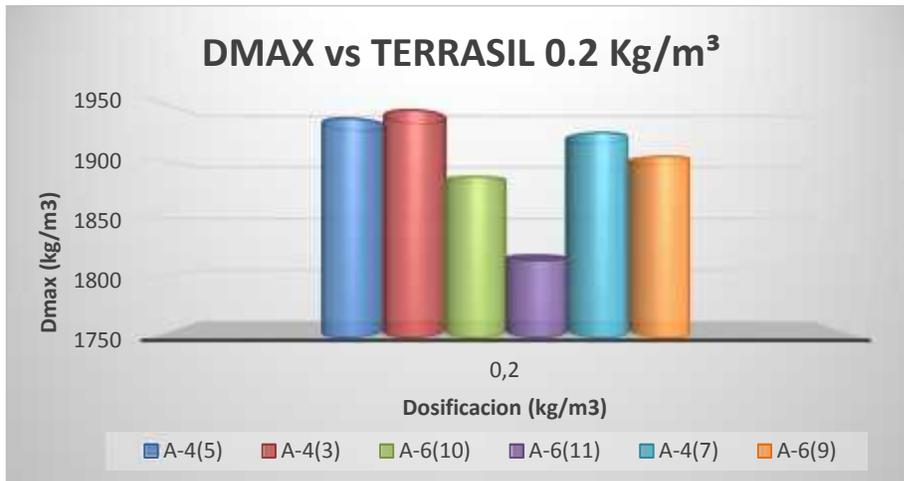


Gráfico 3.21. Influencia del Terrasil al 0.50 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca

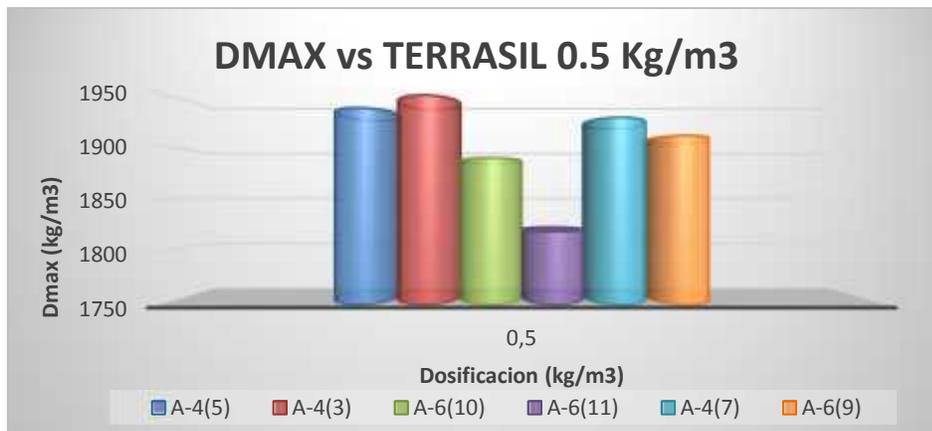


Gráfico 3.22. Influencia del Terrasil al 0.75 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca

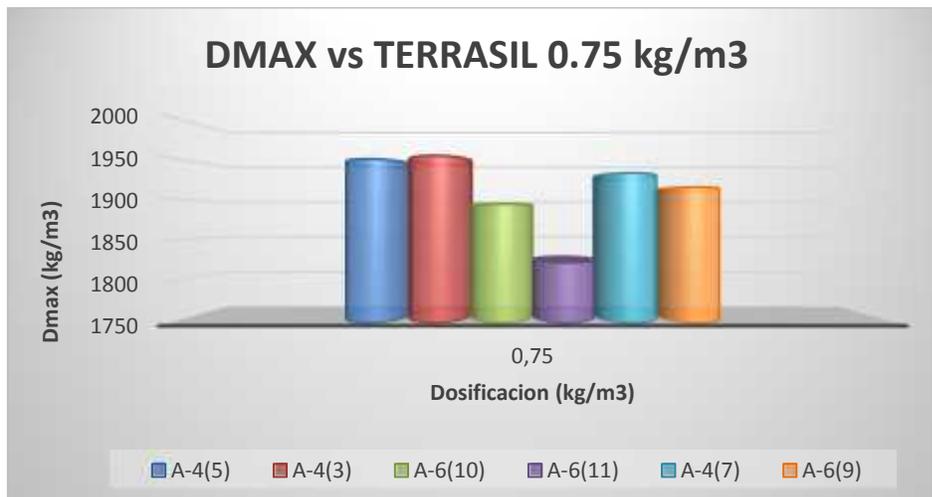


Gráfico 3.23. Influencia del Terrasil al 1.0 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca

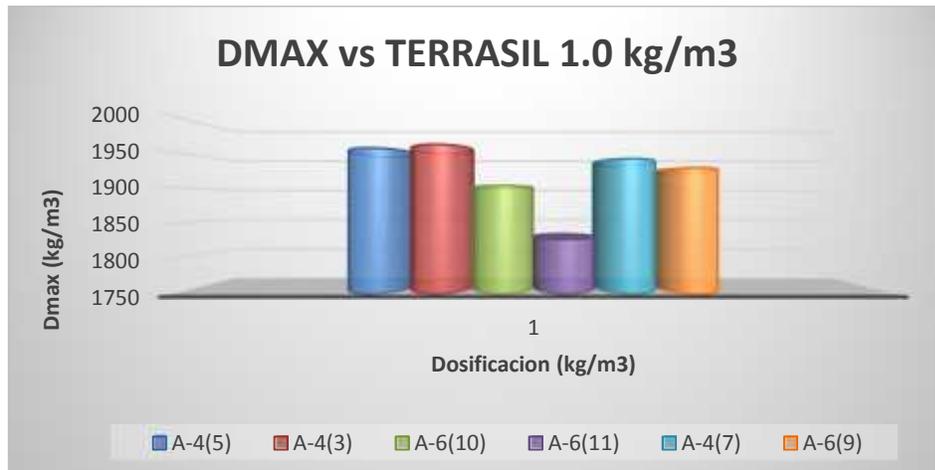
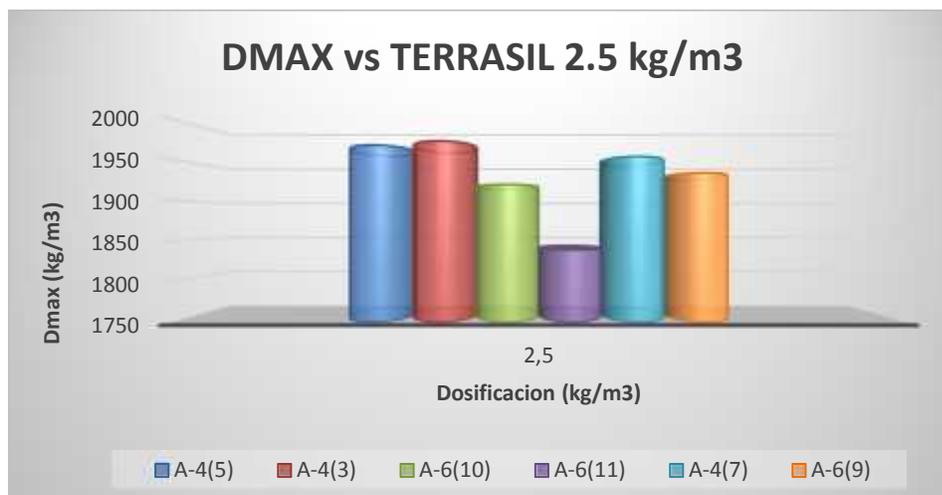


Gráfico 3.24. Influencia del Terrasil al 2.0 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca



Gráfico 3.25. Influencia del Terrasil al 2.5 Kg/m<sup>3</sup> en la densidad seca



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en los gráficos (3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25), las densidades de los suelos A-4(5), A-4(3), A-6(10), A-6(11), A-4(7) y A-6(9) van creciendo a medida que se va aumentando la dosificación de Terrasil esto ocurre porque al agregarle el aditivo provoca un enlace entre partículas de suelo y Terrasil más resistente que el suelo solo, haciendo una mezcla con mayor densidad gracias a las propiedades que presenta el aditivo.

Se observa que el A-4(5) va de una densidad de 1934 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1967 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. A medida que aumenta la dosificación de terrasil la densidad máxima seca llega a tener un incremento de 1% a 3% respecto al suelo natural. Se observa que el A-4(3) va de una densidad de 1941 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1972 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2% respecto al suelo natural. Siendo uno de los suelos con mejor comportamiento.

Se observa que el A-6(10) va de una densidad de 1885 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1919 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.4% a 1.8% respecto al suelo natural.

Se observa que el A-6(11) va de una densidad de 1815 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1839 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 1.5% respecto al suelo natural.

Se observa que el A-4(7) va de una densidad de 1922 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1953 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2% respecto al suelo natural.

Se observa que el A-6(9) va de una densidad de 1902 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1933 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2.2% respecto al suelo natural.

Así también se puede observar el comportamiento que tiene cada uno de los suelos respecto a la adición de Terrasil como ser el suelo A-4 presenta mayores densidades que el suelo A-6 esto es influenciado por la calidad que presenta cada uno.

## Gráficos de contenido de humedad óptima con dosificaciones de Terrasil

Gráfico 3.26. Humedad óptima (%) vs Terrasil 0.2 Kg/m<sup>3</sup>

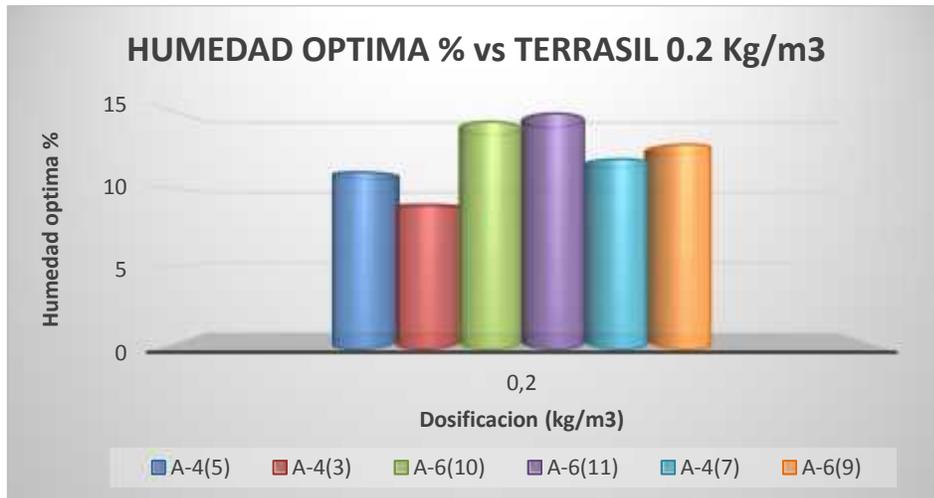


Gráfico 3.27. Humedad óptima (%) vs Terrasil 0.5 Kg/m<sup>3</sup>

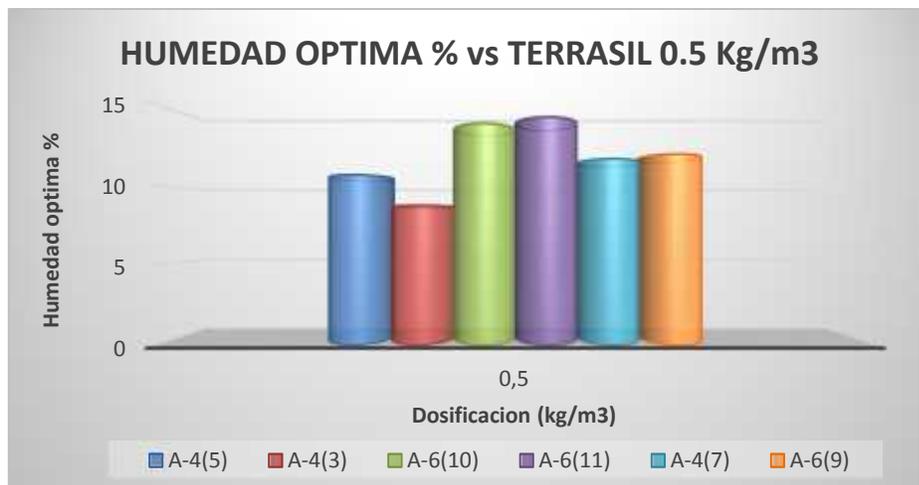


Gráfico 3.28. Humedad óptima (%) vs Terrasil 0.75 Kg/m<sup>3</sup>

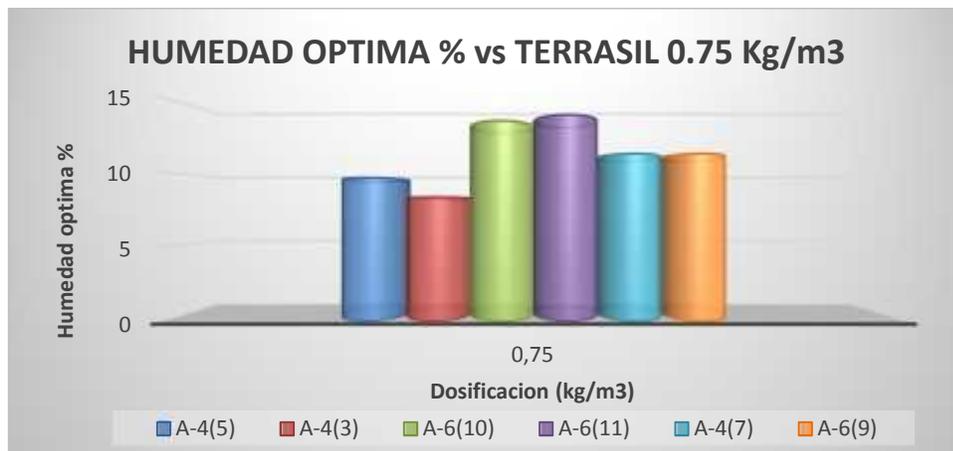


Gráfico 3.29. Humedad óptima (%) vs Terrasil 1.0 Kg/m<sup>3</sup>

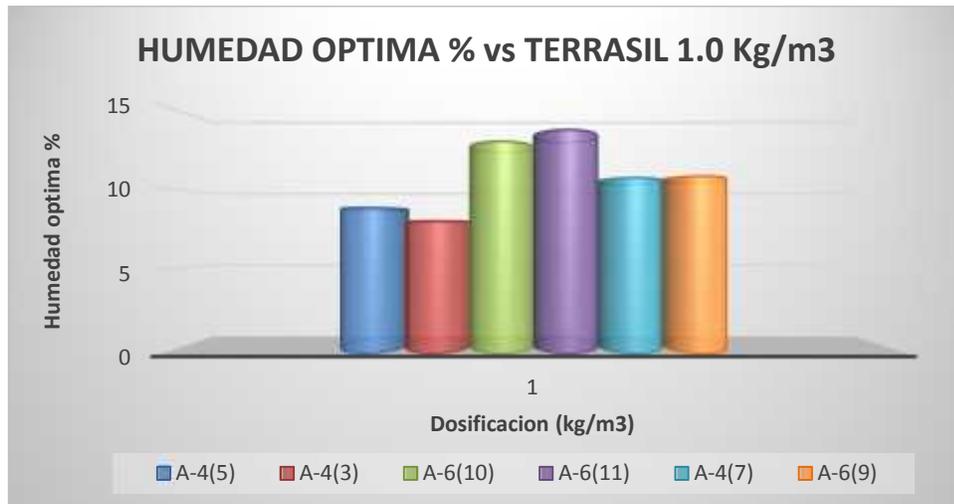


Gráfico 3.30. Humedad óptima (%) vs Terrasil 2.0 Kg/m<sup>3</sup>

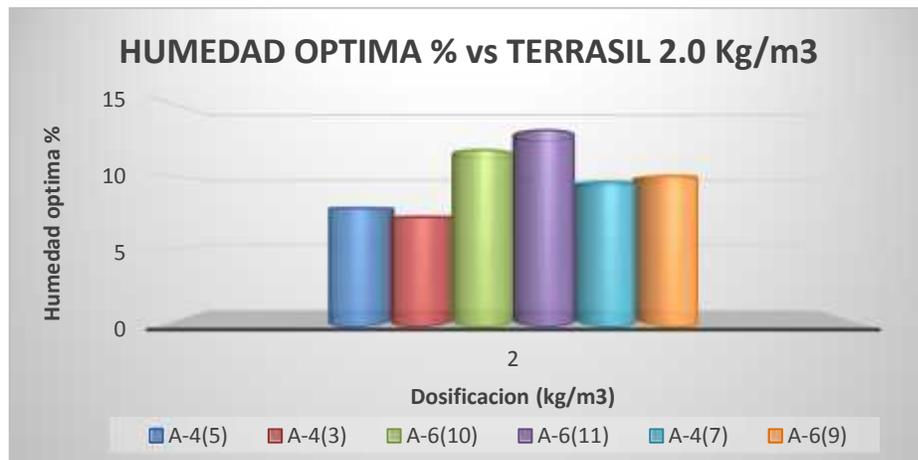
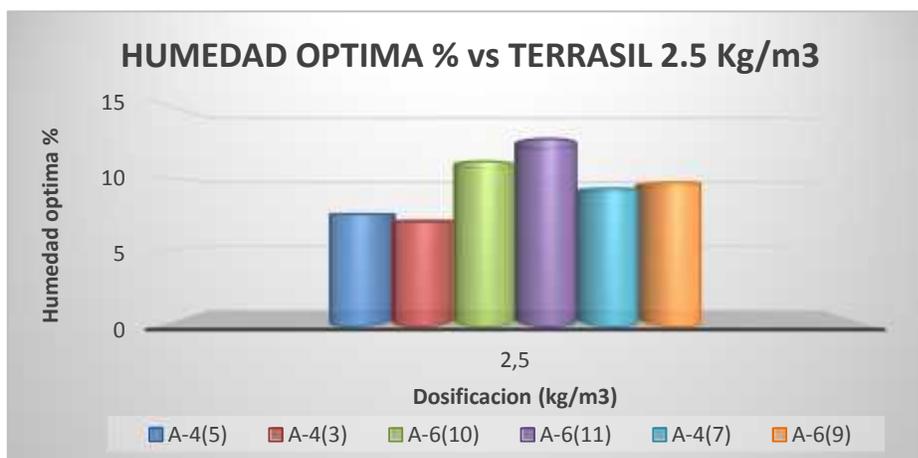


Gráfico 3.31. Humedad óptima (%) vs Terrasil 2.5 Kg/m<sup>3</sup>



Fuente: Elaboración propia

Según los gráficos (3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31), la humedad del suelo A-4(5) va disminuyendo y la densidad aumenta respecto a la dosificación de terrasil, al 0.2 kg/m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 10.9% con una densidad de 1934 kg/m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/ m<sup>3</sup> esta con una humedad de 7.5% y una densidad de 1967 kg/ m<sup>3</sup>.

Se demuestra que la humedad del suelo A-4(3) va disminuyendo y la densidad aumenta respecto a la dosificación de terrasil, al 0.2 kg/ m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 8.9% con una densidad de 1941 kg/ m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/ m<sup>3</sup> esta con una humedad de 7.0 % y una densidad de 1972 kg/ m<sup>3</sup>.

Según los gráficos (3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31), la humedad del suelo A-6(10) va disminuyendo y la densidad aumenta respecto a la dosificación de terrasil, al 0.2 kg/ m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 14.0 % con una densidad de 1885 kg/ m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/m<sup>3</sup> esta con una humedad de 11.0 % y una densidad de 1919 kg/ m<sup>3</sup>.

Según los gráficos (3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31), la humedad del suelo A-6(11) va disminuyendo y la densidad aumenta respecto a la dosificación de terrasil, al 0.2 kg/m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 14.5 % con una densidad de 1815 kg/ m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/m<sup>3</sup> esta con una humedad de 12.5 % y una densidad de 1839 kg/ m<sup>3</sup>.

Se demuestra que la humedad del suelo A-4(7) va disminuyendo y la densidad aumenta respecto a la dosificación de terrasil, al 0.2 kg/ m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 11.7 % con una densidad de 1922 kg/ m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/ m<sup>3</sup> esta con una humedad de 9.2 % y una densidad de 1953 kg/ m<sup>3</sup>.

Según los gráficos (3.26, 3.27, 3.28, 3.29, 3.30 y 3.31), la humedad del suelo A-6(9) va disminuyendo y la densidad aumenta, al 0.2 kg/ m<sup>3</sup> se tiene una humedad de 12.6 % con una densidad de 1902 kg/ m<sup>3</sup>, y al 2.5 kg/ m<sup>3</sup> esta con una humedad 9.6 % y una densidad de 1933 kg/ m<sup>3</sup>.

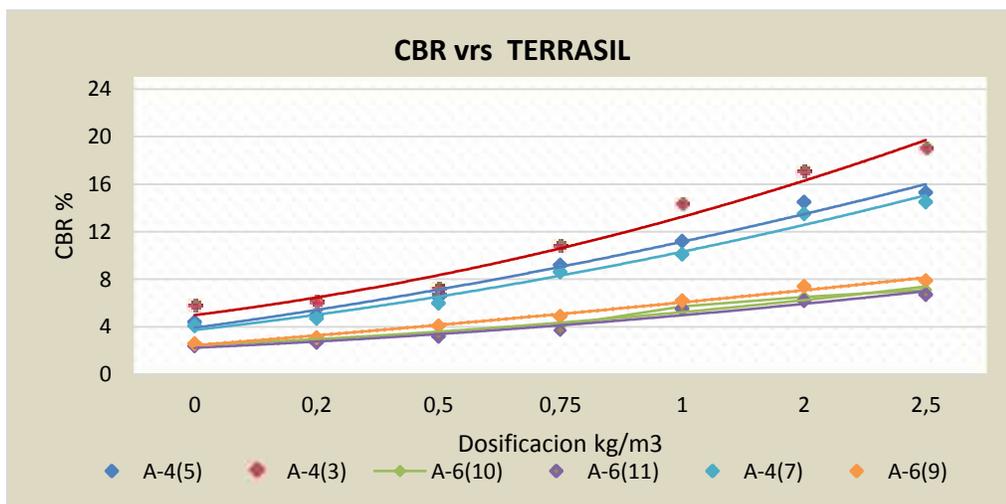
### 3.4.6.4. Razón soporte de california (CBR) del suelo-Terrasil.

Tabla 3.34. Resumen de valores de CBR de suelo-Terrasil

		CBR						
		Muestra N° 1 "A-4 (5)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	4.4	5.0	6.5	9.2	11.2	14.5	15.3
		Muestra N° 2 "A-4 (3)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	5.7	6.0	7.1	10.7	14.2	17.0	18.9
		Muestra N° 3 "A-6 (10)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	2.6	3.0	3.2	4.1	5.7	6.5	7.1
		Muestra N° 4 "A-6 (11)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	2.4	2.7	3.2	3.7	5.5	6.2	6.7
		Muestra N° 5 "A-4 (7)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	4.1	4.7	6.0	8.6	10.1	13.6	14.5
		Muestra N° 6 "A-6 (9)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
CBR	%	2.6	3.1	4.1	4.9	6.2	7.4	7.9

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.32. CBR vs Terrasil



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.33. CBR vs Terrasil A-4(5)

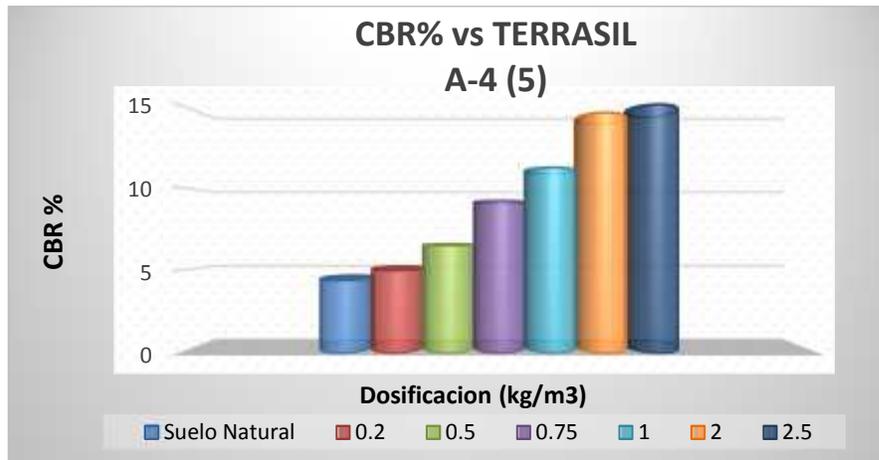


Gráfico 3.34. CBR vs Terrasil A-4(3)

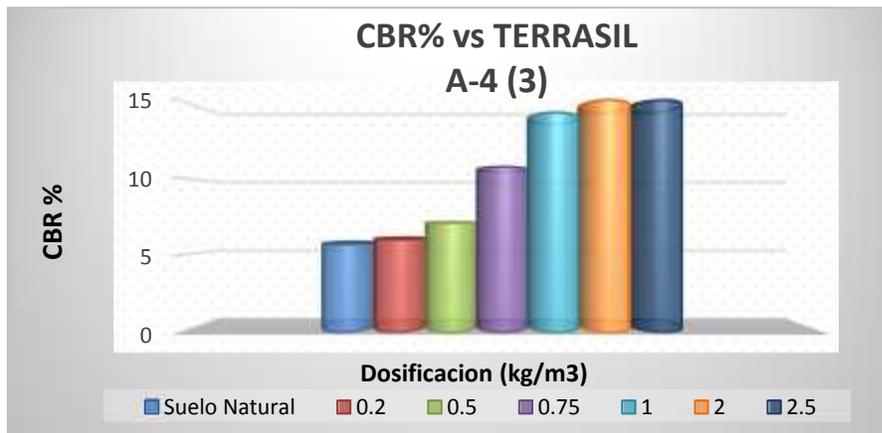


Gráfico 3.35. CBR vs Terrasil A-6(10)

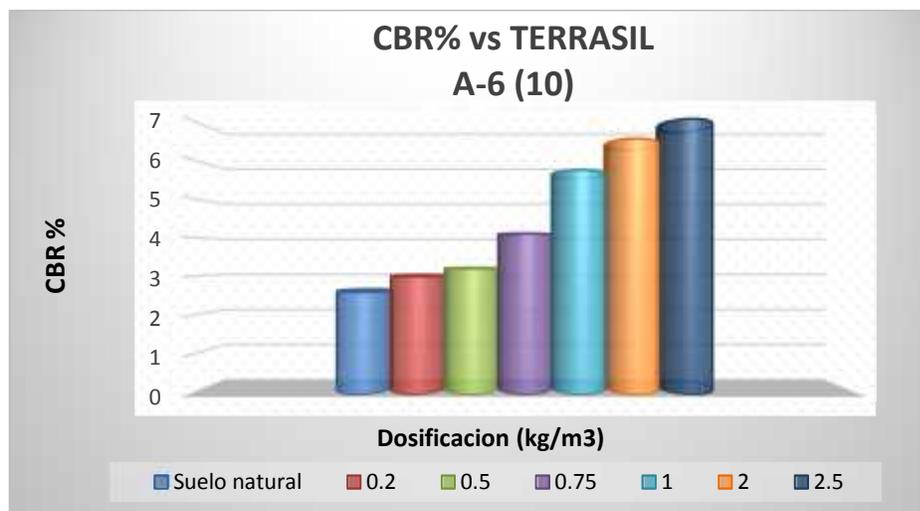


Gráfico 3.36. CBR vs Terrasil A-6(11)

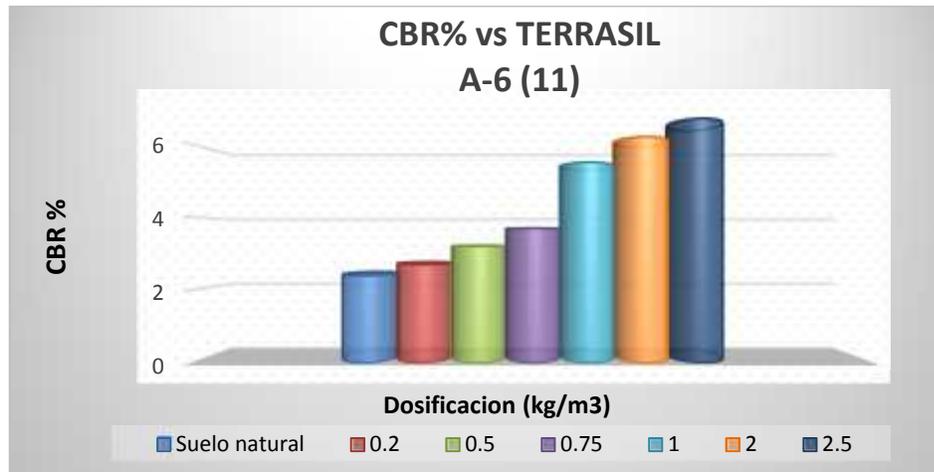


Gráfico 3.37. CBR vs Terrasil A-4(7)

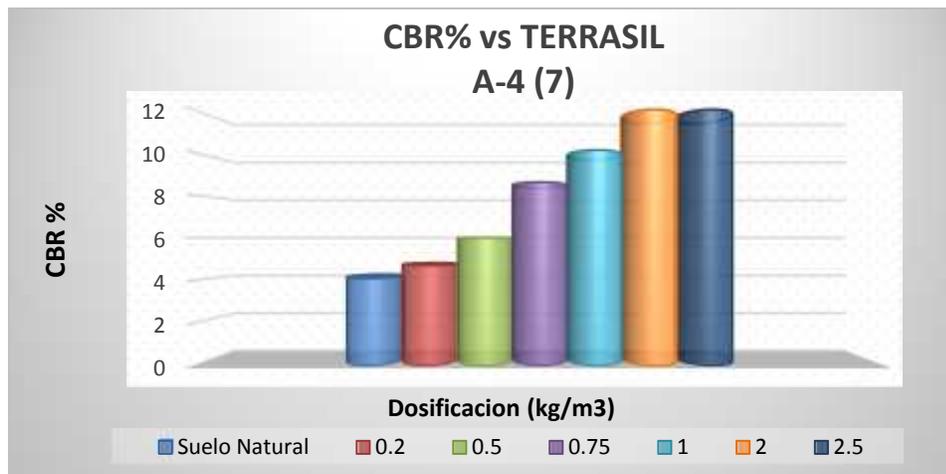
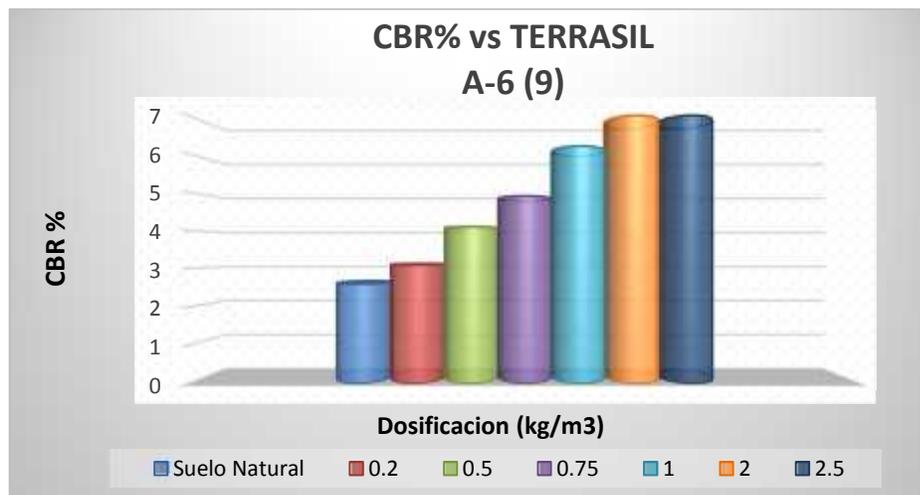


Gráfico 3.38. CBR vs Terrasil A-6(9)



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en los gráficos (3.33, 3.34, 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38) el incremento del CBR cuando se va aumentando más aditivo Terrasil al suelo natural, especialmente en el suelo tipo A-4 (3) en donde, con el 0.75 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil tiene un CBR de 10.7 al 95% y 2.5 kg/m<sup>3</sup> con un CBR de 18.9 al 95% cumpliendo con los valores más que óptimos para una subrasante según norma. La capacidad portante del material de subrasante se incrementó casi 3 veces más de lo del material natural; de 5.5% al 231.5% teniendo un CBR muy bueno.

Se observa que el suelo A-4(5) al 1.0 kg/m<sup>3</sup> de terrasil aumenta su CBR 11.2 al 95% cumpliendo según norma. Al 0.75 kg/m<sup>3</sup> tiene un CBR 9.2 al 95% no logrando cumplir. La capacidad portante del material de subrasante se incrementó casi 3 veces más de lo del material natural; de 13.6% al 245% teniendo un CBR muy bueno.

El suelo A-4(7) al 1.0 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil aumenta su CBR 10.1 al 95% cumpliendo para realizar una subrasante. La capacidad portante del material de subrasante se incrementó casi 4 veces más de lo del material natural; de 14.6% al 254% teniendo un CBR muy bueno.

En el suelo A-6 no pasa lo mismo con el A-4 esto es justificado por que es un suelo arcilloso, y con alta plasticidad que no reacciona de la misma manera que los anteriores tipos de suelo justamente por las propiedades que presenta. Si se quisiera elevar más resistencia se puede realizar combinaciones con dosificaciones superiores.

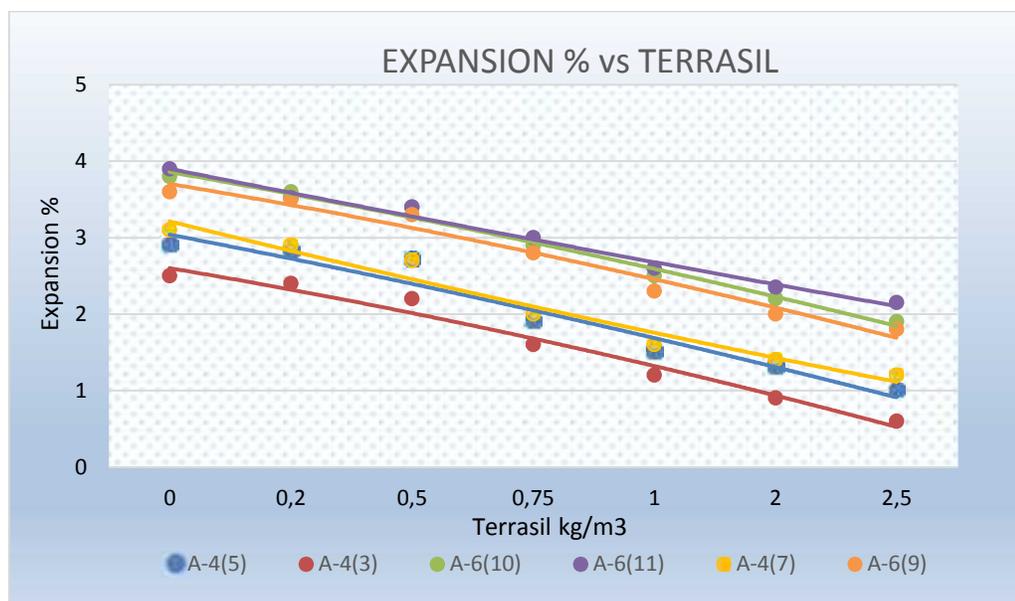
### 3.4.6.5. Expansión del suelo-Terrasil

Tabla 3.35. Expansión del suelo-Terrasil

		CBR						
		Muestra N° 1 "A-4 (5)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	2.9	2.82	2.7	1.9	1.5	1.3	1.0
		Muestra N° 2 "A-4 (3)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	2.5	2.4	2.2	1.6	1.2	0.9	0.6
		Muestra N° 3 "A-6 (10)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	3.8	3.6	3.4	2.9	2.5	2.2	1.9
		Muestra N° 4 "A-6 (11)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	3.9	3.52	3.4	3.0	2.6	2.35	2.15
		Muestra N° 5 "A-4 (7)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	3.1	2.9	2.7	2.0	1.6	1.4	1.2
		Muestra N° 6 "A-6 (9)"						
Terrasil kg/m <sup>3</sup>		0	0.2	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5
Expansión	%	3.6	3.5	3.3	2.8	2.3	2.0	1.8

Fuente: Elaboración propia

Gráfico 3.39. Expansión vs Terrasil



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la (gráfica 3.33) lo que se puede visualizar es que al desarrollar la mezcla suelo-Terrasil se ve una significativa mejoría, reduciendo la expansividad de los suelos en estudio.

Se observa que en los suelo A-4 su expansividad reduce mucho mejor, respecto al suelo A-6. El suelo de mejor comportamiento se tiene A-4(3) teniendo expansión natural 2.5% y con una dosificación de 1.0 kg/m<sup>3</sup> de terrasil una expansión de 1.2%. Teniendo un decremento del 4% al 76% respecto al suelo natural.

### 3.4.7. Determinación del porcentaje de incremento a la influencia del Terrasil

#### 3.4.7.1. Incremento de la densidad máxima seca

Gráfico 3.40. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-4(5)

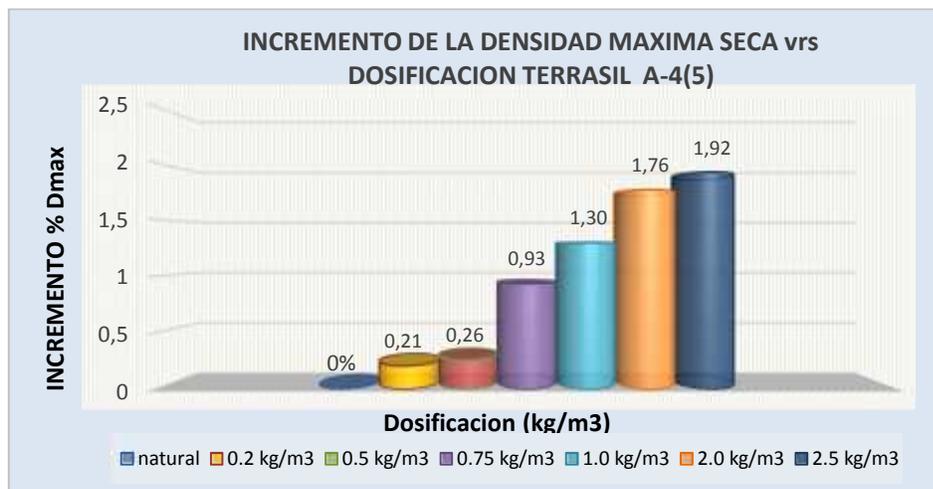


Gráfico 3.41. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-4(3)

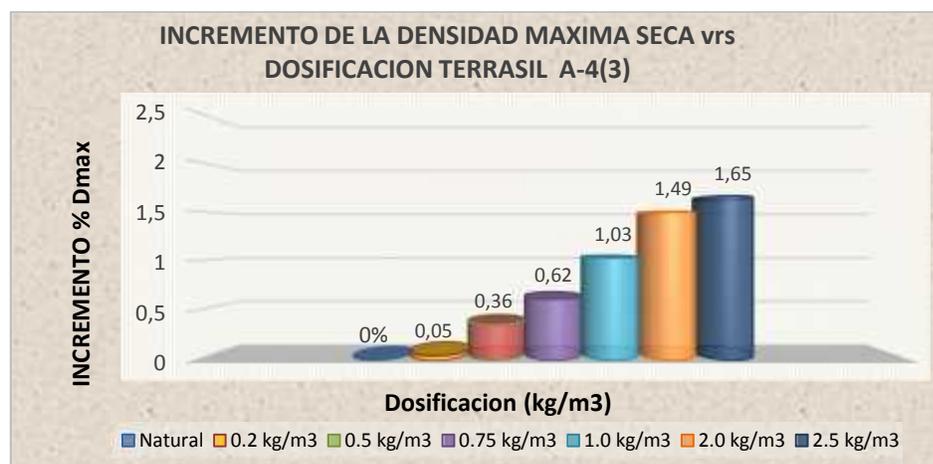


Gráfico 3.42. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-6(10)

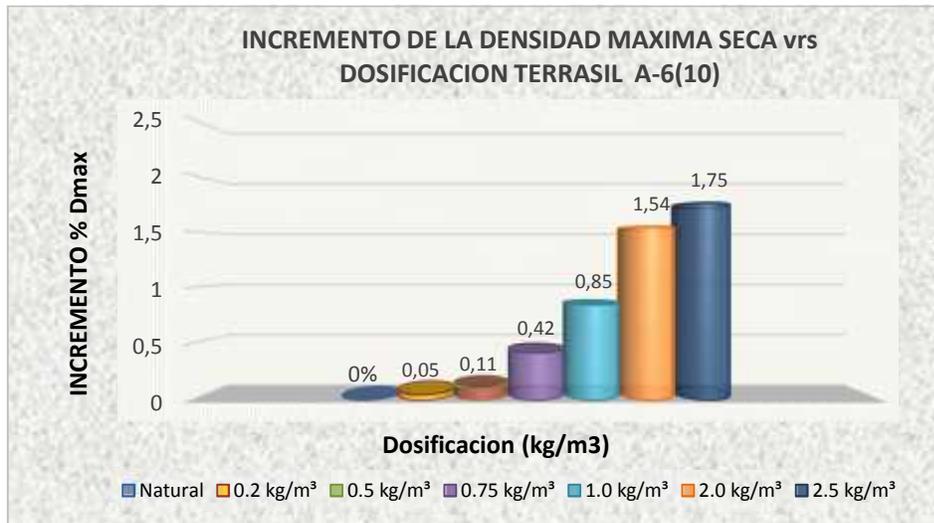


Gráfico 3.43. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-6(11)

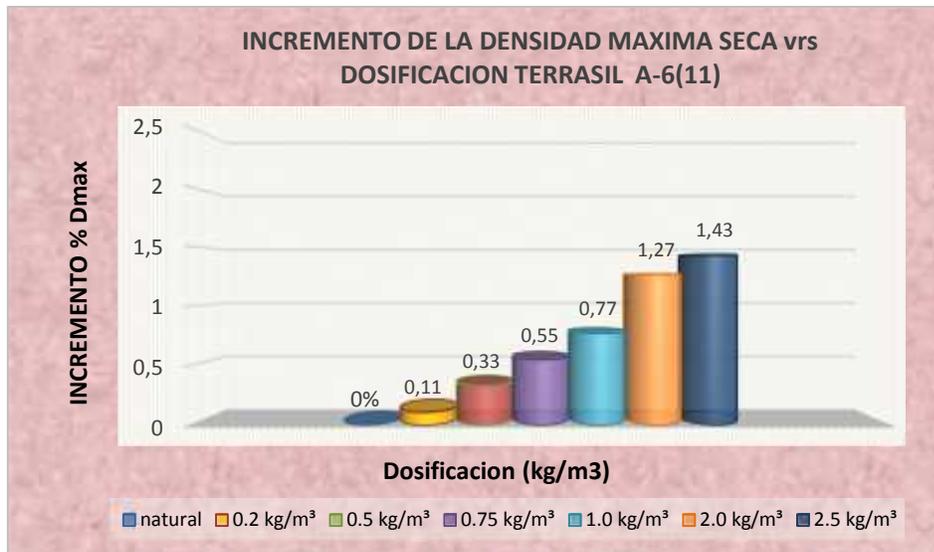


Gráfico 3.44. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-4(7)

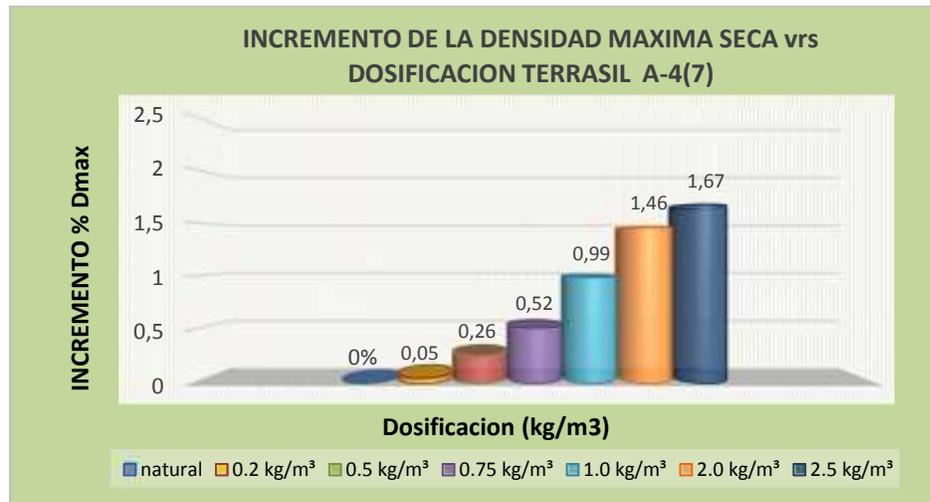
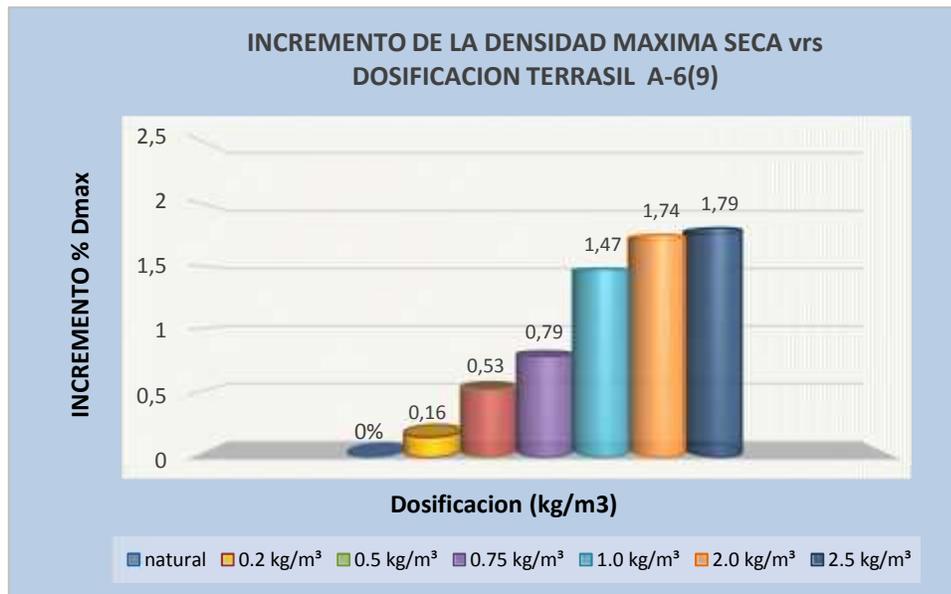


Gráfico 3.45. Incremento D<sub>máx</sub> vs Dosificación Terrasil A-6(9)



Fuente: Elaboración propia

Se observa en los gráficos 3.40 hasta 3.45, que el incremento va creciendo a medida que se va aumentando la dosificación del Terrasil.

Se observa que en el suelo A-4(5), tiene un incremento de la densidad máxima seca a una dosificación de 0.5 kg/m<sup>3</sup> un incremento de 0.26% respecto al suelo natural y al 0.75 kg/m<sup>3</sup> tiene un incremento de 0.93% respecto al suelo natural.

Se observa que en suelo A-4(3), tiene un incremento de 0.21% al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta un 1.65% al 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil.

Se observa que el A-6(10) tiene un incremento de 0.05% al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1.75% a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil.

Se observa que el A-6(11) tiene un incremento de 0.11% al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1.43% al 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. En este tipo de suelo no se incrementa mucho con respecto al suelo natural.

Se observa que el A-4(7) tiene un incremento de 0.05% al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1.67% al 2.5 kg/m<sup>3</sup> con respecto al suelo natural.

### 3.4.7.2. Incremento del CBR a la influencia del terrasil

Gráfico 3.46. Incremento % CBR. vs Dosificación Terrasil A-4(5)

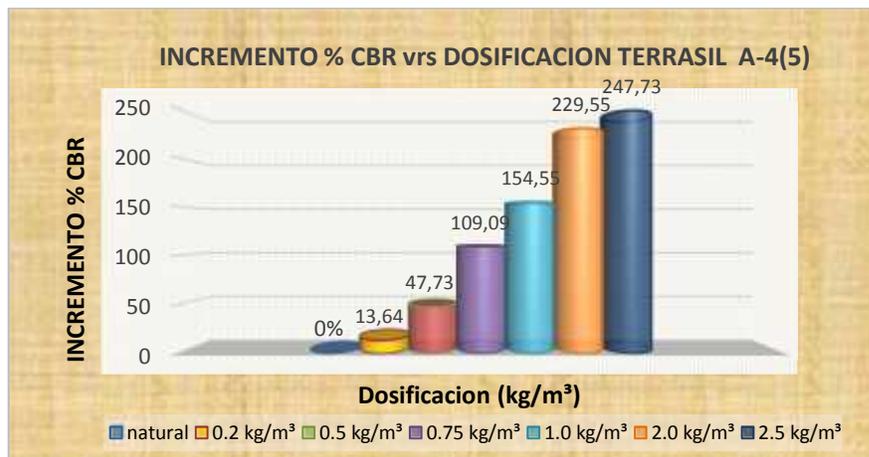


Gráfico 3.47. Incremento % CBR vs Dosificación Terrasil A-4(3)

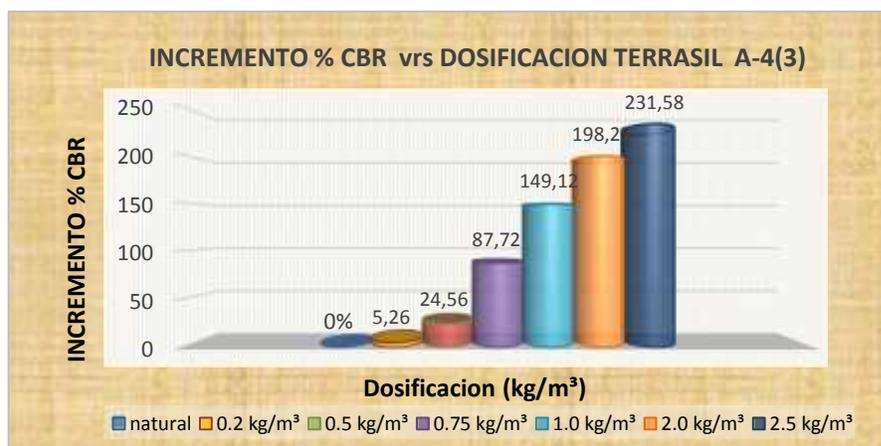


Gráfico 3.48. Incremento % CBR vs Dosificación Terrasil A-6(10)

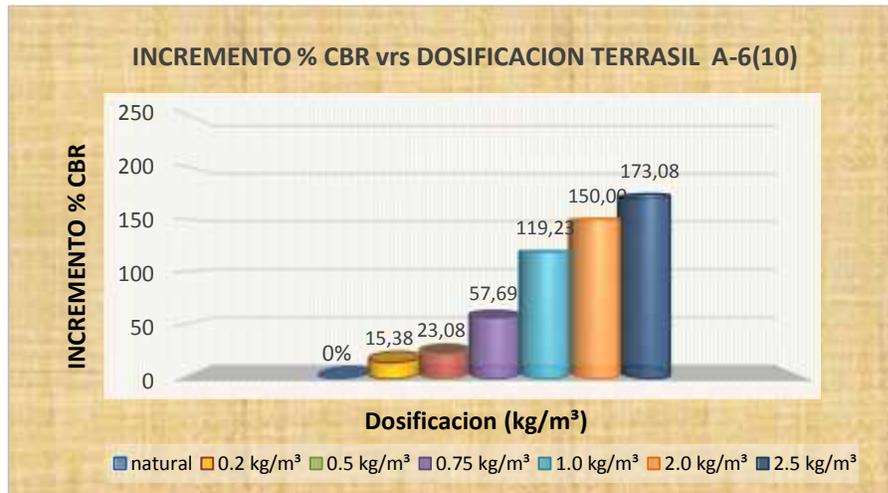


Gráfico 3.49. Incremento % CBR vs Dosificación Terrasil A-6(11)

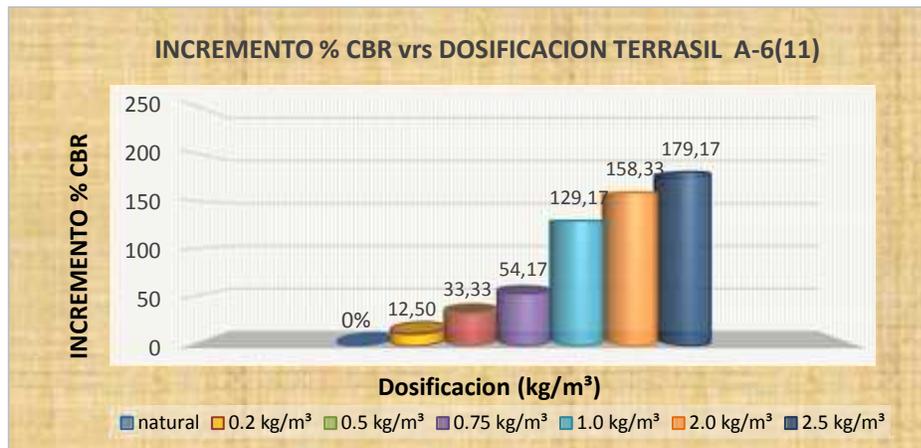


Gráfico 3.50. Incremento % CBR vs Dosificación Terrasil A-4(7)

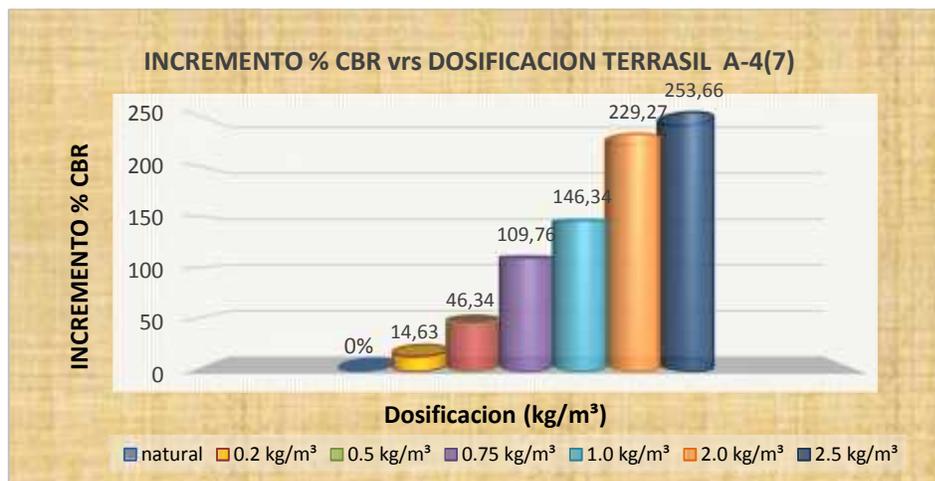
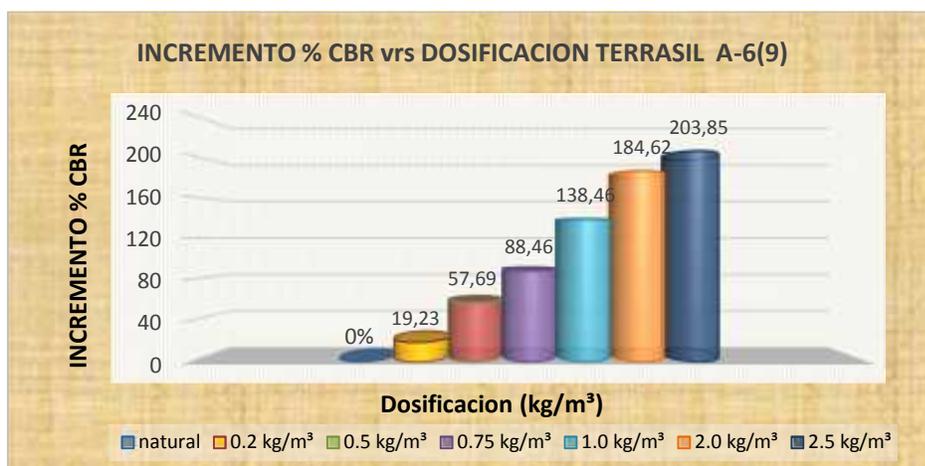


Gráfico 3.51. Incremento % CBR vs Dosificación Terrasil A-6(9)



Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en los gráficos 3.46 hasta 3.51, el incremento del CBR cuando se aplica más dosificación del aditivo Terrasil al suelo natural va aumentando el CBR. En los suelos A-4 se ve que aumenta más los porcentajes de incremento de acuerdo a la dosificación de Terrasil quiere decir que sube su capacidad portante del material de una subrasante según las normas. Se observa que el suelo A-4(5) tiene un incremento del CBR DE 13.64% al 247.73% teniendo un CBR muy bueno. Se observa que en el suelo A-4(3) tiene un incremento del CBR de 5.26 hasta 234.58% teniendo un CBR muy bueno y que da para las condiciones de una subrasante. Se observa que en el suelo A-6(10) tiene un incremento del CBR de 15.38 hasta 173.08% no incrementa su CBR.

### 3.4.8. Comparación del Terrasil con otro producto

#### Resultados de los ensayos de suelo-Terrasil

##### Compactación

Tabla 3.36. Resultados de compactación con Terrasil muestra N° 1

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.2	10.8	1934
0.5	10.6	1935
0.75	9.6	1948
1.0	8.8	1955
2.0	7.8	1964
2.5	7.5	1967

Fuente: Elaboración propia

##### CBR y expansión

Tabla 3.37. Resultados de CBR y expansión con Terrasil

<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	5.0	2.82
0.5	6.5	2.7
0.75	9.2	1.9
1.0	11.2	1.5
2.0	14.5	1.4
2.5	15.3	1.0

Fuente: Elaboración propia

#### Resultados del ensayo de compactación de sulfato de calcio

Tabla 3.38. Resultados de compactación con sulfato de calcio

<b>Porcentaje %</b>	<b>Humedad óptima</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>		
		<b>90%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
<b>3</b>	11.9	1.731	1.827	1.923
<b>5</b>	12.5	1.729	2.125	1.921
<b>10</b>	12.6	1.727	1.823	1.919
<b>12</b>	14.5	1.724	1.819	1.915

Fuente: Tesis de Univ. Sofía Rueda

- **Resultados del ensayo de C.B.R. para el Barrio Los Chapacos**

Tabla 3.39. Resultados de % de C.B.R. y expansión con sulfato de calcio

Porcentaje %	Expansión		C.B.R.		
	95%	100%	90%	95%	100%
<b>3</b>	3.2	1.7	1.7	2.6	3.4
<b>5</b>	2.7	1.3	1.7	2.9	4.1
<b>10</b>	2.3	1.5	2	3.4	4.9
<b>12</b>	2.2	0.5	1.4	3.8	6.2

Fuente: Tesis de Univ. Sofía Rueda

Tabla 3.40. Terrasil vs Sulfato de calcio

<b>DENSIDADES</b>					
<b>TERRASIL</b>			<b>SULFATO DE CALCIO</b>		
<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>Humedad óptima (%)</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Porcentaje %</b>	<b>Humedad óptima</b>	<b>Densidad máx. (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0.2	10.8	1934	3	11.9	1.731
0.5	10.6	1935	5	12.5	1.729
0.75	9.6	1948	10	12.6	1.727
1.0	8.8	1955	12	14.5	1.724
2.0	7.8	1964			
2.5	7.5	1967			

Se observa en la tabla 3.40 que las densidades máximas con sulfato de calcio, el producto Terrasil es un aditivo mucho mejor para poder mejorar una subrasante teniendo mejor comportamiento.

El producto Terrasil es un aditivo que tiene un excelente comportamiento para una subrasante logrando tener mejores resultados.

Tabla 3.41. CBR vs Sulfato de calcio

<b>CBR</b>					
<b>TERRASIL</b>			<b>SULFATO DE CALCIO</b>		
<b>Kg/m<sup>3</sup> Terrasil</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>	<b>Porcentaje %</b>	<b>CBR (%)</b>	<b>Expansión (%)</b>
0.2	5.0	2.82	3	2.6	3.2
0.5	6.5	2.7	5	2.9	2.7
0.75	9.2	1.9	10	3.4	2.3
1.0	11.2	1.5	12	3.8	2.2
2.0	14.5	1.4			
2.5	15.3	1.0			

Se observa en la tabla 3.41, que los CBR van aumentando de acuerdo a la dosificación pero para el sulfato de calcio los porcentajes de CBR no son muy altos y no pueden cumplir para una subrasante ya que son menores a 10.

Se puede observar que con el Terrasil con una dosificación de 1.0 ya se puede cumplir para una subrasante.

### 3.5. Costo económico del Terrasil

Tabla 3.42. Precio unitario del Terrasil

<b>ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO</b>				
<b>PROYECTO: ESTABILIZACION SUB RASANTE SUELO - TERRASIL</b>				
<b>Actividad: CONFORMACIÓN DE CAPA SUBRASANTE</b>				
<b>Unitario: M3</b>				
<b>Cantidad: 0.75 Kg de TERRASIL</b>				
<b>Moneda: BOLIVIANOS</b>				
Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1. MATERIALES</b>				
SUB RASANTE DE TIERRA	M3	1.20000	80.000	96.000
TERRASIL	KG	0.75000	130.000	97.500
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>193.500</b>
<b>2. MANO DE OBRA</b>				
AYUDANTE	HR.	0.00300	12.500	0.038
CAPATAZ	HR.	0.00800	21.250	0.170
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0.00560	16.250	0.091
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HR.	0.00610	12.000	0.073
PEON	HR.	0.00610	5.000	0.031
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>0.402</b>
CAR. SOC. = (55% AL 71.18%) - %			65.00%	0.261
IMPUESTO IVA MANO DE OBRA - %			14.94%	0.099
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>0.763</b>
<b>3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				
CARGADOR FRONTAL CAT 930 CUCHARA 2 M3	HR.	0.00300	380.000	1.140
COMPACTADOR DE RODILLO LISO CAT CS-5330	HR.	0.00910	300.000	2.730
VOLQUETA CAP 10 M3	HR.	0.00200	130.000	0.260
TRACTOR CAT D7R, SIN ESCARIFICADOR	HR.	0.00300	560.000	1.680
CAMION CISTERNA CAP 10000 LITROS	HR.	0.00800	175.000	1.400
MOTONIVELADORA CAT 120	HR.	0.01670	320.000	5.344
HERRAMIENTAS= (% DEL TOT. MO) - %			5.00%	0.038
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				<b>12.592</b>
<b>4. GASTOS GENE. Y ADMINISTRATIVOS</b>				
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3 - %			10.00%	10.777
<b>TOTAL GASTOS GENE. Y ADMINISTRATIVOS</b>				<b>10.777</b>
<b>5. UTILIDAD</b>				
UTILIDAD = % DE 1+2+3+4 - %			10.00%	11.855
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>11.855</b>
<b>6. IMPUESTOS</b>				
IMPUESTO IT = % DE 1+2+3+4+5 - %			3.09%	4.030
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>4.030</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>233.517</b>

Fuente: Elaboración propia

El precio de una subrasante con terrasil es de 233.517 Bs. Para un m3

**ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO**  
**PROYECTO: ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS PLÁSTICOS**

Actividad: CONFORMACIÓN DE CAPA SUB SUBRASANTE

Unitario: M3

Cantidad:

Moneda: BOLIVIANOS

Descripción	Und.	Cantidad	Precio Productiv.	Costo Total
<b>1.- MATERIALES</b>				
SUB RASANTE NORMAL	M3	1.20000	80.000	96.000
<b>TOTAL MATERIALES</b>				<b>96.000</b>
<b>2.- MANO DE OBRA</b>				
AYUDANTE	HR.	0.00460	12.500	0.058
CAPATAZ	HR.	0.01670	21.250	0.355
CHOFER	HR.	0.00100	16.250	0.016
OPERADOR DE EQUIPO LIVIANO	HR.	0.00300	16.250	0.049
OPERADOR DE EQUIPO PESADO	HR.	0.00700	20.000	0.140
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>0.617</b>
CAR. SOC. = (55% AL 71.18%) - %			65.00%	0.401
IMPUESTO IVA MANO DE OBRA - %			14.94%	0.152
<b>TOTAL MANO DE OBRA</b>				<b>1.171</b>
<b>3.- EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				
CARGADOR FRONTAL CAT 930 CUCHARA 2 M3	HR.	0.00300	380.000	1.140
COMPACTADOR DE RODILLO LIÑO CAT CS-5330	HR.	0.00910	300.000	2.730
VOLQUETA CAP 10 M3	HR.	0.00200	130.000	0.260
TRACTOR CAT D7R. SIN ESCARIFICADOR	HR.	0.00300	560.000	1.680
CAMION CISTERNA CAP 10000 LITROS	HR.	0.00800	175.000	1.400
MOTONIVELADORA CAT 120	HR.	0.01670	320.000	5.344
HERRAMIENTAS= (% DEL TOT. MO) - %			5.00%	0.059
<b>TOTAL EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS</b>				<b>12.613</b>
<b>4.- GASTOS GENE. Y ADMINISTRATIVOS</b>				
GASTOS GENERALES = % DE 1+2+3 - %			10.00%	10.978
<b>TOTAL GASTOS GENE. Y ADMINISTRATIVOS</b>				<b>10.978</b>
<b>5.- UTILIDAD</b>				
UTILIDAD = % DE 1+2+3+4 - %			10.00%	12.076
<b>TOTAL UTILIDAD</b>				<b>12.076</b>
<b>6.- IMPUESTOS</b>				
IMPUESTO IT = % DE 1+2+3+4+5 - %			3.09%	4.105
<b>TOTAL IMPUESTOS</b>				<b>4.105</b>
<b>TOTAL PRECIO UNITARIO</b>				<b>136.943</b>

Fuente: Elaboración propia

El precio de una subrasante normal es de 136.943 Bs. Para un m3.

### 3.5.1. Comparación y análisis de costos económicos con otros productos

Comparación de costos económicos				
Unidad	Cantidad	Terrasil	Cal hidratada	Sulfato de calcio
M3	1.0	233.517 BS.	336.427 B.	186.74 BS.

## Costo para 1Km

Datos:

L=1Km

Ancho de vía= 7m

Espesor de sub rasante= 0.20m

Volumen de suelo en 1Km

$$V=1000*7*0.20$$

$$V=1400 \text{ m}^3$$

### COSTO SUBRASANTE TERRASIL

$$\text{Costo subrasante} = \frac{1400 \cdot 233517}{1} = 326923.80 \text{ Bs} = 49014.06 \text{ \$us/Km}$$

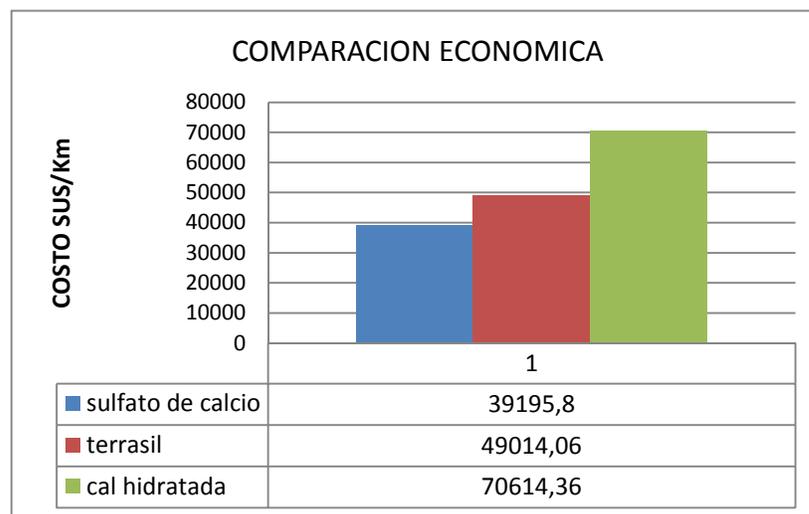
### COSTO SUBRASANTE CAL HIDRATADA

$$\text{Costo subrasante} = \frac{1400 \cdot 336.427}{1} = 470997.80 \text{ Bs} = 70614.36 \text{ \$us/Km}$$

### COSTO SUBRASANTE SULFATO DE CALCIO

$$\text{Costo subrasante} = \frac{1400 \cdot 186.74}{1} = 261436.00 \text{ Bs} = 39195.80 \text{ \$us/Km}$$

Gráfico 3.52. Comparación económica



El incremento de costo de una subrasante con terrasil tiene un incremento del 25 % con una dosificación de 0.75 kg/m<sup>3</sup> en comparación con el producto de calcio.

El decremento de costo de una subrasante con terrasil tiene un decremento del 30 % con una dosificación de 0.75 kg/m<sup>3</sup> en comparación con la cal hidratada.

### 3.6. Tratamiento estadístico

#### 3.6.1. Tratamiento estadístico para la mezcla suelo-Terrasil

Tabla 3.43. Estadística para los LL, LP, IP

Lugar	Clasificación	Dosificación	L.L.	L.P.	I.P.
Progresiva 2+000	A-4-(5) CL-ML	S.N.	20.1	14.2	6
	A-4-(5) CL-ML	0.2	20	14.3	5.7
	A-4-(5) CL-ML	0.5	19.4	14.3	5.1
	A-4-(5) ML	0.75	18.2	14.6	3.6
	A-4-(5) CL-ML	1	17	14.1	2.9
	A-4-(5) ML	2	16.5	NP	0
	A-4-(5) ML	2.5	16	NP	0
Media			18.1714286	14.3	3.32857143
Mediana			19.4	14.3	5.1
D. estándar			1.32	0.19	1.35
Varianza			1.7480	0.0350	1.8230
Coeficiente de variación			7.28	1.31	40.56
Lugar	Clasificación	Dosificación	L.L.	L.P.	I.P.
Progresiva 2+500	A-4-(3) SC-SM	S.N.	20.5	15.4	5.1
	A-4-(1) SC-SM	0.2	20.9	16	4.8
	A-4-(3) SM	0.5	19.3	15.6	3.8
	A-4-(3) SM	0.75	19	16.2	2.8
	A-4-(3) SM	1	18.3	16.3	2
	A-4-(3) SM	2	17.1	NP	0
	A-4-(2) SM	2.5	16.6	P	0
Media			18.8142857	15.9	2.64285714
Mediana			19.3	16	3.8
D. estándar			1.08	0.39	1.31
Varianza			1.1600	0.1500	1.7200
Coeficiente de variación			5.72	2.44	49.62

Fuente: Elaboración propia

Continúa tabla 3.43

Lugar	Clasificación	Dosificación	L.L.	L.P.	I.P.
Progresiva 3+000	A-6-(10) CL	S.N.	31.8	17.6	14.2
	A-6-(9) CL	0.2	30.7	18.7	12
	A-6-(10) CL	0.5	30.1	16.5	13.6
	A-6-(10) CL	0.75	29.7	16.8	12.8
	A-6-(9) CL	1	28.1	16.1	12
	A-6-(9) CL	2	27	15.4	11.6
	A-6-(8) CL	2.5	26.8	15.6	11.2
Media			29.171429	16.671429	12.485714
Mediana			30.1	16.8	12.8
D. estándar			1.36	1.03	0.98
Varianza			1.8520	1.0630	0.9520
Coeficiente de variación			4.67	6.18	7.81
Lugar	Clasificación	Dosificación	L.L.	L.P.	I.P.
Progresiva 3+500	A-6-(11) CL	S.N.	36.3	18.3	18
	A-6-(11) CL	0.2	36.8	19	17.9
	A-6-(10) CL	0.5	37.2	20.2	17
	A-6-(10) CL	0.75	35.8	19.2	16.6
	A-6-(10) CL	1	34.6	19.5	15.2
	A-6-(10) CL	2	35.1	20.4	14.7
	A-6-(9) CL	2.5	34.8	20.6	14.2
Media			35.8	19.6	16.2285714
Mediana			36.3	19.2	17
D. estándar			1.01	0.69	1.14
Varianza			0.8771	0.6029	2.0249
Coeficiente de variación			2.58	4.04	8.37

Tabla 3.44. Estadística para la H.O. y la densidad

LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
Progresiva 2+000	A-4-(5) CL-ML	S.N.	11	1930
	A-4-(5) CL-ML	0.2	10.8	1934
	A-4-(5) CL-ML	0.5	10.6	1935
	A-4-(5) ML	0.75	9.6	1948
	A-4-(5) CL-ML	1	8.8	1955
	A-4-(5) ML	2	7.8	1994
	A-4-(5) ML	2.5	7.5	1967
Media			9.44285714	1951.857143
Mediana			10.6	1935
D. estándar			0.93	10.60
Varianza			0.8680	112.3000
Coeficiente de variación			9.87	0.54

LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
PROGRESIVA 2+500	A-4-(3) SC-SM	S.N.	9.1	1940
	A-4-(1) SC-SM	0.2	8.9	1941
	A-4-(3) SM	0.5	8.7	1947
	A-4-(3) SM	0.75	8.3	1952
	A-4-(3) SM	1	8	1960
	A-4-(3) SM	2	7.2	1969
	A-4-(2) SM	2.5	7	1972
<b>Media</b>			8.17142857	1954.428571
<b>Mediana</b>			8.7	1947
<b>D. estándar</b>			0.45	8.28
<b>Varianza</b>			0.2000	68.5000
<b>Coefficiente de variación</b>			5.47	0.42
LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
PROGRESIVA 3+000	A-6-(10) CL	S.N.	14.3	1886
	A-6-(9) CL	0.2	14	1885
	A-6-(10) CL	0.5	13.8	1888
	A-6-(10) CL	0.75	13.4	1894
	A-6-(9) CL	1	12.8	1902
	A-6-(9) CL	2	11.6	1915
	A-6-(8) CL	2.5	11	1919
<b>Media</b>			12.9857143	1898.428571
<b>Mediana</b>			13.8	1888
<b>D. estándar</b>			0.58	7.07
<b>Varianza</b>			0.3380	50.0000
<b>Coefficiente de variación</b>			4.48	0.37
LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
Progresiva 3+500	A-6-(11) CL	S.N.	14.5	1813
	A-6-(11) CL	0.2	14.5	1815
	A-6-(10) CL	0.5	14.2	1819
	A-6-(10) CL	0.75	13.8	1823
	A-6-(10) CL	1	13.5	1827
	A-6-(10) CL	2	12.9	1836
	A-6-(10) CL	2.5	12.5	1839
<b>Media</b>			13.7	1824.571429
<b>Mediana</b>			14.2	1819
<b>D. estándar</b>			0.44	5.73
<b>Varianza</b>			0.1950	32.8000
<b>Coefficiente de variación</b>			3.22	0.31
LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
Progresiva 4+000	A-6-(10) CL	S.N.	11.9	1921
	A-6-(10) CL	0.2	11.7	1922
	A-4-(7) CL-ML	0.5	11.6	1926
	A-4-(7) CL-ML	0.75	11.2	1931
	A-4-(7) ML	1	10.6	1940
	A-4-(7) ML	2	9.5	1949
	A-4-(7) ML	2.5	9.2	1953
<b>Media</b>			10.8142857	1934.571429
<b>Mediana</b>			11.6	1926
<b>D. estándar</b>			0.51	7.78
<b>Varianza</b>			0.2650	60.5000
<b>Coefficiente de variación</b>			4.76	0.40

LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	H.O.	DENSIDAD (gr/cm <sup>3</sup> )
Progresiva 4+500	A-6-(9) CL	S.N.	13.1	1899
	A-6-(9) CL	0.2	12.6	1902
	A-6-(9) CL	0.5	11.9	1909
	A-4-(8) CL	0.75	11.2	1914
	A-4-(8) CL	1	10.7	1922
	A-4-(8) CL	2	9.9	1932
	A-4-(8) CL	2.5	9.6	1933
<b>Media</b>			11.2857143	1915.857143
<b>Mediana</b>			11.9	1909
<b>D. estándar</b>			0.98	9.26
<b>Varianza</b>			0.9650	85.7000
<b>Coefficiente de variación</b>			8.70	0.48

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.45. Estadística para la expansión y el C.B.R.

LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	EXPANSION	C.B.R.		
			%	90%	95%	100%
PROGRESIVA 2+000	A-4-(5) CL-ML	S.N.	2.90	2.60	4.40	6.20
	A-4-(5) CL-ML	0.2	2.82		5.00	
	A-4-(5) CL-ML	0.5	2.70	3.90	6.50	9.10
	A-4-(5) ML	0.75	1.90	5.70	9.20	12.70
	A-4-(5) CL-ML	1	1.50	6.40	11.20	15.90
	A-4-(5) ML	2	1.40		14.50	
	A-4-(5) ML	2.5	1.00		15.30	
<b>Media</b>			2.03	4.65	7.26	10.98
<b>Mediana</b>			2.70	4.80	6.50	10.90
<b>D. estándar</b>			0.63	1.73	2.88	4.22
<b>Varianza</b>			0.39	2.98	8.29	17.85
<b>Coefficiente de variación</b>			30.84	37.10	39.65	38.50
LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	EXPANSION	C.B.R.		
			%	90%	95%	100%
PROGRESIVA 2+500	A-4-(3) SC-SM	S.N.	2.50	3.60	5.70	7.90
	A-4-(3) SC-SM	0.2	2.40		6.00	
	A-4-(3) SM	0.5	2.20	4.50	7.10	9.70
	A-4-(3) SM	0.75	1.60	5.90	10.70	15.60
	A-4-(3) SM	1	1.20	8.00	14.20	20.50
	A-4-(3) SM	2	0.90		17.00	
	A-4-(3) SM	2.5	0.6		18.90	
<b>Media</b>			1.63	5.50	8.74	13.43
<b>Mediana</b>			2.20	5.20	7.10	12.65
<b>D. estándar</b>			0.56	1.92	3.64	5.75
<b>Varianza</b>			0.31	3.67	13.27	33.06
<b>Coefficiente de variación</b>			34.30	34.85	41.68	42.83
LUGAR	CLASIFICACION	DOSIFICACION	EXPANSION	C.B.R.		
			%	0.90	0.95	1.00
PROGRESIVA 3+000	A-6-(10) CL	S.N.	3.80	1.60	2.60	3.50
	A-6-(10) CL	0.2	3.60		3.00	
	A-6-(10) CL	0.5	3.40	1.90	3.20	4.60
	A-6-(10) CL	0.75	2.90	3.10	4.10	5.20
	A-6-(9) CL	1	2.50	3.50	5.70	8.00
	A-6-(9) CL	2	2.20		6.50	
	A-6-(9) CL	2.5	1.90		7.10	
<b>Media</b>			2.90	2.53	3.72	5.33
<b>Mediana</b>			3.40	2.50	3.20	4.90

<b>D. estándar</b>			0.53	0.92	1.24	1.92
<b>Varianza</b>			0.28	0.84	1.53	3.68
<b>Coefficiente de variación</b>			18.34	36.35	33.22	36.00
<b>LUGAR</b>	<b>CLASIFICACION</b>	<b>DOSIFICACION</b>	<b>EXPANSION</b>	<b>C.B.R.</b>		
			<b>%</b>	<b>90%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
	<b>A-6-(11) CL</b>	S.N.	3.90	1.40	2.40	3.40
<b>PROGRESIVA 3+500</b>	<b>A-6-(11) CL</b>	0.2	3.52		2.70	
	<b>A-6-(10) CL</b>	0.5	3.40	2.30	3.20	4.00
	<b>A-6-(10) CL</b>	0.75	3.00	2.20	3.70	5.20
	<b>A-6-(10) CL</b>	1	2.60	3.20	5.50	7.80
	<b>A-6-(10) CL</b>	2	2.35		6.20	
	<b>A-6-(10) CL</b>	2.5	2.15		6.70	
<b>Media</b>			3.13	2.57	3.78	5.67
<b>Mediana</b>			3.20	2.30	3.45	5.20
<b>D. estándar</b>			0.42	0.55	1.22	1.94
<b>Varianza</b>			0.17	0.30	1.49	3.77
<b>Coefficiente de variación</b>			13.34	21.46	32.33	34.28
<b>LUGAR</b>	<b>CLASIFICACION</b>	<b>DOSIFICACION</b>	<b>EXPANSION</b>	<b>C.B.R.</b>		
			<b>%</b>	<b>90%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
	<b>A-4-(7) CL</b>	S.N.	3.10	2.30	4.10	6.00
<b>PROGRESIVA 4+000</b>	<b>A-4-(7) CL</b>	0.2	2.90		4.70	
	<b>A-4-(7) CL-ML</b>	0.5	2.70	3.00	6.00	8.60
	<b>A-4-(7) CL-ML</b>	0.75	2.00	5.80	8.60	11.40
	<b>A-4-(7) ML</b>	1	1.60	6.30	10.10	14.00
	<b>A-4-(7) ML</b>	2	1.40		13.60	
	<b>A-4-(7) ML</b>	2.5	1.20		14.50	
<b>Media</b>			2.13	4.35	6.70	10.00
<b>Mediana</b>			2.70	4.40	6.00	10.00
<b>D. estándar</b>			0.63	1.99	2.57	3.46
<b>Varianza</b>			0.40	3.98	6.61	11.97
<b>Coefficiente de variación</b>			29.82	45.84	38.36	34.60
<b>LUGAR</b>	<b>CLASIFICACION</b>	<b>DOSIFICACION</b>	<b>EXPANSION</b>	<b>C.B.R.</b>		
			<b>%</b>	<b>90%</b>	<b>95%</b>	<b>100%</b>
	<b>A-6-(9) CL</b>	S.N.	3.60	2.00	2.60	3.30
<b>PROGRESIVA 4+500</b>	<b>A-6-(9) CL</b>	0.2	3.50		3.10	
	<b>A-6-(9) CL</b>	0.5	3.30	2.40	4.10	5.70
	<b>A-4-(8) CL</b>	0.75	2.80	3.00	4.90	6.80
	<b>A-4-(8) CL</b>	1	2.30	4.10	6.20	8.30
	<b>A-4-(8) CL</b>	2	2.00		7.40	
	<b>A-4-(8) CL</b>	2.5	1.80		7.90	
<b>Media</b>			2.76	2.88	4.18	6.03
<b>Mediana</b>			3.30	2.70	4.10	6.25
<b>D. estándar</b>			0.54	0.91	1.44	2.11
<b>Varianza</b>			0.30	0.84	2.07	4.44
<b>Coefficiente de variación</b>			19.70	31.80	34.39	34.96

Fuente: Elaboración propia

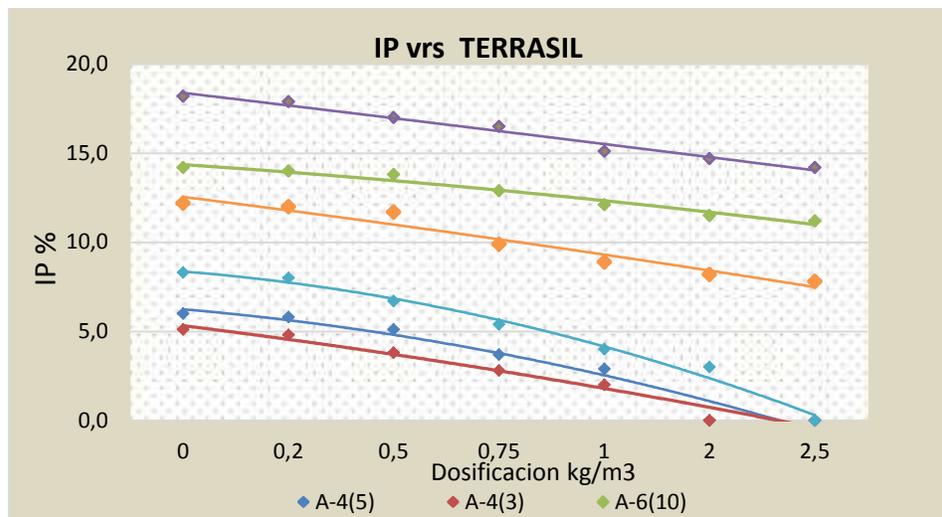
## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1. CONCLUSIONES

- La estabilización de la subrasante con el aditivo Terrasil es ventajosa ya que mejora la compactación, reduce la expansividad y aumenta la resistencia del suelo al agua.
- Se completó de manera positiva el objetivo general demostrando que la alternativa suelo-Terrasil mejora las propiedades físicas y mecánicas aumentando la compactación y reduciendo la humedad.
- Se utilizó dosificaciones de 0.2 kg/m<sup>3</sup> a 2.5 kg/m<sup>3</sup> de terrasil saliendo de especificaciones ya que en la ficha técnica del producto terrasil está entre 0.2 a 2.0 kg/m<sup>3</sup>; se hizo esta investigación para ver el comportamiento de los suelos con más altas dosificaciones. Se llegó la conclusión que se tiene muy buenos resultados pero con las dosificaciones 0.75 y 1.0 kg/m<sup>3</sup> ya se cumple con la norma para subrasante y con la dosificación de 2.5 kg/m<sup>3</sup> sería un presupuesto más elevado su costo.
- En los tipos de suelos estudiados se puede ver que a medida que se va aumentando la dosificación de Terrasil va disminuyendo su plasticidad. Entre un 2% hasta un 61%.

Índice de plasticidad vs Terrasil



Fuente: Elaboración propia

- En el ensayo de compactación de las mezclas con Terrasil se observó que a cada dosificación de Terrasil la densidad va en aumento y disminuyendo la humedad.

En los suelos A-4(5) va de una densidad de 1934 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1967 kg/ m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. A medida que aumenta la dosificación de terrasil la densidad máxima seca llega a tener un incremento de 1% a 3% respecto al suelo natural.

A-4(3) va de una densidad de 1941 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1972 kg/m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2% respecto al suelo natural. Siendo uno de los suelos con mejor comportamiento.

A-6(10) va de una densidad de 1885 kg/ m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1919 kg/ m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.4% a 1.8% respecto al suelo natural.

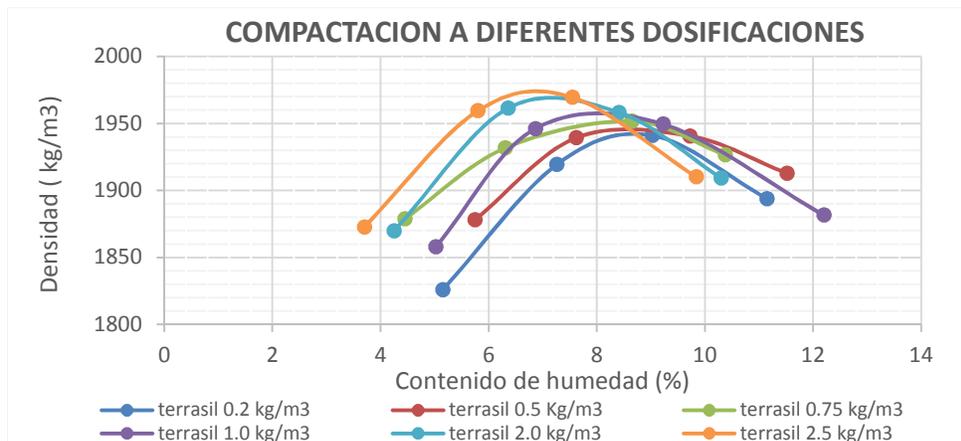
A-6(11) va de una densidad de 1815 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1839 kg/ m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 1.5% respecto al suelo natural.

A-4(7) va de una densidad de 1922 kg/m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1953 kg/ m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2% respecto al suelo natural.

A-6(9) va de una densidad de 1902 kg/ m<sup>3</sup> al 0.2 kg/m<sup>3</sup> hasta 1933 kg/ m<sup>3</sup> a un 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil. Tiene un incremento de 0.5% a 2.2% respecto al suelo natural.

Se tuvo excelentes resultados con los tipos de suelos A-4 ya que se incrementó la densidad y reduciendo la humedad cumpliendo con especificaciones para una subrasante y a lo contrario sucedió con el suelo A-6 su mejoría no fue tan notorio no cumpliendo con rangos especificados.

Compactación vs Terrasil

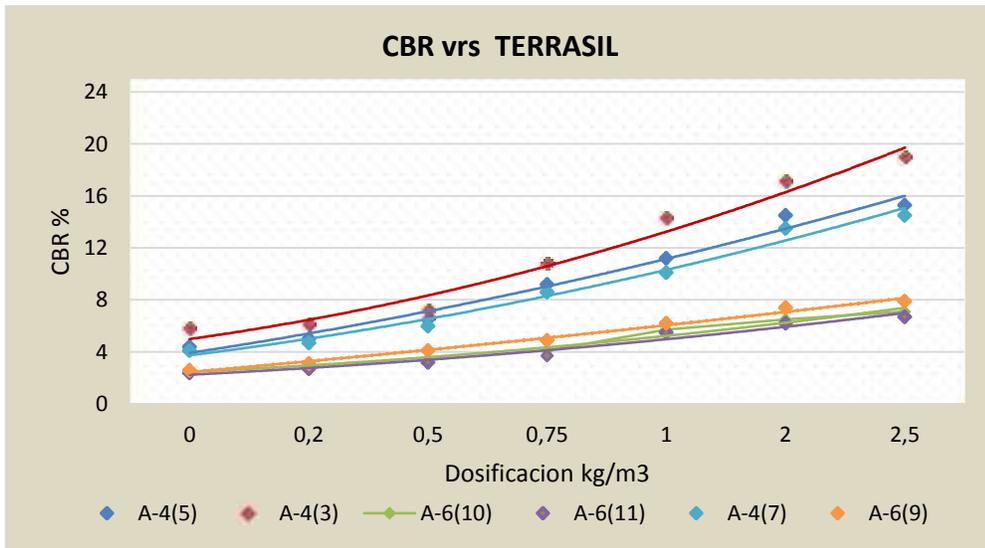


Fuente: Elaboración propia

- Se tuvo muy buenos resultados con respecto al incremento del CBR del suelo natural, ya se tiene valores de **A-4(5)** de 5.0 a 15.3 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup>, **A-4(3)** de 6.0 a 18.9 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup> y **A-4(7)** de 4.7 a 14.5 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup>; cumpliendo con los especificaciones de CBR para subrasantes mayor a 10% al 95% logrando aumentar el CBR con las dosificaciones de Terrasil a los siete días de curado a la intemperie.

En los suelos A-6 se tiene valores de **A-6(10)** de 3.0 a 7.1 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup>, **A-6(11)** de 2.7 a 6.7 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup> y **A-6(9)** de 3.1 a 7.9 % CBR al 95% con dosificaciones de terrasil entre 0.2 – 2.5 kg/m<sup>3</sup> a los siete días de curado en la intemperie, no cumpliendo con especificaciones para una subrasante. Teniendo como mejor comportamiento es el tipo de suelos A-4.

CBR (%) vs Terrasil



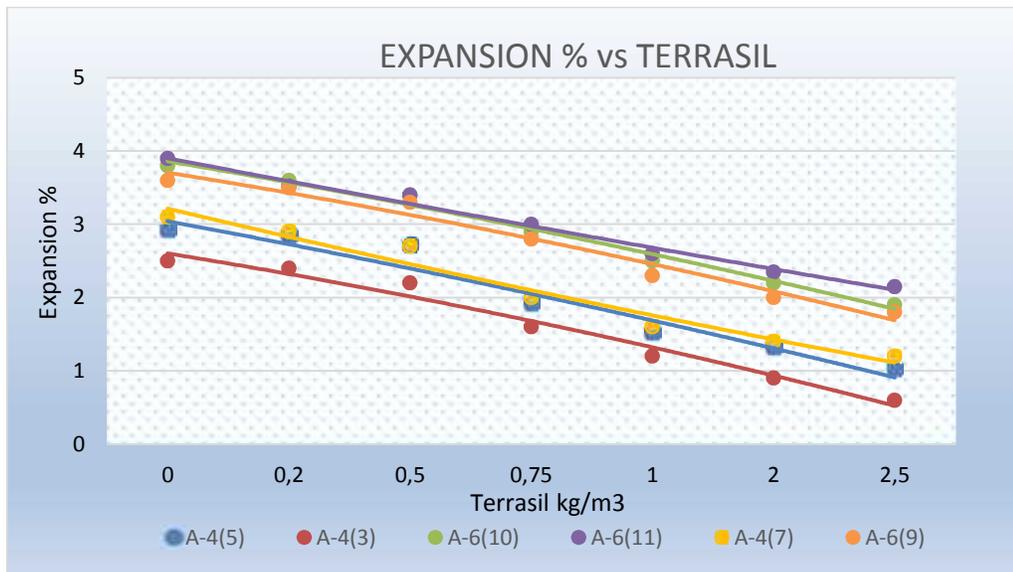
Fuente: Elaboración propia

- La capacidad portante del material de subrasante se incrementó casi 4 veces más de lo del material natural, de 5.5% a 254% de los suelos **A-4** y 12.5% a 203.85% de los suelos **A-6**

Por especificaciones para una subrasante CBR mayor a 10% el suelo A-4 cumple y no sucede lo mismo A-6 aunque tuvo incremento con terrasil respecto al suelo natural.

- Los resultados de la expansión nos muestran que los suelos reaccionaron favorablemente a mayor contenido de Terrasil, respecto al natural como se puede observar en la gráfica. Se observa que en los suelo A-4 su expansividad reduce mucho mejor, respecto al suelo A-6. El suelo de mejor comportamiento se tiene A-4(3) teniendo expansión natural 2.5% y con una dosificación de 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil una expansión de 0.6 %.

Expansión vs Terrasil



Fuente: Elaboración propia

- Se podrá obtener una disminución de costos, ya que se mejora la subrasante con el aditivo Terrasil mejorando la resistencia del suelo.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para realizar el muestreo en campo hay que tener en cuenta la metodología que se encuentra en las normas de ABC, ya que existe factores importantes con la humedad natural y densidad.
- En base a todos los estudios realizados sobre la mezcla suelo-Terrasil, se sugiere que para los suelos A-4 se colóquenla combinación de 0.2 kg/m<sup>3</sup> y 2.5 kg/m<sup>3</sup> de Terrasil ya que con esta dosificación ya cumple y sobrepasa el requerimiento para una subrasante dado por especificaciones. Pero si se quiere elevar la resistencia para los suelos que no cumplan se puede realizar combinaciones superiores.
- Se recomienda para los tipos de suelos A-6 aumentar las dosificaciones con terrasil y si es necesario con otro tipo más de material para poder mejorar y economizar costos ya que dio valores más bajos respecto a los otros tipos de suelos.
- Es necesario realizar ensayos en laboratorio para verificar el comportamiento de los materiales a tratar, para realizar un diseño preliminar de pavimento y encontrar las dosificaciones óptimas de cada uno de los materiales estabilizadores para cada tipo de suelo.