

INTRODUCCIÓN

Los subdrenes son elementos constructivos que tienen como finalidad evacuar las aguas que se introducen por infiltración, a través del material granular drenante del cual están compuestos, éstos pueden ser construidos con material granular y material granular con geotextil y son aplicados principalmente en carreteras evacuando las aguas por infiltración aumentando el tiempo de vida útil.

En 1999 una investigación realizada en la Pontificia Universidad Javeriana relacionada con el estudio parcial de subdrenes el cual es “Diseño Racional De Elementos Filtrantes Para Sistemas De Subdrenaje”, se evaluaron sólo fenómenos que afectan a los sistemas de drenaje a largo plazo, la variación de la permeabilidad del sistema con el paso del tiempo. Los ensayos fueron realizados para observar el impacto de diferentes tipos de suelo y su afectación en la permeabilidad del filtro o geotextil.

Al haber estudios parciales sobre esta investigación el autor propone realizar una comparación experimental en laboratorio de la funcionalidad de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil a través de ensayos en laboratorio de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan, variando las características del material de cobertura.

La aplicación de este trabajo de investigación experimental permitirá comparar la funcionalidad de subdrenes granulares con los subdrenes granulares con geotextil, que se traducirá en definir las ventajas y desventajas que presentan estas alternativas constructivas de subdrenes en carreteras.

DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.

1.1.1. Determinación de línea de estudio.

Comparación experimental en la funcionalidad de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil a través de las características de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan para definir ventajas y desventajas en función al tiempo de vida útil.

1.1.2. Breve descripción de causales identificados.

El drenaje subterráneo tiene por objeto disminuir las presiones de poro o impedir que éstas aumenten.

La cantidad de agua recolectada por un sistema de subdrenaje depende de la permeabilidad de los suelos o rocas y de los gradientes hidráulicos. Cuando se instala un dren generalmente, el nivel piezométrico se disminuye al igual que el gradiente hidráulico, lo cual disminuye el caudal inicial recolectado por los drenes.

Los subdrenes interceptores son zanjas excavadas a mano o con retroexcavadora, rellenas de material filtrante y elementos de captación y transporte del agua. La profundidad máxima de estas zanjas es de aproximadamente seis metros. Los hay de diversas formas así:

Con material de filtro y tubo colector.

Con material grueso permeable sin tubo (filtro francés)

Con geotextil como filtro, material grueso y tubo colector.

Con geotextil, material grueso y sin tubo.

Tubo colector con capa gruesa de geotextil a su alrededor.

Dren sintético con geomalla, geotextil y tubo colector

El tipo de dren interceptor a emplear dependerá de:

Disponibilidad de materiales en la región y costos.

Necesidad de captación y caudal del dren.

1.1.3. Identificación del objeto de estudio.

Objeto de estudio.

Funcionalidad de los subdrenes granulares con y sin la utilización de geotextil.

1.1.4. Determinación de la perspectiva de solución.

Determinación de perspectiva.

Comparación de subdrenes granulares con y sin geotextil de acuerdo a características de los materiales de cobertura a ser usados en su construcción.

1.2. SITUACIÓN PROBLÉMICA.

1.2.1. Conceptualización puntual del objeto de estudio.

La funcionalidad es el comportamiento de los subdrenes durante la etapa de funcionamiento el cual es identificado a través del caudal que puede circular por los subdrenes.

1.2.2. Descripción del fenómeno ocurrido.

El mal funcionamiento de las obras de subdrenaje provoca fallas en una carretera, debido a la infiltración del agua sub superficial que satura el suelo y la presión de los poros, esto produce un deterioro, afectando su comportamiento relacionado con la presencia de agua.

1.2.3. Breve explicación de la perspectiva de solución.

Con la utilización del geotextil en subdrenes granulares se evitara la colmatación del material drenante del subdren por lo cual se prevé que su vida útil aumente en comparación con los subdrenes granulares sin geotextil.

1.3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.

1.3.1. Problema de investigación.

¿Cuál es el comportamiento en cuanto a la funcionalidad de los subdrenes granulares con y sin geotextil para poder determinar las ventajas y desventajas de su uso en función al tiempo de vida útil?

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo general.

Comparar la funcionalidad de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil a través de ensayos en laboratorio variando las características del material de cobertura a usar, para definir las ventajas y desventajas en función al tiempo de vida útil.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Caracterizar las propiedades mecánicas del material granular drenante del subdren según norma ASSTHO y ASTM.
- Analizar las características de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil.
- Definir el tipo de subdren a ser trabajado en función a la permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan.
- Definir ventajas y desventajas en función al tiempo de vida útil.
- Elaborar conclusiones y recomendaciones sobre la funcionalidad de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil.

1.5. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS.

1.5.1. Hipótesis.

Comparando el comportamiento de los subdrenes granulares con los subdrenes granulares con geotextil se podrán determinar su funcionalidad a través de sus características de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan, lo cual permitirá para definir las ventajas y desventajas en función al tiempo de vida útil y costo de construcción.

1.5.2. Identificación de variables.

Variable dependiente.

Funcionalidad de los subdrenes granulares con y sin la utilización de geotextil.

Variables independientes.

Permeabilidad.

Colmatación.

Porcentaje de partículas que pasan.

1.5.3. Conceptualización y operacionalización de las variables.**Conceptualización de variables.****Variable dependiente.****Funcionalidad de los subdrenes granulares con y sin la utilización de geotextil.**

Es el comportamiento de los subdrenes durante la etapa de funcionamiento el cual es identificado a través del caudal que puede circular por los subdrenes, para esto se realizan los ensayos de permeabilidad colmatación y porcentaje de partículas que pasan para los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil.

Variables independientes.**Permeabilidad.**

Definimos permeabilidad como la capacidad de un suelo para permitir el paso de un fluido sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo. Dicha propiedad se determina objetivamente mediante la imposición de un gradiente hidráulico en una sección del cuerpo, y a lo largo de una trayectoria determinada. La permeabilidad se cuantifica en base al coeficiente de permeabilidad, definido como la velocidad de traslación del agua en el terreno y para un gradiente unitario. Son muchos factores que afectan la permeabilidad entre estos esta la viscosidad y granulometría. El coeficiente de permeabilidad se obtendrá a través de los ensayos en laboratorio.

Colmatación.

La colmatación resulta cuando partículas finas de suelo penetran dentro del suelo, bloqueando sus canales de poros, produciendo una reducción significativa de la permeabilidad.

La colmatación del geotextil depende de la distribución del tamaño del grano del suelo base, por esta razón, para suelos finos la cantidad de partículas que quedan retenidas en el geotextil es mayor que para suelos granulares debido a esto, la porosidad del geotextil se ve disminuida cuando se utilizan suelos finos en el sistema de filtración y por ende la colmatación del mismo aumenta, sin afectar la permeabilidad del sistema.

Para la evaluación de los criterios de colmatación, la mayoría de los autores tienen en cuenta una serie de parámetros que no cuantifican verdaderamente el potencial de colmatación en los filtros, puesto que el aspecto fundamental a tener en cuenta es la porosidad, ya que ésta establece la cantidad de partículas de suelo que quedan retenidas en el geotextil permitiendo que a pesar de esto se mantenga el flujo de agua, siendo éste el factor de mayor importancia para la evaluación del criterio de colmatación.

Porcentaje de partículas que pasan.

Definimos porcentaje de partículas que pasan como la cantidad de material que pasa hacia el material granular drenante esto se determinará a través del peso de suelo seco que pasa hacia el material drenante y del tipo de suelo a través de los ensayos de granulometría.

Operacionalización de las variables.

Tabla 1.1 Operacionalización de las variables.

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Funcionalidad de los subdrenes granulares con y sin la utilización de geotextil	Permeabilidad	Tiempo	El tiempo que tarda el agua en recorrer la muestra a un volumen determinado
		Granulometría	Tamaño de partículas a ser usada como material drenante
	Colmatación	Relación de vacíos	Identificar pesos específicos
	Porcentaje de partículas que pasan	Cantidad de suelo que pasa	Masa de suelo que pasa
		Tipo de suelo que pasa	Tamaño de partículas

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Permeabilidad	Tiempo	El tiempo que tarda el agua en recorrer la muestra a un volumen determinado	Según el tiempo y el volumen se obtiene el caudal Q(cm ³ /seg)
	Granulometría	Tamaño de partículas a ser usada como material drenante	Partículas con tamaños comprendidos entre el tamiz 3" y tamiz 3/8"

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Colmatación	Relación de vacíos	Identificar pesos específicos	En función a pesos y volúmenes de la muestra

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/Acción
Porcentaje de partículas que pasan	Cantidad de suelo que pasa	Masa de suelo que pasa	Peso Seco (kg.)
	Tipo de suelo que pasa	Tamaño de partículas	Granulometría Mecánica

Fuente: Elaboración Propia

1.6. IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DEL DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

Esta investigación es explicativa porque compararemos la funcionalidad de los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil a través de la permeabilidad colmatación y porcentaje de partículas que pasan.

1.6.1. UNIDADES DE ESTUDIO Y DECISIÓN MUESTRAL.

1.6.1.1. Unidad de estudio o muestreo.

Los únicos elementos que brindan información sustancial para la investigación, son los ensayos a los materiales ya sea de forma individual o mezclados.

Unidad de muestreo = Ensayos de laboratorio.

1.6.1.2. Población y muestra.

Población.

Existe una variedad o poblaciones de ensayos relacionados al área de esta investigación.

Población = Subdrenes Granulares.

Muestra.

Se seleccionan los ensayos de acuerdo a lo estipulado en nuestras variables.

Muestra = Subdrenes granulares con y sin geotextil.

1.6.1.3 Tamaño de muestra.

Margen de error.

El margen de error para esta investigación será del $\pm 5\%$ el cual será la tolerancia de la veracidad de los datos.

Confiabilidad.

La confiabilidad para esta investigación será de 95%

Tabla 1.2 Confianza.

Confianza %	50	75	80	85	90	95	96	97	98	99
Z	0.574	1.15	1.28	1.44	1.64	1.96	2.05	2.17	2.33	2.58

Fuente: Elaboración Propia

Varianza.-

$$\sigma^2 = 0.1$$

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

$$n = \frac{1,96^2 * 0,1}{0,05^2}$$

$$n = 154 \text{ Ensayos}$$

Tabla 1.3 Tamaño de muestras.

Ensayos	Ni	r2	Ni*r2	Wr	ni	ni
Etapas de recopilación de datos						
Clasificación de suelos	3	0,1	0,3	0,0194	1,5	3
Granulometría agregado grueso	3	0,1	0,3	0,0194	1,5	3
Granulometría agregado fino	3	0,1	0,3	0,0194	1,5	3
Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Ensayo de solidez en sulfatos	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Determinación de la cantidad de partículas livianas en los agregados pétreos	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Determinación n del contenido de materia orgánica	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Determinación del límite líquido	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Determinación del índice de plasticidad	1	0,1	0,1	0,0064	0,5	1
Etapas de resultados						
Ensayo de permeabilidad	46	0,1	4,6	0,2987	23	30
Ensayo de colmatación	46	0,1	4,6	0,2987	23	30
Granulometría mecánica e hidrómetro	46	0,1	4,6	0,2987	23	30
	154		15,4			106

Fuente: Elaboración Propia

$$n = \frac{15,4}{154 * \left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{15,4}{154}}$$

$$n = 77 \text{ Ensayos}$$

1.6.1.4. Selección de las técnicas de muestreo.

Muestreo estratificado.

El muestreo estratificado es un procedimiento de muestreo en el que el objetivo de la población se separa en segmentos exclusivos, homogéneos (estratos), y luego una

muestra aleatoria simple se selecciona de cada segmento (estrato). Las muestras seleccionadas de los diversos estratos se combinan en una sola muestra.

1.7. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS LÓGICOS.

1.7.1. Listado de actividades a realizar.

Lista de actividades.

Tabla 1.4 Lista de actividades.

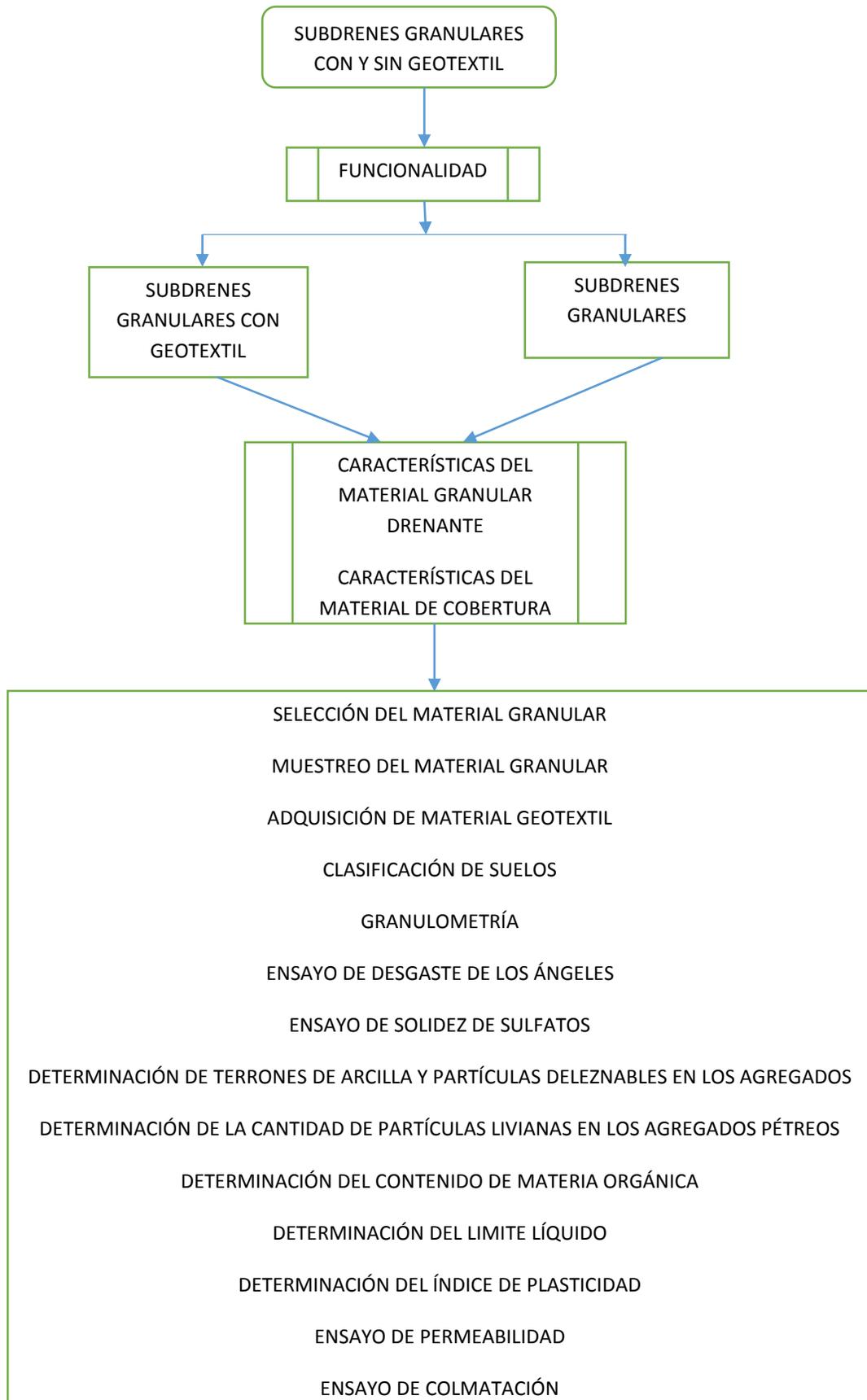
	Actividad
A	Selección del material granular
B	Muestreo del material granular
C	Adquisición del material geotextil
D	Clasificación de suelos
E	Granulometría
F	Ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles
G	Ensayo de solidez en sulfatos
H	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados
I	Determinación de la cantidad de partículas livianas en los agregados pétreos
J	Determinación n del contenido de materia orgánica
K	Determinación del límite líquido
L	Determinación del índice de plasticidad
M	Ensayo de permeabilidad
N	Ensayo de colmatación
Ñ	Análisis y cálculo de los resultados de laboratorio
O	Elaboración del documento en borrador de la tesis
P	elaboración final de la tesis con documentación de los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones
Q	Impresión de la tesis

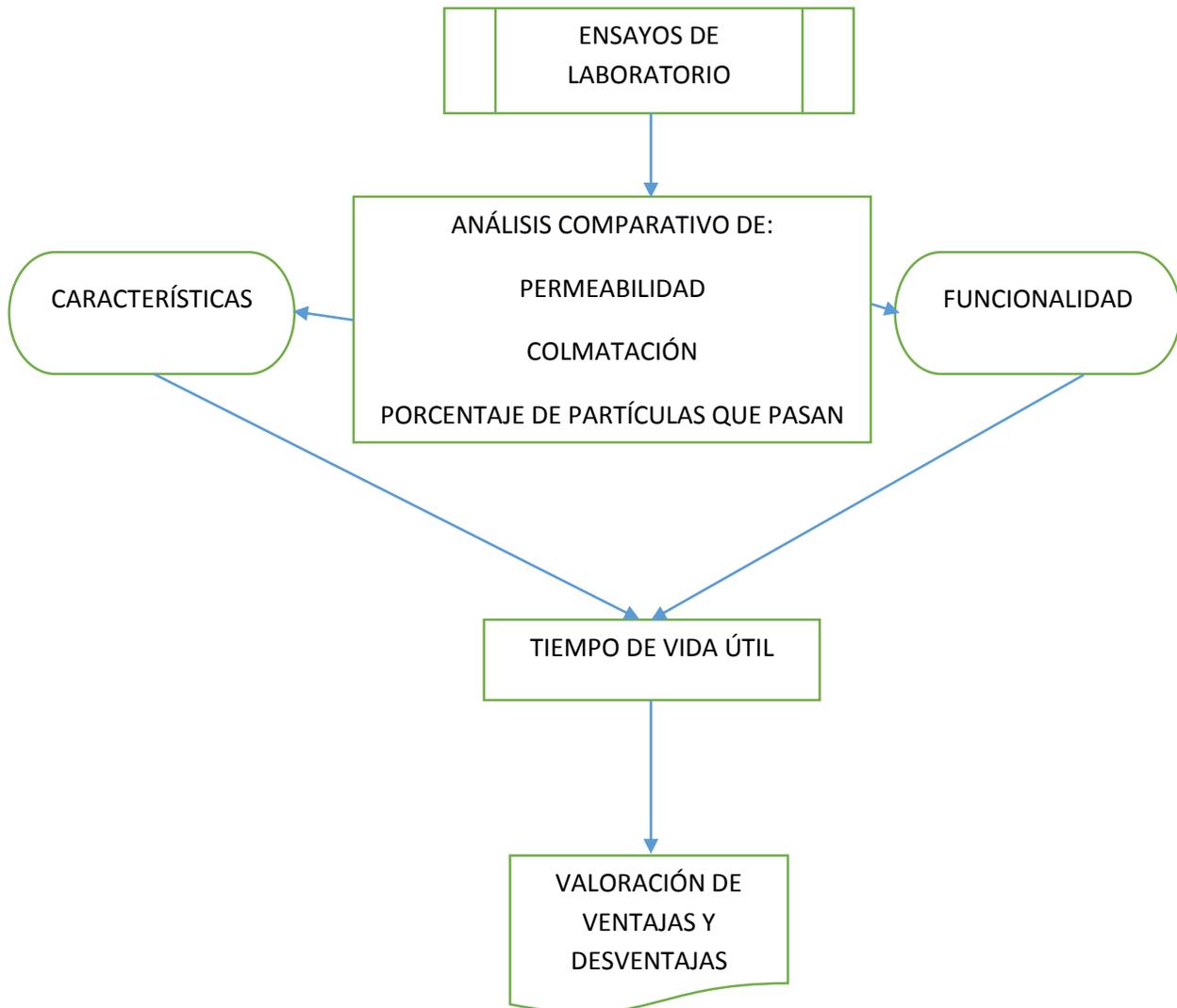
Fuente: Elaboración Propia

1.7.2. Esquema de actividades en función a procedimiento definido por la perspectiva.

Definición del método según perspectiva.

Tabla 1.5 Definición del método según perspectiva.





Fuente: Elaboración Propia

1.8. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO.

1.8.1. Selección de programa a utilizar.

El tratamiento estadístico de los resultados de la investigación se lo realizará a través del programa STATGRAPHIC, MINITAB, SPSS, SAS.

1.8.2. Estadística descriptiva.

La variable funcionalidad que será medida a través del caudal se realizará un análisis estadístico descriptivo a través de:

Análisis de frecuencias: Absolutas, relativas, absoluta acumulada, relativa acumulada.

Se realizara una tabla de frecuencias para hacer la presentación de datos provenientes de las observaciones realizadas en los ensayos de permeabilidad colmatación y porcentaje de partículas que pasan, estableciendo un orden mediante la división en ensayo y registro de la cantidad de observaciones correspondientes a cada ensayo.

Los pasos para diseñarla son:

Se localizan el computo más alto y el más bajo de la serie de datos.

Se encuentra la diferencia entre esos dos cómputos.

La diferencia obtenida se divide entre números nones tratando de encontrar un cociente cercano a 15 pero no mayor. Lo anterior indica cuantas clases va a tener la distribución de frecuencias agrupadas y cuál va a ser la magnitud del intervalo de clase.

Se determina el primer intervalo de clase y posteriormente se van disminuyendo los límites del intervalo de clase de acuerdo al valor de la magnitud establecida previamente.

Medidas de tendencia central: moda, media y mediana.

Las medidas de tendencia central serán útiles para encontrar indicadores representativos de datos obtenidos en los ensayos de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan. Los tres métodos que permiten obtener el punto medio de una serie de datos son la media, la mediana y la moda.

Media Aritmética.

Medida de tendencia central que se define como el promedio o media de un conjunto de observaciones o puntuaciones. En aquellas situaciones en que la población de estudio es pequeña suele utilizarse la media poblacional mediante la expresión:

$$\mu = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{N}$$

Donde:

μ = Media poblacional

ΣX_i = Sumatoria de las puntuaciones

N = Número de casos

La Moda.

En una serie de puntuaciones se denomina moda a la observación que se presenta con mayor frecuencia.

$$M_o = L_{m_o} + \left[\frac{D_a}{D_a + D_b} \right] * i$$

Donde:

M_o = Moda

L_{m_o} = Límite inferior del intervalo de clase modal

D_a = Diferencia entre la frecuencia de la clase modal y la de la clase que la precede.

D_b = Diferencia entre la frecuencia de la clase modal y la de la clase que la sigue.

i = Intervalo de clase.

La Mediana.

También conocida como media posicional en virtud de que se localiza en el centro de un conjunto de observaciones presentadas en una serie ordenada de datos. Lo anterior sugiere que el 50 % de los casos se encuentra por encima de la mediana y el resto por

debajo de ella. La posición central de la mediana se obtiene mediante la expresión matemática.

$$Md = \left[\frac{\frac{N}{2} - FA}{FS} \right] * i$$

Donde:

Md = Mediana

N = Número de casos.

FA = Frecuencia agrupada.

FS = Frecuencia del intervalo adyacente superior.

Medidas de dispersión: Desviación estándar y varianza.

Se utilizará medidas de dispersión las cuales son índices que se utilizan para describir una distribución de frecuencias a partir de la variación de los valores obtenidos en laboratorio. Los índices más utilizados son la varianza y la desviación estándar.

La Varianza.

La varianza es una medida de variabilidad que toma en cuenta el 100 % de las puntuaciones de manera individual. La definición matemática de la varianza se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma^2 = \frac{\sum X^2}{N}$$

Donde:

σ^2 = Varianza.

Σ = Suma de

X^2 = Desviación de las puntuaciones de la media (X-X)

N = Número de casos.

La Desviación Estándar.

Dada la dificultad inherente de interpretar el significado de una varianza en virtud de que expresa valores elevados al cuadrado, para efectos de investigación es más adecuado utilizar la desviación estándar o desviación típica, definida como la raíz cuadrada de la varianza. La desviación estándar se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N}}{N}}$$

SUBDRENES GRANULARES CON Y SIN GEOTEXTIL

2.1. SUBDRENES.

Los subdrenes son zanjas excavadas a mano o con retroexcavadora, rellenas de material filtrante y elementos de captación y transporte del agua.

Este sistema consiste en construir una zanja a determinada profundidad, la cual es rellena con material filtrante. Frecuentemente se introduce en el fondo una tubería perforada con lo cual los excesos de agua serán captados por el medio filtrante y conducidos a la tubería, que llevará el agua por gravedad a un lugar de descarga adecuado.

Existen diferentes tipos de zanjas y su empleo depende de la necesidad de captación, la disponibilidad de los materiales y el costo:

Con material grueso permeable sin tubo (Dren Francés)

Con material de filtro y tubo colector

Con Geotextil como filtro, material grueso y tubo colector

Con Geotextil, material grueso y sin tubo

Tubo colector con capa gruesa de Geotextil a su alrededor

Dren sintético con geomalla y tubo colector (cuando hay dificultad para obtener materiales granulares naturales adecuados para el dren).

Generalmente, los sistemas de subdrenes se utilizan en los siguientes casos:

Colocado longitudinalmente a los pies de los taludes de cortes que vierten hacia la carretera para interceptar filtraciones.

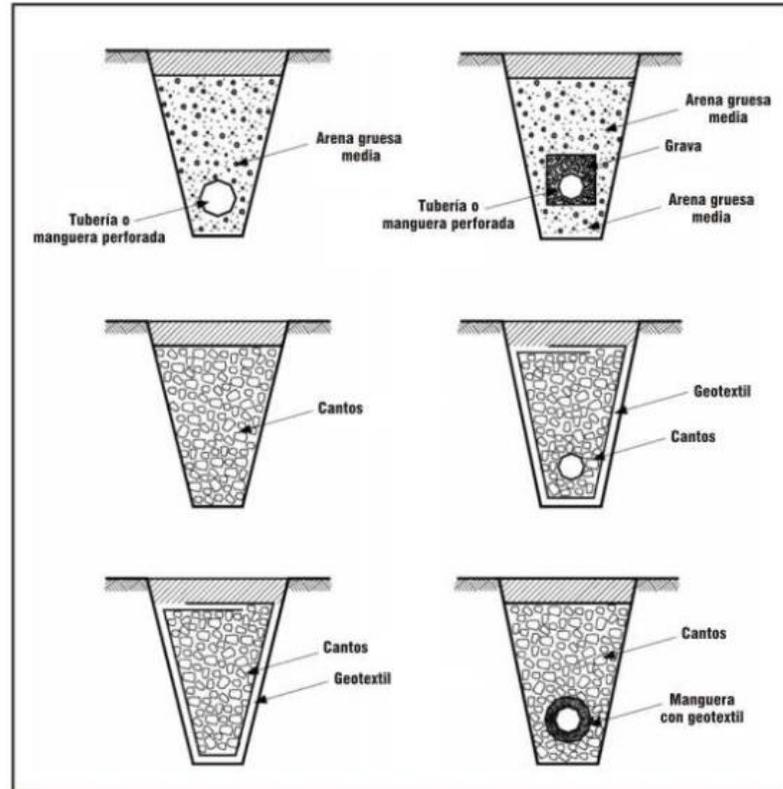
Longitudinalmente en un terraplén, ubicado en el lado desde donde fluye el agua subterránea.

Longitudinalmente bajo la subbase de la carretera para sanear el área.

Transversalmente en las transiciones de corte a terraplén para sanear la subbase y evitar la saturación de la superficie de contacto entre el terraplén y el terreno natural.

Formando parte de un sistema con drenes transversales y longitudinales o dispuestos como una espina de pescado, a fin de sanear en general la faja del camino.

Figura 2.1 Tipos de subdrenes.



Fuente: Manual técnico de Hidrología y Drenaje de ABC.

2.2. MATERIAL DE FILTRO.

Es conveniente tener en cuenta que los drenes tratan de taponarse por transporte y deposición de las partículas más finas del suelo. Para evitar este fenómeno se debe colocar un filtro que debe cumplir los siguientes objetivos:

Impedir el paso de las partículas finas del suelo a proteger.

Permitir la filtración rápida del agua.

Existen dos tipos generales de filtro.

Material granular natural filtrante.

Filtro de mantos sintéticos o geotextiles.

Se requiere escoger muy cuidadosamente el material de filtro y / o el tipo y calidad del geotextil a emplear.

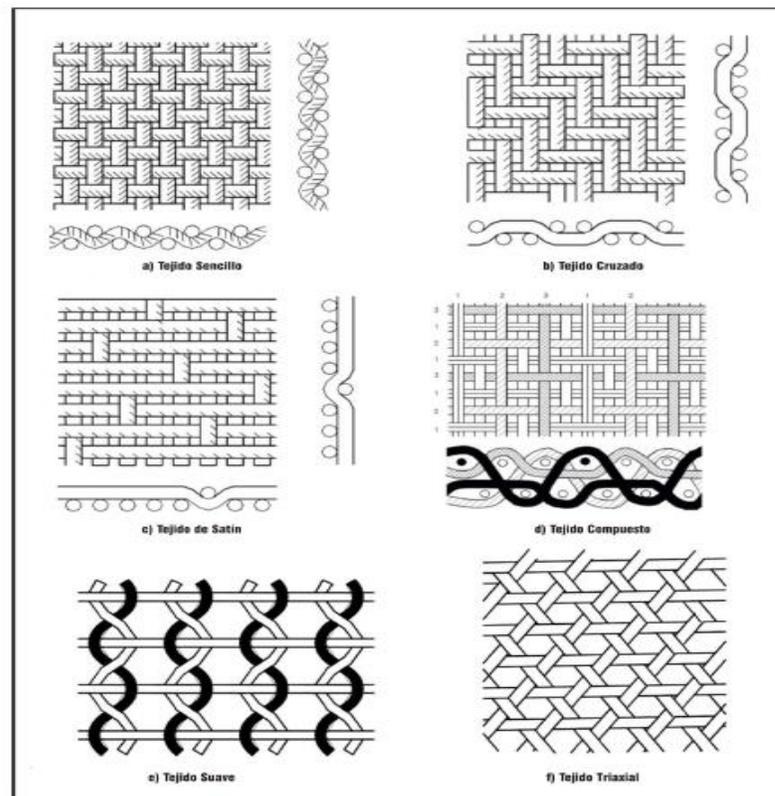
2.3. FILTROS DE GEOTEXTIL.

Los geotextiles son telas permeables, filtrantes, construidas con fibras sintéticas, especialmente polipropileno, poliéster, nylon y polietileno. Los geotextiles generalmente, se clasifican en tejidos y no tejidos.

Los geotextiles más utilizados para filtro son los no tejidos, entre los cuales se deben diferenciar los perforados con alfileres, los pegados al calor y los pegados con resinas, aunque es común encontrar mezclas de los tres procesos de manera combinada.

La durabilidad de los geotextiles está en función de las fibras poliméricas y las resinas a los ataques ambientales. Los principales problemas de las telas filtrantes corresponden a su baja resistencia a la exposición a los rayos solares, los cuales las descomponen, a las altas temperaturas y a ciertos químicos.

Figura 2.2 Tipos de tejidos en geotextiles.



Fuente: Manual técnico de Hidrología y Drenaje de ABC.

2.4. DISEÑO DE SUBDRENES TIPO ZANJA.

El diseño de los drenes de zanja se basa por lo general, en el criterio del ingeniero. Un diseño común consiste en zanjas espaciadas cada 15 o 30 metros, usualmente, en forma de Espina de Pescado. La profundidad de los drenes franceses normalmente varía de 30 a 50 cm y el ancho de 60 cm a un metro.

El diseño de subdrenes de zanja tiene por objeto determinar los siguientes elementos:

- Profundidad y ancho de la zanja
- Espaciamiento entre zanjas
- Localización en planta de los subdrenes
- Material filtrante y especificaciones
- Cálculo de caudales colectados
- Sistemas de recolección y entrega

Existen dos enfoques diferentes para el diseño:

2.4.1. Procedimiento empírico

Este sistema se basa en la experiencia anterior de un experto conocedor del comportamiento del agua en los suelos del sitio. La profundidad, espaciamiento y demás características del subdrenaje se realiza exclusivamente basado en el conocimiento previo del experto, conjuntamente con un estudio geotécnico que incluye ensayos de Permeabilidad del suelo.

2.4.2. Procedimiento analítico

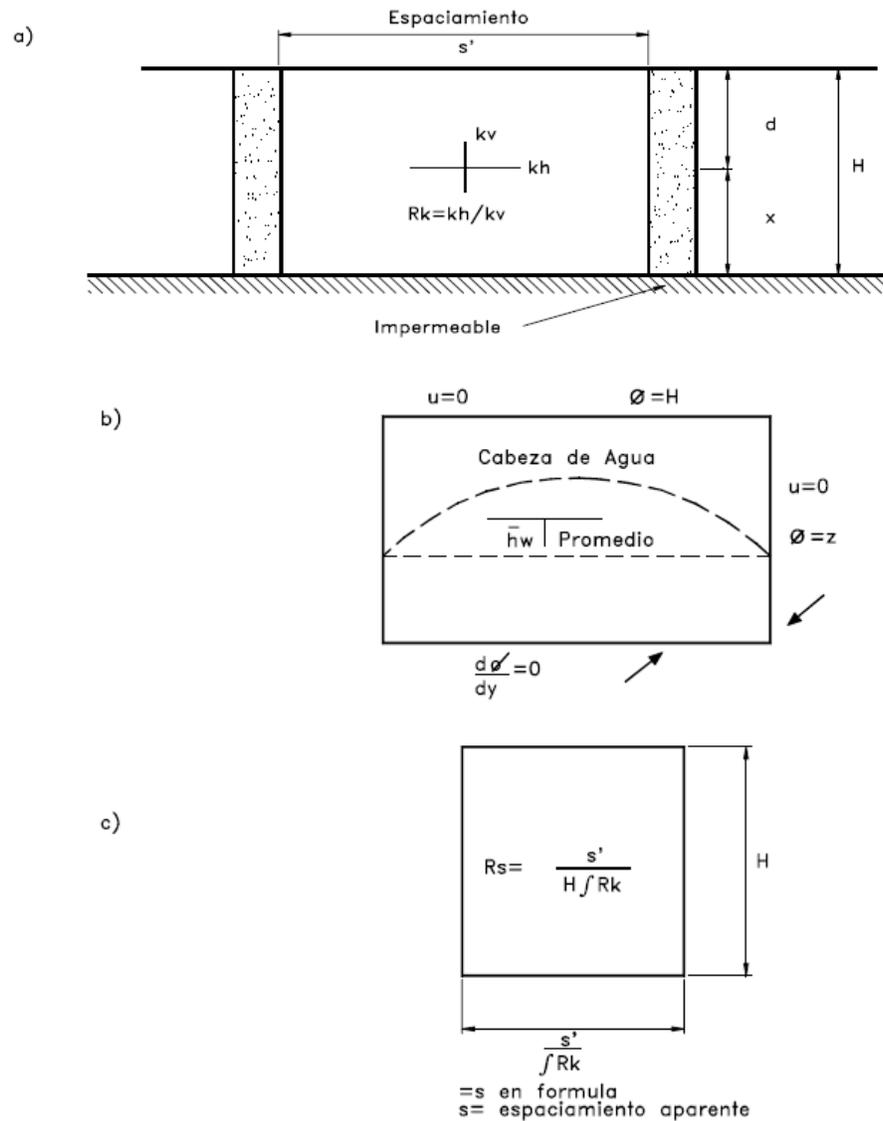
En este sistema el diseño se basa en un modelo matemático, similar a una red de flujo donde se calcula los efectos para diferentes profundidades de drenes.

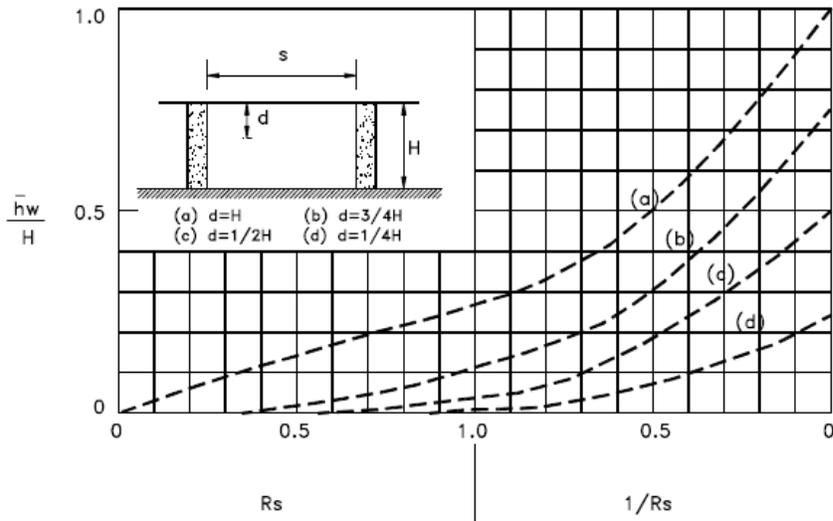
La combinación de sistemas empíricos y analíticos con un conocimiento lo más detallado posible de las características del sistema de agua subterránea es probablemente, la mejor alternativa para el diseño.

A continuación se presenta un método sencillo de análisis propuesto por Bromhead

(1984), en el cual se determina la disminución promedio de la presión de poros con el espaciamiento entre drenes, utilizando la tabla que se muestra en la figura 2.3.

Figura 2.3 Disminución promedio de la presión de poros con el espaciamiento entre drenes.





Fuente: Variación de la presión de poros promedio con el espaciamiento de subdrenes de zanja, Bromhead, (1984).

2.5. FLUJO DE AGUA HACIA LOS SUBDRENES.

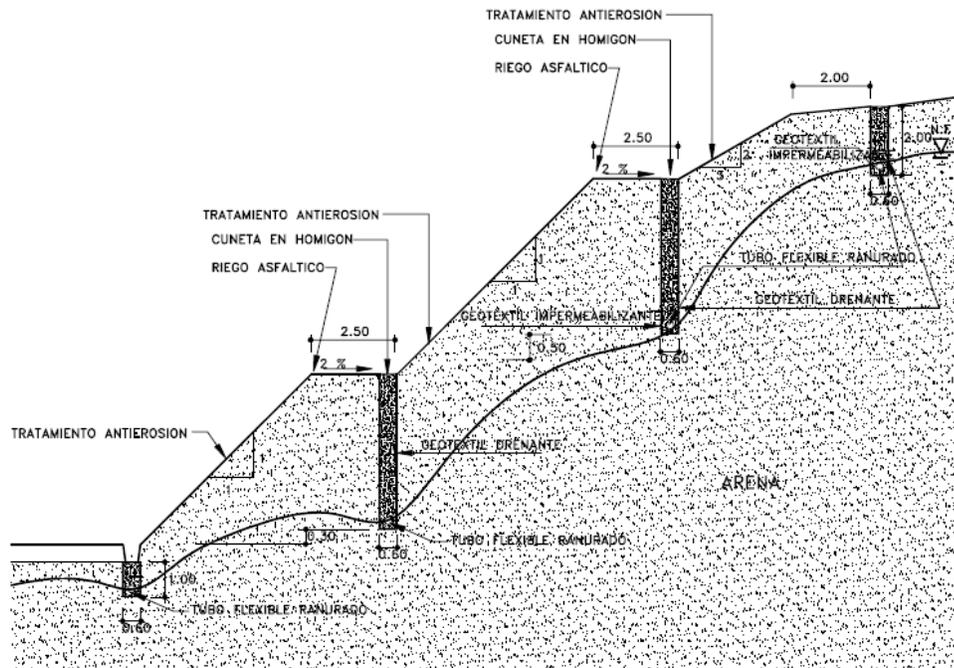
Las teorías de redes de flujo pueden utilizarse para el diseño de sistemas de subdrenaje en suelos homogéneos, pero en materiales residuales el diseñador debe tener un conocimiento muy claro de la estructura geológica, en especial de la presencia de mantos, discontinuidades o zonas de alta permeabilidad. Al colocar un subdren se está colocando un punto de presión atmosférica dentro de una masa de suelo con agua a una presión superior. El efecto inmediato es la generación de un flujo de agua hacia el dren debido a la diferencia de cabeza hidrostática.

El paso siguiente al flujo de agua inicial es la disminución de la presión de poros en una distancia de influencia a lado y lado del subdren, la cual depende de la permeabilidad del suelo. En suelos arcillosos esta distancia de influencia es menor que en suelos granulares. El producto final es una nueva línea de nivel freático con puntos de inflexión en los sitios de subdren (Figura 2.4).

Para un suelo uniforme se puede obtener una solución analítica, incluyendo otros efectos como es la infiltración debida a la precipitación y se pueden obtener las redes de flujo para calcular los caudales y las presiones (Figura 2.5). El cálculo de caudales

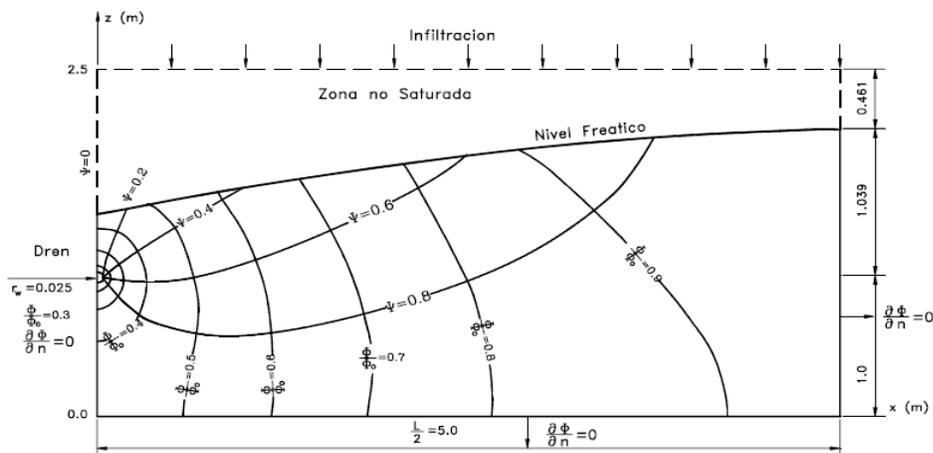
y el diseño del espaciamiento entre drenes requiere de un análisis geotécnico muy completo del comportamiento del agua en el suelo del sitio.

Figura 2.4 Subdrenes en taludes saturados de suelo arenoso y su efecto sobre el nivel freático.



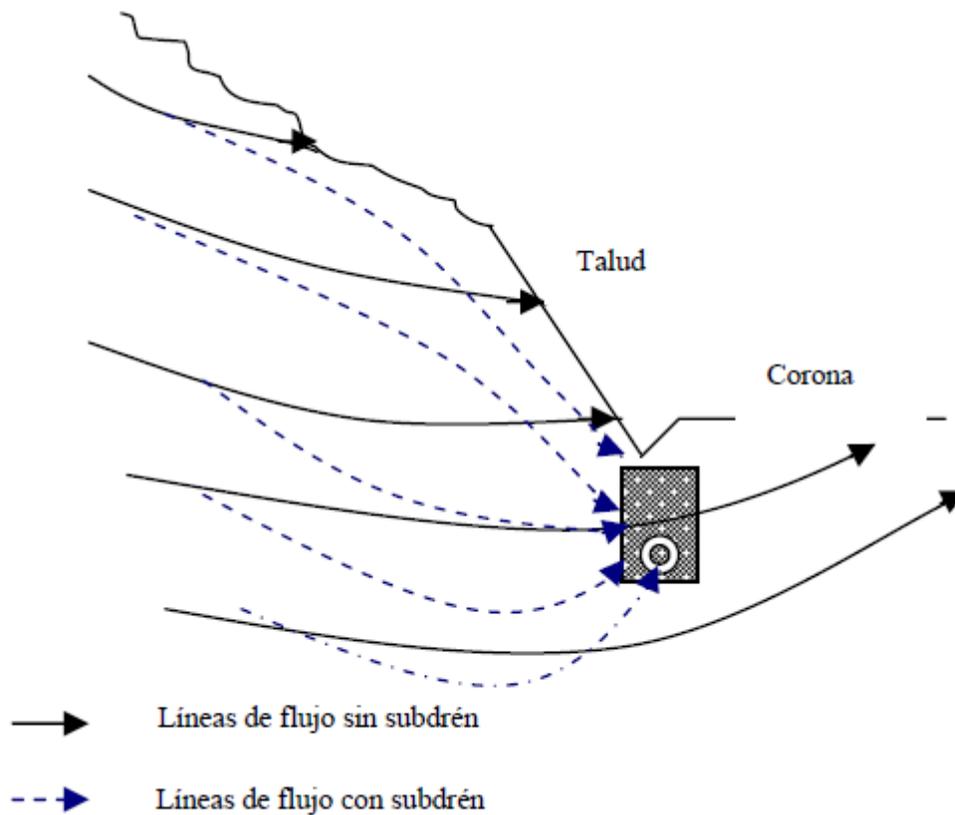
Fuente: Adaptado de Chacon e Ingary, (1993).

Figura 2.5 Solución analítica de red de flujo hacia un subdren.



Fuente: Zaradny y Feddes, (1979).

Figura 2.6 Líneas de flujo de agua con y sin subdren.



Fuente: Sistemas de subdrenaje en obras de estabilización, (2007).

2.6. LEY DE DARCY.

El flujo de agua a través de medios porosos está gobernado por una ley descubierta experimentalmente por Darcy en 1856, quien investigó las características del flujo de agua a través de filtros de material térreo. Utilizando determinados dispositivos de diseño, Darcy encontró que para velocidades suficientemente pequeñas el gasto o caudal Q es

$$Q = \frac{\partial V}{\partial t} = k * i * A$$

Donde:

Q = Caudal o gasto (cm^3 / seg)

∂V = Variación del volumen en un diferencial de tiempo

∂t = Diferencial de tiempo

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

i = Gradiente hidráulico (adimensional)

A = Sección transversal del filtro (cm²)

Si se considera la ecuación de continuidad

$$Q = v * A$$

Donde:

Q = Caudal o gasto (cm³ /seg)

v = Velocidad (cm/seg)

A = Área transversal (cm²)

Es posible relacionarlos de forma tal que

$$v = k * i$$

Expresión conocida como Ley de Darcy.

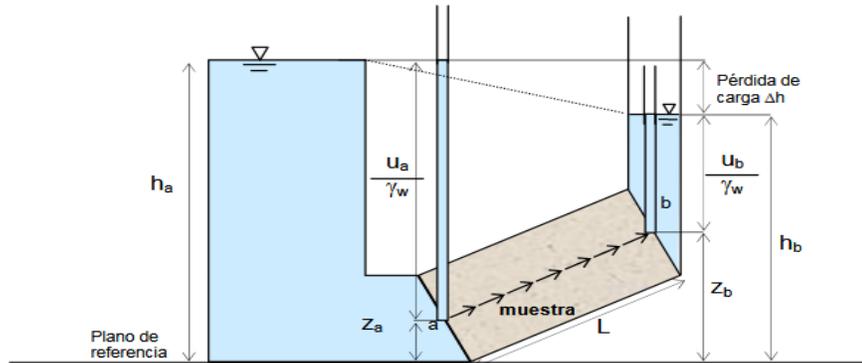
2.7. GRADIENTE HIDRÁULICO.

El gradiente hidráulico (i) se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua, en otras palabras, se puede definir el gradiente hidráulico como la magnitud vectorial determinada por el incremento de potencial del agua por unidad de distancia.

La circulación del agua dentro de un medio poroso se la describe a través de líneas de filtración. Se denomina línea de filtración a la curva descrita por el escurrimiento a través de un material permeable. El agua que circula en el suelo sigue trayectorias que se desvían erráticamente de dichas líneas, pero muy poco. Cuando las líneas de filtración son rectas y paralelas se dice que la filtración es lineal.

En la figura se ilustran los principios hidráulicos que interesan en la filtración lineal.

Figura 2.7 Principios hidráulicos.



Fuente: Geología y geotecnia Permeabilidad de suelos, Silvia Angelone (2006).

Los puntos a y b representan los extremos de una línea de filtración dentro de una muestra de suelo. En cada extremo de la misma se ha colocado un tubo piezométrico para indicar el nivel al que el agua se eleva en dichos puntos.

Para cualquier punto en la muestra, por ejemplo el punto b, la carga total, h_b , se define como:

$$h_b = z_b + \frac{U_b}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \text{ [m]}$$

Donde:

z_b = Carga de posición en b respecto de un plano arbitrario en metros.

U_b/γ_w = Carga por presiones neutras, en metros.

U_b = Presión neutra en b, en KN/m^2 .

γ_w = Peso específico del agua, en KN/m^3 .

$v^2/2g$ = Carga por velocidad, en metros.

v = Velocidad, en m/seg.

g = Aceleración de la gravedad, en m/seg^2 .

La carga por velocidad $v^2/2g$, en la mayor parte de los problemas de flujo de agua subterránea, es suficientemente pequeña como para despreciarla (flujo laminar).

Comparando los valores de carga total en a y b, se observa que existe una diferencia entre ellos, ese valor es la pérdida de carga o carga hidráulica, Δh :

$$\Delta h = h_a - h_b$$

Cabe destacar que para que exista circulación se debe tener una diferencia de carga total $h_a > h_b$, independientemente de las posiciones de los puntos en cuestión, es decir, no es necesariamente $z_a > z_b$.

Vinculando la pérdida de carga con el recorrido de la línea de filtración se obtiene el gradiente hidráulico i , (adimensional), considerado positivo en la dirección de la corriente:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Donde:

L = Longitud del recorrido en la muestra de suelo, en metros.

2.8. COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.

El coeficiente de permeabilidad es una característica de los suelos, específicamente está ligado a la Ley de Darcy que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. El coeficiente de permeabilidad, generalmente representado por la letra k , es extremadamente variable, según el tipo de suelo.

Los estudios de Darcy también utilizan un valor de velocidad v , dicha velocidad es la velocidad de descarga que se define como la cantidad de agua que circula en la unidad de tiempo a través de una superficie unitaria perpendicular a las líneas de filtración.

La mayoría de los problemas que enfrenta la Ingeniería Civil, tratan filtraciones de agua a poca profundidad, con muy poca variación de la temperatura del líquido, de modo que γ_w es prácticamente constante. Como además, dentro de ese rango de temperaturas η varía entre límites poco extensos, es costumbre expresar la ecuación anterior como:

$$v = k * i$$

Donde:

$$k = \frac{Q}{i * A} \quad [\text{cm/seg}]$$

Planteado así, el valor de k , expresado en cm/seg, puede ser considerado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario.

Figura 2.8 Rango de permeabilidades y drenaje para distintos tipos de suelos.

		Coeficiente de permeabilidad, (cm/s)											
		100	10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
Drenaje		Bueno					Pobre			Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada			Suelos "impermeables", es decir, arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición					
					Suelos "impermeables", modificados por la vegetación o la descomposición. ^d								
Determinación directa de k	Ensayo directo del suelo "in situ" por ensayos de bombeo. Se requiere mucha experiencia, pero bien realizados son bastante exactos.												
	Permeámetro de carga hidráulica constante. No se requiere mayor experiencia.												
Determinación indirecta de k	Permeámetro de carga hidráulica decreciente. No se requiere mayor experiencia y se obtienen buenos resultados			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados dudosos. Se requiere mucha experiencia.			Permeámetro de carga hidráulica decreciente. Resultados de regular a bueno. Se requiere mucha experiencia.						
	Por cálculo, partiendo de la curva granulométrica. Sólo aplicable en el caso de arenas y gravas limpias sin cohesión.									Cálculos basados en los ensayos de consolidación. Resultados buenos. Se necesita mucha experiencia			

Fuente: Holtz and Kovacs (1981).

De esta tabla, Casagrande destaca ciertos valores del coeficiente de permeabilidad (1.0, 10^{-4} , y 10^{-9} cm/s). Éstos se conocen como los puntos de referencia de Casagrande y son bastante útiles al realizar estudios de flujo en suelos. Por ejemplo, 1.0 cm/s es, aproximadamente, la frontera entre flujo laminar y turbulento, y separa las gravas limpias de las arenas limpias y gravas arenosas. Un valor de k de 10^{-4} cm/s, es aproximadamente la frontera entre permeables y suelos de drenaje pobre bajo gradientes pequeños. La siguiente frontera, 10^{-9} cm/s, es aproximadamente el límite inferior de la permeabilidad de suelos, aunque se han encontrado permeabilidades tan

bajas como 10-11 cm/s para arcillas muy plásticas en el límite de contracción. Casagrande recomienda que la permeabilidad debe relacionarse al punto de referencia más cercano, por ejemplo, $0,01 \times 10^{-4}$ cm/s en vez de 10^{-6} cm/s (Holtz and Kovacs, 1981).

2.8.1. Ensayo de carga constante para determinar la permeabilidad.

Este permeámetro consiste en un contenedor dentro del cual se ubica la muestra de suelo. Bajo y sobre la muestra, es necesario colocar piedras porosas o geotextiles para uniformizar el flujo y disminuir la migración de partículas finas.

En este caso, un estanque de carga hidráulica provee una alimentación de agua (u otro fluido, si fuera el caso) a una carga constante (carga hidráulica), con lo que el agua se mueve a través de la muestra hasta alcanzar un régimen de equilibrio o estacionario. Para medir la permeabilidad se genera un flujo a través de la muestra de suelo y luego que se alcanza una situación de equilibrio, se mide el caudal de salida desde el permeámetro, Q , así como la diferencia de carga entre el estanque de nivel constante y el nivel de agua en la salida, h .

Es decir, para una altura constante del estanque de solución, debe medirse el volumen de fluido que pasa por una muestra de suelo de área transversal A y largo L , en un tiempo determinado, t . Para la correcta interpretación de los resultados de una prueba en permeámetro de carga constante, se debe utilizar varios gradientes hidráulicos, y éstos deben tener magnitudes similares a aquéllos observados en terreno.

Se debe tener en cuenta que el ensayo a carga constante es realizado, en general, en suelos no cohesivos, debido a que en éstos la permeabilidad es suficientemente alta para obtener caudales que puedan ser medidos fácilmente.

Calcúlese el coeficiente de permeabilidad, k , así:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h}$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad.

Q = Gasto, es decir cantidad de agua descargada.

L = Longitud de la muestra.

A = Área de la sección transversal del espécimen.

t = Tiempo total de desagüe.

h = Diferencia de presión (altura) sobre los manómetros.

Corrójase la permeabilidad para la que corresponde a 20 °C (68 °F), multiplicando k por la relación de la viscosidad de agua a la temperatura del ensayo con respecto a la viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

$$k_c = k * \frac{n_k}{n_{20^\circ}}$$

Donde:

k_c = Coeficiente de permeabilidad corregido por temperatura.

k = Coeficiente de permeabilidad.

n_k = Viscosidad de agua a la temperatura del ensayo

n_{20° = viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

2.8.2. Ensayo de carga variable para determinar la permeabilidad.

En los ensayos de carga variable, el estanque de carga hidráulica de nivel constante, se reemplaza por un tubo vertical en el cual se produce el descenso del nivel de agua a medida que ésta atraviesa la muestra de suelo. Para la determinación de la permeabilidad, se anota el nivel de agua inicial en el tubo, h_1 (para un tiempo arbitrario, t_1). Luego de un período de tiempo, Δt , se mide la nueva posición del agua en el tubo vertical, h_2 . El diámetro interior del tubo, d_t , el área de éste, a , la longitud de la muestra, L , el diámetro de la muestra, d_c , así como su área, A , también son conocidos.

Este tipo de ensayos suele ser utilizado para suelos cohesivos, ya que en éstos el flujo es bajo, y es posible medir la diferencia de alturas en el tubo de carga hidráulica si se tiene un diámetro adecuado.

Calcúlese el coeficiente de permeabilidad, k , así:

$$k=2,303 \frac{a * L}{A * \Delta t} * \log \frac{h1}{h2}$$

Donde:

k= Coeficiente de permeabilidad.

a= Área de la bureta.

L= Longitud total de la muestra.

A= Área de la sección transversal del espécimen.

Δt = Periodo de tiempo.

h1= Altura inicial.

h2= Altura final.

Corrija la permeabilidad para la que corresponde a 20 °C (68 °F), multiplicando k por la relación de la viscosidad de agua a la temperatura del ensayo con respecto a la viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

$$k_c = k * \frac{n_k}{n_{20^\circ}}$$

Donde:

k_c = Coeficiente de permeabilidad corregido por temperatura.

k= Coeficiente de permeabilidad.

n_k = Viscosidad de agua a la temperatura del ensayo.

n_{20° = viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

2.9. RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS.

El suelo es un material constituido por el esqueleto de partículas sólidas rodeado por espacios libres (vacíos), en general ocupados por agua y aire. Para poder describir completamente las características de un depósito de suelo es necesario expresar las distintas composiciones de sólido, líquido y aire, en términos de algunas propiedades físicas.

En el suelo se distinguen tres fases:

Sólida.

Formada por partículas minerales del suelo, incluyendo la capa sólida adsorbida.

Líquida.

Generalmente agua (específicamente agua libre), aunque pueden existir otros líquidos de menor significación.

Gaseosa.

Comprende sobre todo el aire, si bien pueden estar presentes otros gases, por ejemplo: vapores de sulfuro, anhídridos carbónicos, etc.

La capa viscosa del agua adsorbida, que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y la líquida, suele incluirse en esta última pues es susceptible de desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación (secado).

Algunos suelos contienen, además, materia orgánica (residuos vegetales parcialmente descompuestos) en diversas formas y cantidades.

Pese a que la capa adsorbida y el contenido de materia orgánica son muy importante desde el punto de vista de las propiedades mecánicas del suelo, no es preciso considerarlos en la medición de pesos y volúmenes relativos de las tres fases principales.

Sus influencias se tomarán en cuenta más fácilmente en etapas posteriores del estudio de ciertas propiedades de los suelos.

Las fases líquida y gaseosa conforman el Volumen de Vacíos, mientras que la fase sólida constituye el Volumen de Sólidos.

Un suelo está totalmente saturado, cuando todos sus vacíos están ocupados únicamente por agua; en estas circunstancias consta, como caso particular, de sólo dos fases: la sólida y la líquida. Muchos suelos bajo la napa, están saturados.

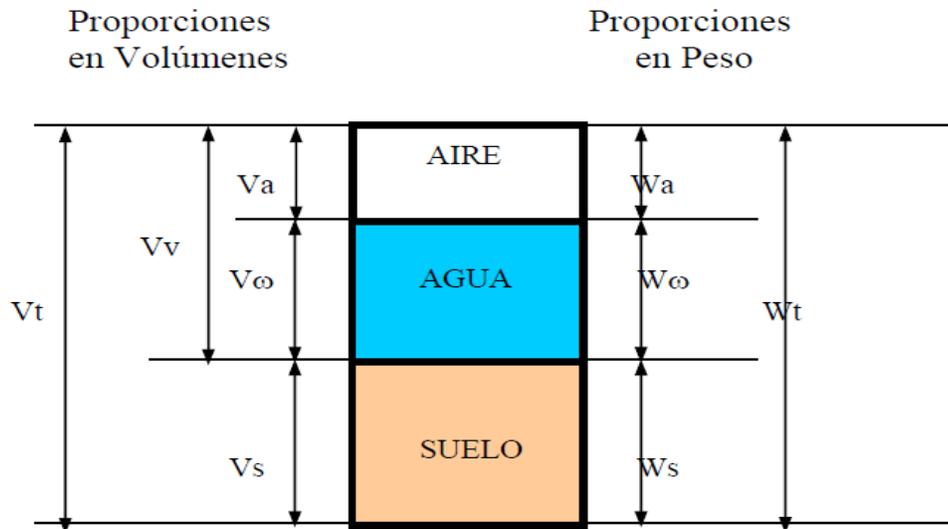
Entre estas fases es preciso definir un conjunto de relaciones que se refieren a sus pesos y volúmenes, las cuales sirven para establecer la necesaria nomenclatura y para contar con conceptos mensurables, a través de cuya variación puedan seguirse los procesos ingenieriles que afectan a los suelos.

En los laboratorios de Geotecnia puede determinarse fácilmente el peso de las muestras húmedas, el peso de las muestras secadas al horno, y el peso específico de los suelos.

Estas magnitudes no son las únicas cuyo cálculo es necesario; es preciso obtener relaciones sencillas y prácticas a fin de poder medir algunas otras magnitudes en términos de éstas.

Su dominio debe considerarse indispensable para la aplicación rápida y sencilla de las diversas teorías que conforman la Geotecnia.

Figura 2.9 Proporciones en volumen-peso de un suelo.



Fuente: Relaciones Volumétricas y Gravimétricas, Augusto José Leoni (2005).

El significado de los símbolos es el siguiente

Vt= Volumen total de la muestra del suelo. (Volumen de la masa)

Vs= Volumen de la fase sólida de la muestra (Volumen de sólidos)

V ω = Volumen de la fase líquida (Volumen de agua)

Va= Volumen de la fase gaseosa (Volumen de aire)

Vv= Volumen de vacíos de la muestra de suelo (Volumen de vacíos).

$$\mathbf{Vv} = \mathbf{V\omega} + \mathbf{Va}$$

$$\mathbf{Vt} = \mathbf{Vv} + \mathbf{Vs}$$

$$\mathbf{Vt} = \mathbf{V\omega} + \mathbf{Va} + \mathbf{Vs}$$

Wt= Peso Total de la muestra de suelo. (Peso de la masa).

Ws= Peso de la fase sólida de la muestra.

W ω = Peso de la fase líquida (Peso del agua).

Wa= Peso de la fase gaseosa, convencionalmente considerado como nulo en Geotecnia.

Existe un problema para poder definir el peso sólido, o sea del suelo seco, obtenido eliminando la fase líquida. El problema proviene del hecho de que la película de agua adsorbida no desaparece por completo al someter al suelo a una evaporación en horno, a temperatura prácticas; la cuestión está convencionalmente resuelta en Geotecnia, al definir como estado seco de un suelo al que se obtiene tras someter el mismo a un proceso de evaporación en un horno, con temperaturas de 105° C a 110° C, y durante un período suficiente para llegar a peso constante, el cual se logra generalmente en 18 a 24 horas.

2.9.1. Relaciones de pesos y volúmenes.

En Geotecnia se relaciona el peso de las distintas fases con sus volúmenes correspondientes, por medio del concepto de peso específico, es decir, la relación entre el peso de la sustancia y su propio volumen, y de los pesos por unidad de volumen, que relacionan los pesos totales (de una o más sustancias) con los volúmenes totales.

Pesos Específicos.

Se define al peso específico relativo como la relación entre el peso específico de una sustancia y el peso específico del agua destilada a 4° C sujeta a una atmósfera de presión.

γ_0 = Peso específico del agua destilada, a 4° C. y a la presión atmosférica correspondiente al nivel del mar. $\gamma_0 = 1,000 \text{ gr/ cm}^3$

γ_w = Peso específico del agua en condiciones reales de trabajo, su valor difiere un poco del γ_0 , en la práctica se toma igual que γ_0 .

γ_s = Peso específico del suelo, también llamado peso volumétrico de los sólidos.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

2.9.2. Relaciones de vacíos y porosidad.

La proporción de vacíos en un elemento de suelo se expresa en función de la relación de vacíos, razón de vacíos o índice de poros, denotada con **e**, o en función de la porosidad, denotada con **n**.

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

Ambas propiedades, **e** y **n** son parámetros adimensionales, y con frecuencia **n** se expresa en porcentaje. Como se observa, **e** vincula el volumen de vacíos con una magnitud constante, para un determinado tipo de suelo, en el tiempo; en tanto **n** lo hace con un valor que varía en el tiempo (por cargas, desecamiento, o humectación).

En función de γ_s y γ_d

$$e = \frac{(1 + w) * \gamma_s - \gamma}{\gamma}$$

$$n = 1 - \frac{\gamma}{(1 + w) * \gamma_s}$$

2.10. GEOTEXTIL.

En general, se podrán emplear geotextiles cuyas fibras estén elaboradas a partir de polímeros sintéticos de cadena larga, compuestos con un porcentaje mínimo del 95 % en masa de poliéster; la misma composición aplica para los hilos de las costuras. Las fibras del geotextil deberán conformar una red estable que mantenga la estabilidad dimensional entre ellas, incluyendo los bordes.

El geotextil escogido en el diseño deberá tener las siguientes características de comportamiento:

Deberá tener la capacidad para dejar pasar el agua, a largo plazo, hacia el material drenante.

Deberá retener las partículas de suelo en su sitio y prevenir su movimiento a través del geotextil.

Si algunas partículas de suelo se mueven, el geotextil deberá dejarlas pasar sin que se obstruyan los poros del mismo o se forme una película que restrinja el paso del agua.

Las propiedades de los geotextiles se expresan en términos de valores mínimos promedio por rollo (VMPR). El valor mínimo promedio por rollo (VMPR) es una herramienta de control de calidad que le permite a los fabricantes establecer los valores en sus certificados de manera que el comprador tenga un nivel de confianza del 97.7 % de que las propiedades, medidas sobre el producto que compra, cumplen con los valores

certificados. Para datos que tengan una distribución normal, el valor VMPR se calcula como el valor típico menos dos (2) veces la desviación estándar, cuando se especifican valores mínimos, o más dos (2) veces la desviación estándar, cuando se especifican valores máximos.

2.11. MATERIAL GRANULAR DRENANTE.

Podrá provenir de la trituración de roca o ser de cantos rodados, o una mezcla de ambos, y estará constituido por fragmentos duros y resistentes a la acción de los agentes del intemperismo. Además, deberá cumplir con los siguientes requisitos:

2.11.1. Granulometría.

El material drenante deberá estar constituido por partículas con tamaños comprendidos entre el tamiz de setenta y cinco milímetros (3") y el tamiz de diecinueve milímetros (3/8").

No se requiere ninguna gradación especial, permitiéndose el uso de fragmentos de un solo tamaño. Las partículas podrán ser angulares o redondeadas o una combinación de ellas.

2.11.2. Calidad de las partículas minerales.

El material deberá estar libre de partículas finas y de material orgánico. En la Tabla 2.1 se indican los requisitos que deberá cumplir el material granular para filtros.

2.12. MATERIAL DE COBERTURA.

El material de cobertura para el subdrén deberá cumplir los requisitos establecidos en los documentos del proyecto; podrá ser material proveniente de la excavación; material impermeable, con índice de plasticidad mínimo de 10 %; material de recebo (o material de sub base granular).

Para fines de investigación se utilizara un suelo arenoso sin índice de plasticidad.

Tabla 2.1 Requisitos del material granular drenante.

Características	Norma de ensayo INV	Valor
Dureza		
Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	AASHTO T-96	< 40
Durabilidad		
Pérdidas en ensayos de solidez de sulfatos	AASHTO T-104	

Sulfato de sodio (%)		< 12
Sulfato de magnesio (%)		< 18
Limpieza		
Terrones de arcilla y partículas deleznable, máximo (%)	AASHTO T-112	0,25
Partículas livianas, máximo (%)	AASHTO T-113	1
Contenido de materia orgánica (%)	AASHTO T-267	0

Fuente: Normas y especificaciones INVIAS (2012).

2.13. JUSTIFICACIÓN NORMATIVA DE LOS ENSAYOS DEL PROYECTO.

El manual de normas de ensayos de materiales para carreteras tiene el propósito de estandarizar los procedimientos de muestreo y ensayo en los laboratorios los procedimientos y requerimientos incluidos en el documento se basan principalmente en normas internacionales elaboradas por instituciones de prestigio en especial la AASHTO y ASTM adaptadas a las necesidades específicas de la ABC.

Los parámetros de los requisitos que debe cumplir el material granular drenante del subdren fueron recolectados de la Norma del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) Colombia debido a que la norma de la ABC no cuenta con los parámetros de requisitos que debe cumplir el material granular drenante para subdrenes.

Los procedimientos para los ensayos de laboratorios para los materiales tanto como de la norma ABC como de la INVIAS son iguales ya que toman los procedimientos y requerimientos de normas internacionales como la AASHTO y ASTM.

2.14. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM-D422 AASHTO-T88.

Este método permite, mediante tamizado, determinar la distribución por tamaños de las partículas mayores que 0,075 mm, de una muestra de suelo.

Tabla 2.2 Serie de tamices.

N° Tamices	tamaño (mm)
3	75,00
2	50,00
1 ½	37,50
1	25,00

3/4	19,00
3/8	9,50
Nº4	4,75
Nº10	2,00
Nº40	0,43
Nº200	0,075

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Vacíe el material registrado como “D” sobre el tamiz superior de la serie de tamices y cúbralo con la tapa y fondo.

Agite el conjunto de tamices durante un lapso mínimo de 5 min.

Retire el primer tamiz provisto de depósito y tapa.

Sosténgalo con las manos, manteniéndolo ligeramente inclinado.

Agítelo con movimientos horizontales y verticales en forma combinada, girando el tamiz en forma intermitente. Esta operación durará al menos 1 min.

Pese y registre el material retenido sobre el tamiz.

Traslade el material contenido en el depósito al tamiz siguiente.

Repita las operaciones descritas en los pasos anteriores hasta completar todos los tamices.

Pese y registre la masa final del residuo contenido en el depósito.

Del material bajo 5mm tome por cuarteo una muestra de 500 a 1.000 g, y registre su masa como “C”. Lave cuidadosamente con agua potable el material sobre tamiz 0,075 mm (Nº 200); vacíe a un bol el material retenido en tamiz 0,075 mm (Nº 200) y seque hasta masa constante a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Pese y registre el material lavado y seco como “C”, aproximando a 0,1 g.

Tamice el material preparado de acuerdo a la serie de tamices: 2 mm (Nº 10), 0,425 mm (Nº 40) y 0,075 mm (Nº 200).

Determine la masa final del material retenido en cada tamiz y del material que pasa por el tamiz 0,075 mm (Nº 200), recogido en el depósito. Registre como M con aproximación a 0,1 g.

La suma de todas las masas no debe diferir en más de 3% para el material bajo 5 mm, ni en más de 0,5% para el material sobre 5 mm, respecto de las masas registradas como C'' y D', respectivamente.

En caso contrario, repita el ensayo.

Expresa la granulometría 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. Aproxime los porcentajes que pasan al entero más cercano.

Los resultados de la granulometría pueden expresarse 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.

2.15. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS ASTM-D4318 AASHTO-T89.

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

El límite Líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remoldeada, depositada en la taza de bronce de la máquina Casagrande y dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Ajuste de la Altura de Caída de la Taza.

Gire la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm (adosado al ranurador), verifique que la distancia entre el punto de percusión y la base sea exactamente de 10 mm. De ser necesario, afloje los tornillos de fijación y mueva el de ajuste hasta obtener la altura de caída requerida. Si el ajuste es correcto se escuchará un ligero campanileo producido por la leva al golpear el tope de la taza; si

la taza se levanta por sobre el calibre o no se escucha ningún sonido, realice un nuevo ajuste

Procedimiento de ensayo.

Coloque el aparato de límite líquido sobre una base firme.

Coloque en la taza 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.

Enrase y nivele a 10mm en el punto de máximo espesor.

Reincorpore el material excedente al plato de evaporación.

Divida 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. Pase 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, retire todo el material y reinicie el procedimiento. La formación de la ranura se debe lograr con el mínimo de pasadas, limpiando el acanalador después de cada pasada.

Gire 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.; si el cierre de la ranura es irregular, descarte el resultado. Registre el número de golpes obtenido (N).

Retire aproximadamente 10 g del material que se junta en el fondo del surco; colóquelo en una cápsula de secado y determine su humedad (w).

Continúe batiendo con la espátula la pasta de suelo que quedó en el plato de evaporación para obtener un secado homogéneo. Repita las operaciones precedentes desde 20 en adelante, para dar origen a un nuevo punto.

El ensayo requiere de al menos cinco puntos para el trazado de la curva de fluidez.

Calcule y registre la humedad de cada determinación (w), de acuerdo con el método definido anteriormente para determinar el contenido de humedad.

Construya un gráfico semilogarítmico, con la humedad (w) como ordenada en escala aritmética y el número de golpes (N) como abscisa en escala logarítmica.

Dibuje los puntos correspondientes a los resultados de cada una de las cinco (o más) determinaciones efectuadas y construya una recta (curva de fluidez) que pase tan aproximadamente como sea posible por los puntos.

Expresé el Límite Líquido (LL) del suelo como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de fluidez con la abscisa de 25 golpes, aproximando a un decimal.

2.16. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD ASTM-D4318 AASHTO-T90.

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

El Límite Plástico es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

Extraiga, por cuarteo, una muestra representativa de un tamaño que asegure una masa mínima de ensayo de 500g de material bajo tamiz 0,425mm (N° 40).

Desmenuce los terrones con mortero, sin reducir el tamaño natural de las partículas individuales.

Seque la muestra al aire o en horno a una temperatura que no exceda de 60°C.

Amase la muestra entre las manos; luego hágala rodar sobre la superficie de amasado, ejerciendo una leve presión con la palma de la mano hasta conformar un cilindro.

Cuando el cilindro alcance un diámetro de aproximadamente 3 mm, doble, amase nuevamente y vuelva a conformar el cilindro.

Repita la operación, manteniendo la velocidad y la presión de amasado, hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de aproximadamente 3 mm, en trozos del orden de 0,5 a 1 cm de largo y no pueda ser reamasado ni reconstituido.

Reúna las fracciones del cilindro disgregado y colóquelas en una cápsula de secado, previamente tarada. Determine y registre la humedad (w) de acuerdo con el Método S0301, aproximando a un decimal.

Repita las anteriores etapas con dos porciones más de la muestra de ensayo.

Calcule el Límite Plástico (LP) como el promedio de las tres determinaciones efectuadas sobre la muestra de ensayo, aproximando a un decimal. Las determinaciones no deben diferir entre sí en más de dos puntos; cuando no se cumpla esta condición, repita todo el ensayo.

Calcule el Índice de Plasticidad (IP) del suelo de acuerdo con la fórmula siguiente:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP= Índice de Plasticidad del suelo (%).

LL= Límite Líquido del suelo (%).

LP= Límite Plástico del suelo (%).

2.17. RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES ASTM C-113 AASHTO T-96.

Este ensayo mide la degradación de un agregado pétreo con una composición granulométrica definida, como resultado de una combinación de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero rotatorio que contiene un número determinado de esferas metálicas, el cual depende de la granulometría de la muestra de ensayo. A medida que gira el tambor, una pestaña de acero recoge la muestra y las esferas de acero y las arrastra hasta que caen por gravedad en el extremo opuesto del tambor, creando un efecto de impacto y trituración. Entonces, la muestra y las esferas

ruedan dentro del tambor, hasta que la pestaña las levanta y se repite el ciclo. Tras el número especificado de revoluciones, se retira el contenido del tambor y se tamiza la porción de agregado para medir la degradación, como un porcentaje de pérdida.

La carga consistirá en esferas de acero, de un diámetro aproximado de 46.8 mm (127/32") y una masa comprendida entre 390 g y 445 g. Como se muestra en seguida, la carga abrasiva dependerá de la granulometría de ensayo, A, B, C o D.

Tabla 2.3 Carga abrasiva en máquina de los Ángeles.

Granulometría	Número de esferas	Masa de la carga, gr
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Se elige la granulometría más parecida a la del agregado que se va a usar en la obra. Se separa la muestra reducida en las fracciones indicadas en la tabla, de acuerdo con la granulometría elegida. Se recombinan las fracciones para formar una muestra de ensayo con la composición indicada en la tabla. Se pesa la muestra de ensayo con aproximación a 1 g y se registra el valor obtenido.

Tabla 2.4 Granulometrías de la muestra de ensayo.

Tamaños de tamiz		Masas de las diferentes fracciones, gr			
Pasa tamiz	Retenido en tamiz	Granulometrías			
		A	B	C	D
37,5 (1½")	25,0 (1")				
25,0 (1")	19,0 (¾")	1250 ± 10			
19,0 (¾")	12,5 (½")	1250 ± 10			
12,5 (½")	9,5 (3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9,5 (3/8")	6,3 (¼")	1250 ± 10	2500 ± 10	2500 ± 10	
6,3 (¼")	4,75 (No.4)			2500 ± 10	
4,75 (No.4)	2,36 (No.8)				5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Luego de comprobar que el tambor esté limpio, la muestra y la carga abrasiva correspondiente se colocan en la máquina de Los Ángeles y se hace girar el tambor a

una velocidad comprendida entre 188 y 208 rad/minuto (30 y 33 rpm) hasta completar 500 revoluciones. La máquina deberá girar de manera uniforme para mantener una velocidad periférica prácticamente constante. Una vez cumplido el número de vueltas prescrito, se descarga el material del tambor y se procede con una separación preliminar de la muestra ensayada, empleando un tamiz de abertura mayor al de 1.70 mm (No. 12). La fracción fina que pasa, se tamiza a continuación empleando el tamiz de 1.70 mm (No.12), utilizando el procedimiento de la norma INV E-213. El material más grueso que la abertura del tamiz de 1.70 mm (No. 12) se lava, se seca en el horno, a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) hasta masa constante, y se determina su masa con precisión de 1 gr.

El resultado del ensayo es la diferencia entre la masa original y la masa final de la muestra ensayada, expresada como tanto por ciento de la masa original.

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Donde:

P_1 = Masa de la muestra seca antes del ensayo, gr.

P_2 = Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz de 1,70 mm (Nº 12), gr.

2.18. SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO ASTM C-88 AASHTO T-104.

Este método de ensayo brinda un procedimiento para hacer una valoración preliminar de la solidez de los agregados previstos para la elaboración de concretos y para otros propósitos. Los valores obtenidos se pueden comparar con los indicados en las especificaciones, con el fin de establecer la aptitud de un agregado para un determinado uso. Dado que la precisión de este método de ensayo es baja, el rechazo de los agregados que no cumplan las especificaciones pertinentes no se puede dar sin

confirmar los resultados de otros ensayos mejor relacionados con el uso que se le va a dar al material.

Se prepara una solución de sulfato de sodio o de magnesio para sumergir las muestras de ensayo. El volumen de solución debe ser, como mínimo, cinco veces el volumen de sólidos de todas las muestras sumergidas al mismo tiempo.

Las diferentes fracciones de la muestra total se sumergen en la solución de sulfato de sodio o de magnesio durante un período no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas, de manera que el nivel de la solución las cubra por lo menos 12.5 mm ($\frac{1}{2}$ "). Los recipientes se deben cubrir para evitar la evaporación y la contaminación accidental con sustancias extrañas. Después del período de inmersión, cada fracción se saca de la solución dejándola escurrir durante 15 ± 5 minutos y se la introduce en el horno, cuya temperatura se debe haber regulado previamente a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).

Después de terminado el último ciclo y de que todas las fracciones se han enfriado, se lavan hasta que queden exentas de sulfato de sodio o de magnesio, lo que se determina por la reacción del agua de lavado con el cloruro de bario. El lavado se realiza haciendo circular agua a $43 \pm 6^\circ \text{C}$ ($110 \pm 10^\circ \text{F}$) a través de las fracciones de agregado en sus recipientes, lo que se hace colocando éstos en un tanque en el cual se introduce el agua caliente cerca del fondo y permitiéndole pasar a través de los agregados hasta que rebose por encima de ellos. Durante la operación de lavado, las fracciones de agregado no se deben someter a efectos de impacto o abrasión que puedan quebrar las partículas.

Después de remover todo el sulfato de sodio o de magnesio, cada fracción de la muestra se seca hasta masa constante a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$) y se pesa. Se tamiza el agregado fino sobre los mismos tamices en los que fueron retenidas sus fracciones antes del ensayo, y el agregado grueso sobre los tamices indicados más adelante en este mismo numeral, según el tamaño de las partículas. Para el agregado fino, el método y la duración del tamizado deben ser iguales a los usados para preparar la muestra de ensayo. Para el agregado grueso, el tamizado debe ser manual y con el suficiente agitado para que pasen las partículas de tamaño inferior a la abertura del tamiz.

No se debe ejercer manipulación adicional para quebrar partículas u obligarlas a pasar por los tamices. Se determina la masa del material retenido en cada tamiz y se registra cada cantidad. La diferencia entre cada una de estas cantidades y la masa inicial de la fracción de la muestra ensayada, es la pérdida durante el ensayo, la cual se debe expresar como un porcentaje de la masa inicial para ser usado.

Tabla 2.5 Tamiz empleado para determinar la pérdida frente a la acción de soluciones de sulfato.

Tamaño del agregado	Tamiz empleado para determinar la pérdida
100 mm - 90 mm (4" - 3½")	75 mm (3")
90 mm - 75 mm (3½" - 3")	63 mm (2½")
75 mm - 63 mm (3" - 2½")	50 mm (2")
63 mm - 37,5 mm (2½" - 1 ½")	31,5 mm (1¼")
37,5 mm - 19,0 mm (1½" - ¾")	16,0 mm (5/8")
19,0 mm - 9,5 mm (¾" - 3/8")	8,0 mm (5/16")
9,5 mm - 4,75 mm (3/8" - No.4)	4,00 mm (No.5)

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

2.19. DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS ASTM C-142 AASHTO T-112.

Este método se refiere a la determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznable (friables) en los agregados.

Las muestras de agregado grueso para ensayo se deberán separar en diferentes tamaños, empleando los siguientes tamices: 4.75 mm (No. 4), 9.5 mm (3/8"), 19.0 mm (3/4") y 37.5 mm (1½"). La muestra para el ensayo no deberá tener una masa inferior a la que se indica en el siguiente cuadro:

Tabla 2.6 Masa mínima de ensayo para determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable.

Tamaño de las partículas entre los tamices de	Masa mínima de la muestra de ensayo, gr
4,75 - 9,5 mm (No.4 - 3/8")	1000
9,5 - 19,0 mm (3/8" - 3/4")	2000
19,0 - 37,5 mm (3/4" - 1½")	3000
Mayores de 37,5 mm (1½")	5000

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Se determina la masa de la muestra de ensayo y se extiende en una capa delgada sobre el fondo del recipiente, cubriéndola con agua destilada y dejándola en remojo durante 24 ± 4 horas. Se ruedan y aprietan individualmente las partículas, entre el pulgar y el índice, para tratar de romperlas en tamaños más pequeños. No se deberán emplear las uñas para romper las partículas, ni presionarlas una contra otra o contra una superficie dura. Las partículas que se puedan romper con los dedos convirtiéndolas en finos removibles mediante tamizado en húmedo, se clasificarán como terrones de arcilla o partículas deleznales. Después de que se hayan fragmentado todas las partículas identificables como terrones de arcilla y partículas deleznales, se separan los detritos de la parte restante mediante tamizado en húmedo, usando el tamiz que se indica en el cuadro que se muestra en seguida. Se efectúa el tamizado en húmedo haciendo circular agua sobre la muestra a través del tamiz, mientras éste se agita manualmente, hasta que se remueva todo el material más pequeño.

Tabla 2.7 Tamaño del tamiz para remover el residuo de terrones de arcilla y partículas deleznales.

Intervalos de tamaños de las partículas que forman la muestra	Tamaño del tamiz para remover el residuo de terrones de arcilla y partículas deleznales
Agregado fino retenido sobre el tamiz	
de 1,18 mm (No. 16)	850 μ m (No. 20)
4,75 - 9,5 mm (No.4 - 3/8")	2,36 mm (No. 8)
9,5 - 19,0 mm (3/8" - 3/4")	4,75 mm (No. 4)
19,0 - 37,5 mm (3/4" - 1½")	4,75 mm (No. 4)
Mayores de 37,5 mm (1½")	4,75 mm (No. 4)

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Se remueven cuidadosamente del tamiz las partículas retenidas, se secan hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ$ C ($230 \pm 9^\circ$ F), se dejan enfriar y se determina su masa con aproximación de lectura al 0.1 % de la masa de la muestra de ensayo.

Se calcula el porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznales en los agregados finos o en los tamaños individuales de los agregados gruesos, en la siguiente forma:

$$P = \frac{M - R}{M} \times 100$$

Donde:

P= Porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznales.

M= Masa de la muestra de ensayo.

R= Masa de las partículas retenidas sobre el tamiz designado para remover el residuo.

2.20. CANTIDAD DE PARTÍCULAS LIVIANAS EN UN AGREGADO PÉTREO ASTM C-123 AASHTO T-113.

Empleando un líquido pesado, se separan del agregado pétreo las partículas livianas y se establece su cuantía como porcentaje de la masa total del agregado seco.

La masa mínima de la muestra seca de ensayo debe ser la siguiente:

Tabla 2.8 Masa mínima de ensayo para determinar la cantidad de partículas livianas en un agregado.

Tamaño máximo nominal del agregado (Tamices de aberturas cuadradas)		Masa mínima de la muestra, gr
4,75 mm o menor	(No.4 o menor)	200
9,5 mm	(3/8")	1500
12,5 mm a 19,0 mm	(1/2" a 3/4")	3000
25 mm a 37,5 mm	(1" a 1 1/2")	5000
50 mm o mayor	2" o mayor)	10000

Fuente: Manual técnico de Ensayos de suelos y materiales ABC.

Se deja enfriar la muestra a temperatura ambiente y se pasa por el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Se determina la masa del material retenido en dicho tamiz, aproximada a 1 g y se somete al proceso descrito en la norma, hasta cuando el agregado alcance la condición de saturado con superficie seca (SSS). A continuación, se coloca la muestra dentro del recipiente con el líquido pesado. El volumen del líquido debe ser, al menos, tres veces el volumen absoluto del agregado. Se retiran las partículas que suban a la superficie, usando el colador y se colocan en otro recipiente. Se agita la muestra repetidamente y se retiran las partículas que flotan, hasta cuando ninguna suba a la superficie del líquido. Se lavan las partículas que han sido retiradas. Una vez removido el líquido pesado, se dejan secar las partículas decantadas y se determina su masa, redondeada a 1 g. Si se desea una determinación más precisa, las partículas decantadas

se pueden secar a $110 \pm 5^\circ \text{ C}$ ($230^\circ \pm 9^\circ \text{ F}$) hasta masa constante, para determinar el valor M_1 que se emplea en los cálculos.

El porcentaje de partículas livianas en los agregados se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L = \frac{M_1}{M_3} \times 100$$

Donde:

L = Porcentaje, en masa, de partículas livianas.

M_1 = Masa seca de las partículas retenidas en el colador.

M_3 = Masa seca de la porción de la muestra retenida en el tamiz de 4.75 mm (Nº 4).

2.21. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ORGÁNICO DE UN SUELO MEDIANTE EL ENSAYO DE PÉRDIDA POR IGNICIÓN AASHTO T-267.

El método de "pérdida por ignición" para la determinación del contenido orgánico es más aplicable a aquellos materiales identificados como turbas, lodos orgánicos y suelos que contengan materia vegetal relativamente no descompuesta ni deteriorada o materiales de plantas frescas como madera, raíces, pasto o materiales carboníferos como el lignito, carbón, etc. Este método determina la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico. El método de la "combustión húmeda" (norma AASHTO T194) se recomienda cuando se desea determinar el material orgánico fácilmente oxidable (del tipo humus), para proveer información relacionada con la aptitud de un suelo para cultivo.

De una porción del material que pase el tamiz de 2.00 mm (No. 10), se toma una muestra representativa con una masa de no menos de 100 gr.

Se coloca la muestra en un recipiente y se lleva al horno a $110 \pm 5^\circ \text{ C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{ F}$), donde se seca hasta masa constante. Luego se remueve la muestra del horno, se coloca en el desecador y se permite su enfriamiento.

Se escoge una muestra con una masa aproximada de 10 a 40 gr, se coloca en un crisol tarado o en un plato de evaporación de porcelana y se determina su masa (A), con aproximación a 0.01 gr.

Se coloca el crisol o el plato que contiene la muestra dentro de la mufla durante 6 horas a $445 \pm 10^\circ$ C. Se saca la muestra de la mufla, se coloca en el desecador y se permite su enfriamiento.

El contenido orgánico se deberá expresar como un porcentaje de la masa del suelo secado en el horno y se calcula con la expresión:

$$\% \text{ de materia organica} = \frac{A - B}{A - C} \times 100$$

Donde:

A= Masa del crisol o plato de evaporación y del suelo secado al horno, antes de la ignición.

B= Masa del crisol o plato de evaporación y del suelo secado al horno, después de la ignición.

C= Masa del crisol o plato de evaporación, con aproximación a 0.01gr.

2.22. PERMEABILIDAD DE SUELOS GRANULARES (CARGA CONSTANTE) ASTM D-2434 AASHTO T-215.

Este método de ensayo cubre un procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad mediante un método de carga constante para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares. El procedimiento está destinado a establecer valores representativos del coeficiente de permeabilidad de suelos granulares presentes en depósitos naturales o colocados en terraplenes, o cuando se empleen como bases bajo pavimentos. Para limitar las influencias de consolidación durante el ensayo, este procedimiento está limitado a suelos granulares alterados que no contengan más de 10 % de partículas que pasen tamiz de 75 μm (No.200).

Las siguientes condiciones ideales de ensayo son prerequisites, para el flujo laminar de agua a través de suelos granulares bajo condiciones de carga constante:

Continuidad de flujo sin cambios en el volumen del suelo durante el ensayo.

Flujo con los vacíos del suelo saturados con agua y sin burbujas de aire dentro de los mismos.

Flujo uniforme sin cambios en el gradiente hidráulico, y

Proporcionalidad directa de la velocidad de flujo con gradientes hidráulicos por debajo de ciertos valores críticos, en los cuales se inicia el flujo turbulento.

Calcúlese el coeficiente de permeabilidad, k , así:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h}$$

Donde:

k = Coeficiente de permeabilidad.

Q = Gasto, es decir cantidad de agua descargada.

L = Longitud total de la muestra.

A = Área de la sección transversal del espécimen.

t = Tiempo total de desagüe.

h = Diferencia de presión (altura) sobre los manómetros.

Corrija la permeabilidad para la que corresponde a 20 °C (68 °F), multiplicando k por la relación de la viscosidad de agua a la temperatura del ensayo con respecto a la viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

$$k_c = k * \frac{\eta_k}{\eta_{20^\circ}}$$

Donde:

k_c = Coeficiente de permeabilidad corregido por temperatura.

k = Coeficiente de permeabilidad.

η_k = Viscosidad de agua a la temperatura del ensayo

η_{20° = viscosidad del agua a 20 °C (68 °F).

INGENIERÍA DEL PROYECTO

3.1. SELECCIÓN DE MATERIAL GRANULAR.

Se seleccionó el material granular drenante en base a las características que debe de cumplir según Normas y Especificaciones 2012 INVIAS.

3.2. MUESTREO DEL MATERIAL GRANULAR.

El material granular drenante se obtuvo de una chancadora local ubicada en la comunidad de Santa Ana de la ciudad de Tarija.

El material de cobertura de suelo arcilloso se obtuvo de un talud ubicado en el barrio San Antonio de la ciudad de Tarija a -21.530951, -64.749650 verificando que cumpla con los requisitos para material de cobertura.

Para fines investigativos se optó por usar un suelo arenoso como material de cobertura de un talud cercano al río Santa Ana a -21.591228, -64.605197.

Figura 3.1 Material arenoso talud río Santa Ana.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. CLASIFICACIÓN DE SUELOS.

3.3.1. Material granular drenante.

Tabla 3.1 Clasificación granulométrica material granular drenante.

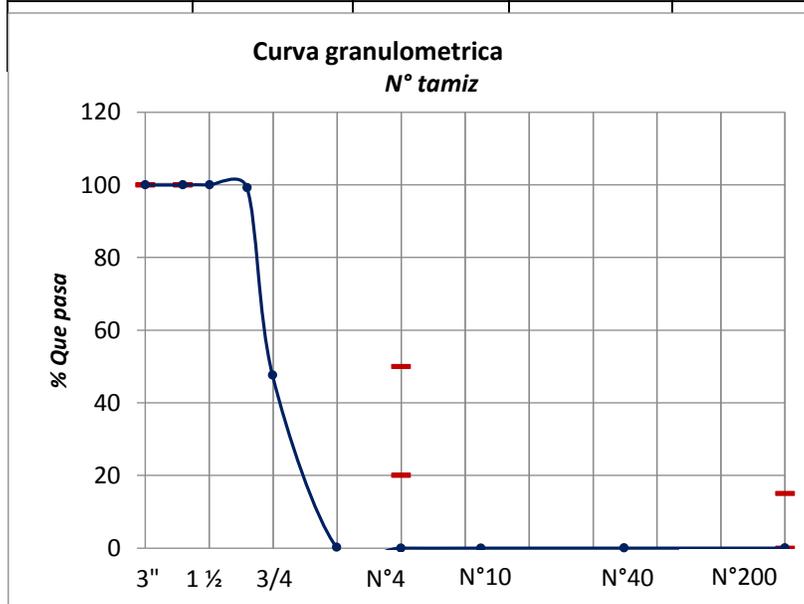
Humedad hidrocópica		Peso seco de la muestra total	
N° de Cápsula	7,00	Peso de Muestra total húmeda (gr):	6.025,00
Peso Sh+Cap. (gr):	713,80	Agregado Grueso retenido N° 4 (gr):	6.025,00
Peso Ss+Cap. (gr):	710,80	Pasa Tamiz N° 4 Húmedo (gr):	0,00
Peso de Cápsula (gr):	113,00	Pasa Tamiz N° 4 húmedo + pérdida (gr):	0,00
Peso del suelo Seco (gr):	597,80	Pasa Tamiz N° 4 seco (gr):	0,00
% de humedad:	0,50	Peso Muestra Total seca (gr):	6.025,00

Agregado grueso

N° Tamices	tamaño (mm)	Peso (grs.) Retenido	Retenido Acumulado	% Retenido	% pasa del total	%pasa total Corregido
3	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1 ½	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1	25,00	45,00	45,00	0,75	99,25	99,25
¾	19,00	3.110,00	3.155,00	52,37	47,63	47,63
⅜	9,50	2.855,00	6.010,00	99,75	0,25	0,25
N°4	4,75	15,00	6.025,00	100,00	0,00	0,00

Agregado fino

Peso del Suelo Húmedo grs.		1,00	Peso del Suelo Seco grs.		1,00
N°10	2,00	0,00	0,00	100,00	0,00
N°40	0,43	0,00	0,00	100,00	0,00
N°200	0,075	0,00	0,00	100,00	0,00



Clasificación	
Límite Líquido (LL)	
0	
Índice de Plasticidad (IP)	
0	
Método AASHTO	
A-1-a	I.G.
	0

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Material de cobertura (Suelo arcilloso).

Tabla 3.2 Clasificación granulométrica suelo arcilloso.

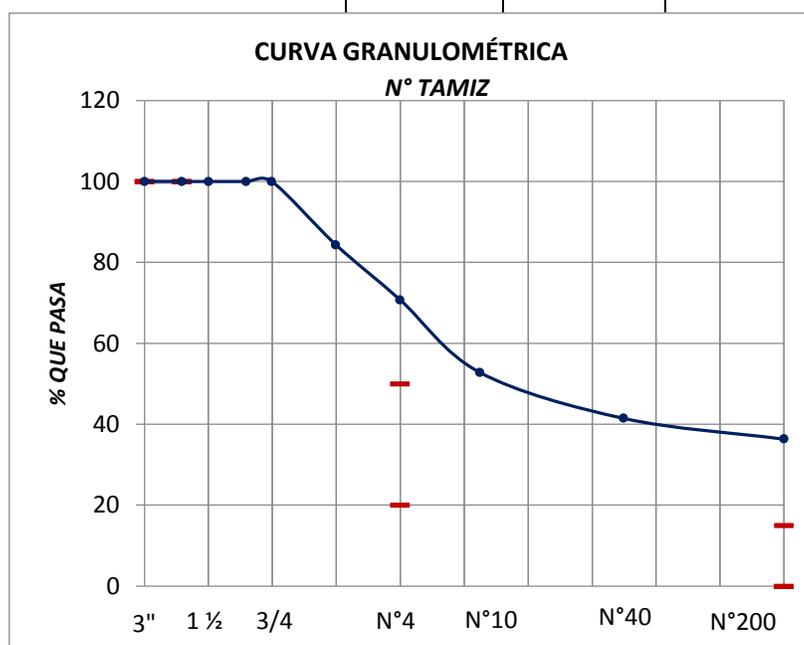
HUMEDAD HIGROSCÓPICA		PESO SECO DE LA MUESTRA TOTAL	
N° de Cápsula	8,00	Peso de Muestra total húmeda (gr):	6.000,00
Peso Sh+Cap. (gr):	685,60	Agregado Grueso retenido N° 4 (gr):	1.740,80
Peso Ss+Cap. (gr):	676,00	Pasa Tamiz N° 4 Húmedo (gr):	4.259,20
Peso de Cápsula (gr):	40,07	Pasa Tamiz N° 4 húmedo + pérdida (gr):	4.281,77
Peso del suelo Seco (gr):	635,93	Pasa Tamiz N° 4 seco (gr):	4.218,10
% de humedad:	1,51	Peso Muestra Total seca (gr):	5.958,90

AGREGADO GRUESO

N° Tamices	tamaño (mm)	Peso (grs.) Retenido	Retenido Acumulado	% Retenido	% pasa del total	%pasa total Corregido
3	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1 ½	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
¾	19,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
3/8	9,50	930,20	930,20	15,61	84,39	84,39
N°4	4,75	810,60	1.740,80	29,21	70,79	70,79

AGREGADO FINO

Peso del Suelo Húmedo grs.		300,00	Peso del Suelo Seco grs.		297,37
N°10	2,00	75,60	75,60	25,42	74,58
N°40	0,43	47,60	123,20	41,43	58,57
N°200	0,075	21,60	144,80	48,69	51,31



CLASIFICACIÓN

Límite Líquido (LL)

33,04

Índice de Plasticidad (IP)

23,74

MÉTODO AASHTO

A-6

I.G.

3

Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Material de cobertura (Suelo arenoso).

Tabla 3.3 Clasificación granulométrica suelo arenoso.

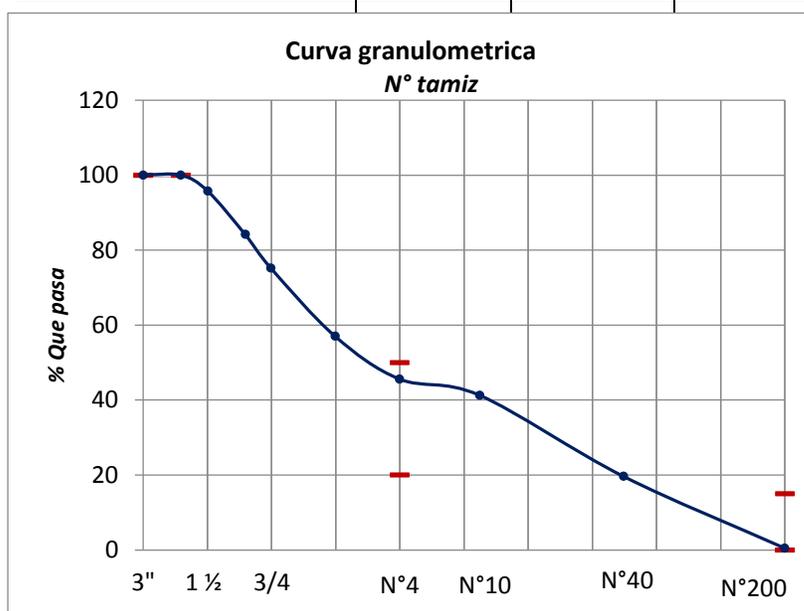
Humedad higroscópica		Peso seco de la muestra total	
N° de Cápsula	7,00	Peso de Muestra total húmeda (gr):	5.000,00
Peso Sh+Cap. (gr):	576,30	Agregado Grueso retenido N° 4 (gr):	2.718,90
Peso Ss+Cap. (gr):	573,30	Pasa Tamiz N° 4 Húmedo (gr):	2.281,10
Peso de Cápsula (gr):	141,30	Pasa Tamiz N° 4 húmedo + pérdida (gr):	2.293,19
Peso del suelo Seco (gr):	432,00	Pasa Tamiz N° 4 seco (gr):	2.277,37
% de humedad:	0,69	Peso Muestra Total seca (gr):	4.996,27

Agregado grueso

N° Tamices	tamaño (mm)	Peso (grs.) Retenido	Retenido Acumulado	% Retenido	% pasa del total	%pasa total Corregido
3	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
2	50,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1 ½	37,50	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
1	25,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00
¾	19,00	441,90	441,90	8,85	91,15	91,15
⅜	9,50	883,20	1.325,10	26,53	73,47	73,47
N°4	4,75	569,30	1.894,40	37,93	62,07	62,07

Agregado fino

Peso del Suelo Húmedo grs.		300,00	Peso del Suelo Seco grs.		299,78
N°10	2,00	28,50	28,50	9,51	90,49
N°40	0,43	150,60	179,10	59,74	40,26
N°200	0,075	115,90	295,00	98,41	1,59



Clasificación	
Límite Líquido (LL)	
0	
Índice de Plasticidad (IP)	
0	
Método AASHTO	
A-1-b	I.G.
	0

Fuente: Elaboración propia.

3.4. ENSAYO DE DESGASTE EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES.

Tabla 3.4 Ensayo de desgaste en la máquina de los Ángeles.

Gradación:	A	B	C	D
Carga abrasiva con: (N° de esferas a 32,5 RPM)	12	11	8	6

N° de tamiz que pasa	N° de tamiz retenido	Cantidad tomada (gr)
1 1/2"	1"	0
1"	3/4"	0
3/4"	1/2"	2.500
1/2"	3/8"	2.500
Cantidad total de material tomado		5.000

Retenido tamiz N° 12 (1,7 mm)	3.882
-------------------------------	-------

Diferencia:	1.119
-------------	-------

Desgaste: %	22,37
-------------	-------

Especificaciones: <	40,0
---------------------	------

Observaciones:	Cumple
----------------	--------

Fuente: Elaboración propia.

3.5. ENSAYO DE SOLIDEZ DE SULFATOS.

Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de sodio.

Peso inicial de la muestra a ensayar A = 1005,00 gr.

Número de ciclos de inmersión y secado = 5

Peso final de la muestra después de los ciclos y tamizado B = 995,8, gr.

$$P = \frac{A - B}{A} * 100 = \%$$

$$P = \frac{1005,00 - 995,80}{1005,00} * 100$$

$$P = 0,92 \%$$

Solidez de los agregados frente a la acción de solución de sulfato de magnesio.

Peso inicial de la muestra a ensayar A = 1005,00 gr.

Número de ciclos de inmersión y secado = 5

Peso final de la muestra después de los ciclos y tamizado B = 999,60 gr.

$$P = \frac{A - B}{A} * 100 = \%$$

$$P = \frac{1005,00 - 999,60}{1005,00} * 100$$

$$P = 0.54 \%$$

3.6. DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES EN LOS AGREGADOS.

M= Peso inicial de la muestra a ensayar = 2000,00 gr.

R= Masa de las partículas retenidas sobre el tamiz designado para remover el residuo = 2000,00 gr.

$$P = \frac{M - R}{M} * 100$$

$$P = \frac{2000,00 - 2000,00}{2000,00} * 100$$

$$P = 0 \%$$

3.7. DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PARTÍCULAS LIVIANAS EN LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Peso de la muestra de ensayo = 5000,00 gr.

M₁= Peso seco de las partículas retenidas en el colador = 0,00 gr

M₃= Peso seco de la porción de la muestra retenida en el tamiz de 4.75 mm (Nº 4) = 5000,00 gr

$$L = \frac{M_1}{M_3} \times 100$$

$$L = \frac{0,00}{5000,00} * 100$$

$$L = 0 \%$$

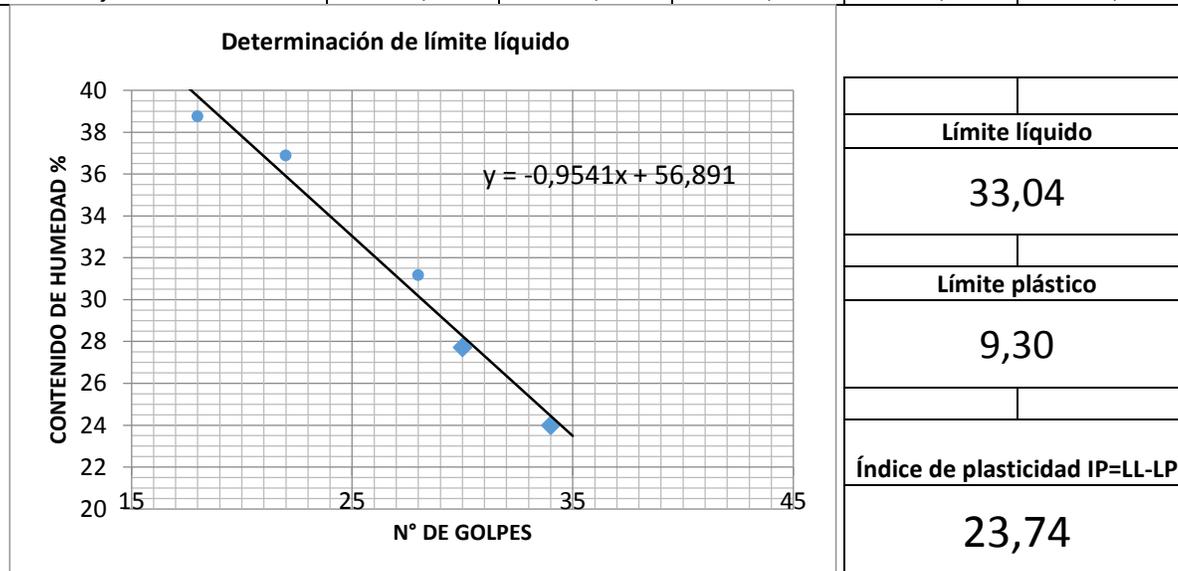
3.8. DETERMINACIÓN DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.

Este ensayo no se realizó debido a que el material granular drenante no cuenta con porciones de material que pasen el tamiz N°10 como se requiere para la realización de este ensayo.

3.9. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO.

Tabla 3.5 Determinación del índice de plasticidad.

Límite líquido (LL)					
Cápsula N°	1	88	43	T4	T5
Suelo húmedo + Cápsula (gr)	40,70	41,60	39,70	29,60	37,20
Suelo seco + Cápsula (gr)	34,50	36,40	35,40	26,80	33,60
Peso de agua (gr)	6,20	5,20	4,30	2,80	3,60
Peso de Cápsula (gr)	18,50	22,30	21,60	16,70	18,60
Peso suelo seco (gr)	16,00	14,10	13,80	10,10	15,00
N° de golpes	18	22	28	30	34
Porcentaje de humedad %	38,75	36,88	31,16	27,72	24,00



Fuente: Elaboración propia.

3.10. DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD.

El valor del índice de plasticidad es la diferencia entre el valor del límite líquido y el límite plástico.

Tabla 3.6. Determinación del límite plástico.

Límite plástico (LP)			
Cápsula N°	A	B	C
Suelo húmedo + Cápsula (gr)	18,90	19,10	19,50
Suelo seco + Cápsula (gr)	18,81	19,01	19,40
Peso de agua (gr)	0,09	0,09	0,10
Peso de Cápsula (gr)	17,90	18,00	18,30
Peso suelo seco (gr)	0,91	1,01	1,10
Porcentaje de humedad %	9,89	8,91	9,09

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.7 Resultados clasificación material granular drenante.

Ensayos	Requisitos del material	Resultados ensayo realizado	
Dureza			
Desgaste en la máquina de los Ángeles (%)	< 40	22,37	Cumple
Durabilidad			
Ensayo en solidez de sulfatos			
Sulfato de sodio (%)	<12	0,92	Cumple
Sulfato de magnesio (%)	<18	0,54	Cumple
Limpieza			
Terrones de arcilla y partículas deleznales, máximo (%)	0,25	0	Cumple
Partículas livianas máximo (%)	1	0	Cumple
Contenido de materia orgánica (%)	0	0	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

3.11. PERMEABILIDAD.

3.11.1. Cálculo de coeficiente de permeabilidad.

3.11.1.1. Permeámetro con geotextil suelo arcilloso.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{100}{7,34}$$

$$Q = 13,624 \text{ cm}^3/\text{seg}$$

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{144,60 - 23,50}{15,10}$$

$$i = 8,02 \text{ cm/cm}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 7,70^2}{4} = 46,57 \text{ cm}^2$$

$$k = \frac{Q}{i * A} = \frac{13,624}{8,02 * 46,57}$$

$$k = 0,03648 \text{ cm}/\text{seg}$$

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.8 Coeficiente de permeabilidad, permeámetro con geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Volumen V (ml)	Tiempo t (seg)	Gradiente hidráulico i (cm/cm)	Área de la muestra A (cm ²)	Caudal Q (cm ³ /seg)	Coeficiente de permeabilidad k (cm/seg)	Coeficiente de permeabilidad k corregido (cm/seg)
100	7,34	8,02	46,57	13,624	0,03648	0,03561
100	7,37	8,02	46,57	13,569	0,03633	0,03546
100	7,32	8,02	46,57	13,661	0,03658	0,03570
100	7,29	8,02	46,57	13,717	0,03673	0,03585
100	7,35	8,02	46,57	13,605	0,03643	0,03556
100	7,3	8,02	46,57	13,699	0,03668	0,03580
100	7,34	8,02	46,57	13,624	0,03648	0,03561
100	7,37	8,02	46,57	13,569	0,03633	0,03546
100	7,27	8,02	46,57	13,755	0,03683	0,03595
100	7,35	8,02	46,57	13,605	0,03643	0,03556

Fuente: Elaboración propia.

3.11.1.2. Permeámetro sin geotextil suelo arcilloso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.9 Coeficiente de permeabilidad, permeámetro sin geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Nº	H1 (cm)	H2 (cm)	Tiempo t (seg)	Área de la muestra A (cm ²)	Área de la bureta a (cm ²)	Coeficiente de permeabilidad k (cm/seg)	Coeficiente de permeabilidad k corregido (cm/seg)
1	94	92	105,93	46,57	0,126	8,27E-06	8,69E-06
2	92	90	108,13	46,57	0,126	8,28E-06	8,70E-06
3	90	88	110,74	46,57	0,126	8,27E-06	8,69E-06
4	88	86	113,63	46,57	0,126	8,24E-06	8,66E-06
5	86	84	116,83	46,57	0,126	8,21E-06	8,63E-06
6	84	82	118,91	46,57	0,126	8,26E-06	8,68E-06
7	82	80	121,43	46,57	0,126	8,29E-06	8,71E-06
8	80	78	125,56	46,57	0,126	8,22E-06	8,63E-06
9	78	76	128,36	46,57	0,126	8,25E-06	8,67E-06
10	76	74	131,52	46,57	0,126	8,26E-06	8,68E-06

Fuente: Elaboración propia.

3.11.1.3. Permeámetro con geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.10 Coeficiente de permeabilidad, permeámetro con geotextil suelo arenoso, tiempo de 2 días.

Volumen V (ml)	Tiempo t (seg)	Gradiente hidráulico i (cm/cm)	Área de la muestra A (cm ²)	Caudal Q (cm ³ /seg)	Coeficiente de permeabilidad k (cm/seg)	Coeficiente de permeabilidad k corregido (cm/seg)
100	6,79	7,85	46,57	14,728	0,04030	0,03934
100	6,86	7,85	46,57	14,577	0,03989	0,03894
100	6,82	7,85	46,57	14,663	0,04012	0,03916
100	6,88	7,85	46,57	14,535	0,03977	0,03882
100	6,77	7,85	46,57	14,771	0,04042	0,03945
100	6,81	7,85	46,57	14,684	0,04018	0,03922
100	6,85	7,85	46,57	14,599	0,03995	0,03899
100	6,87	7,85	46,57	14,556	0,03983	0,03888
100	6,8	7,85	46,57	14,706	0,04024	0,03928
100	6,85	7,85	46,57	14,599	0,03995	0,03899

Fuente: Elaboración propia.

3.11.1.4. Permeámetro sin geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.11 Coeficiente de permeabilidad, permeámetro sin geotextil suelo arenoso, tiempo de 2 días.

Volumen V (ml)	Tiempo t (seg)	Gradiente hidráulico i (cm/cm)	Área de la muestra A (cm ²)	Caudal Q (cm ³ /seg)	Coeficiente de permeabilidad k (cm/seg)	Coeficiente de permeabilidad k corregido (cm/seg)
100	22,74	8,02	46,57	4,398	0,01178	0,01207
100	22,7	8,02	46,57	4,405	0,01180	0,01209
100	22,66	8,02	46,57	4,413	0,01182	0,01211
100	22,63	8,02	46,57	4,419	0,01183	0,01212
100	22,72	8,02	46,57	4,401	0,01179	0,01208
100	22,79	8,02	46,57	4,388	0,01175	0,01204
100	22,74	8,02	46,57	4,398	0,01178	0,01207
100	22,69	8,02	46,57	4,407	0,01180	0,01209
100	22,75	8,02	46,57	4,396	0,01177	0,01206
100	22,71	8,02	46,57	4,403	0,01179	0,01208

Fuente: Elaboración propia.

3.11.2.- Comparación de coeficientes de permeabilidad obtenidos.

De acuerdo al análisis de resultados obtenidos en el ensayo de permeabilidad para los diferentes tipos de material de cobertura usados para el experimento realizado, se puede observar que la permeabilidad en subdrenes con geotextil aumenta en comparación a las subdrenes sin geotextil en los cuales la permeabilidad disminuye esto implica que no los subdrenes sin geotextil no puedan evacuar las aguas con facilidad por lo tanto es recomendable la utilización de geotextil en subdrenes granulares.

Tabla 3.12 Comparación de coeficientes de permeabilidad obtenidos.

Permeabilidad				
Tiempo t = Días	Coeficiente de permeabilidad K= (cm/seg)			
	Suelo arcilloso		Suelo arenoso	
	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil
T	P.C.G	P.C.SG	P.A.G	P.A.SG

2	0,0365	8,67E-06	0,0391	0,0121
3	0,0368	4,84E-06	0,0368	0,0088
4	0,0372	4,71E-06	0,0356	0,0095
5	0,0343	4,64E-06	0,0348	0,0092
8	0,0365	4,51E-06	0,0340	0,0183
9	0,0342	4,42E-06	0,0337	0,0134
10	0,0314	4,08E-06	0,0321	0,0173
11	0,0325	3,78E-06	0,0309	0,0121
12	0,0337	3,68E-06	0,0304	0,0130
15	0,0321	3,36E-06	0,0276	0,0175

Fuente: Elaboración propia.

3.12. COLMATACIÓN.

3.12.1. Cálculo de colmatación.

Peso de los sólidos de la muestra

$$W_s = \frac{W_t}{1 + w} = \frac{613}{1 + \left(\frac{0.50}{100}\right)} = 609,95 \text{ gr.}$$

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} = \frac{609,95}{230} = 2,65 \text{ gr/cm}^3$$

$$\gamma = \frac{W_t}{V_t} = \frac{613}{372,53} = 1,65 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_t = A * L = 46,57 * 8 = 372,53 \text{ cm}^3$$

$$V_s = C - B = 830 - 600 = 230 \text{ cm}^3$$

Relación de vacíos

$$e = \frac{(1 + w) * \gamma_s - \gamma}{\gamma} = \frac{\left(1 + \frac{0,50}{100}\right) * 2,65 - 1,65}{1,65}$$

$$e = 0,62$$

3.12.1.1. Permeámetro con geotextil suelo arcilloso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.13 Colmatación permeámetro con geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Contenido de humedad w (%) =	0,50
Peso total de la muestra Wt (gr) =	613,00
Diámetro de la muestra D (cm)=	7,70
Área de muestra A (cm ²) =	46,57
Longitud de la muestra de suelo L (cm)	8,00
Volumen total de la muestra de suelo Vt (cm ³) =	372,53
Peso por unidad de volumen γ (gr/cm ³) =	1,65
Peso de los sólidos de la muestra Ws (gr) =	609,95
Volumen de agua inicial en probeta B (cm ³) =	600,00
Volumen de agua + sólidos en probeta C (cm ³) =	830,00
Volumen de solidos de la muestra Vs (cm ³) =	230,00
Peso volumétrico de los sólidos γ_s (gr/cm) =	2,65
Relación de vacíos e (adimensional) =	0,620

Fuente: Elaboración propia.

3.12.1.2. Permeámetro sin geotextil suelo arcilloso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.14 Colmatación permeámetro sin geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Contenido de humedad w (%) =	0,50
Peso total de la muestra Wt (gr) =	586,20
Diámetro de la muestra D (cm)=	7,70
Área de muestra A (cm ²) =	46,57
Longitud de la muestra de suelo L (cm)	8,00
Volumen total de la muestra de suelo Vt (cm ³) =	372,53
Peso por unidad de volumen γ (gr/cm ³) =	1,57
Peso de los sólidos de la muestra Ws (gr) =	583,28
Volumen de agua inicial en probeta B (cm ³) =	600,00
Volumen de agua + sólidos en probeta C (cm ³) =	840,00

Volumen de solidos de la muestra V_s (cm ³) =	240,00
Peso volumétrico de los sólidos γ_s (gr/cm) =	2,43
Relación de vacíos e (adimensional) =	0,552

Fuente: Elaboración propia.

3.12.1.3. Permeámetro con geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.15 Colmatación permeámetro con geotextil suelo arenoso, tiempo de 2 días.

Contenido de humedad w (%) =	0,50
Peso total de la muestra W_t (gr) =	586,20
Diámetro de la muestra D (cm)=	7,70
Área de muestra A (cm ²) =	46,57
Longitud de la muestra de suelo L (cm)	8,00
Volumen total de la muestra de suelo V_t (cm ³) =	372,53
Peso por unidad de volumen γ (gr/cm ³) =	1,57
Peso de los sólidos de la muestra W_s (gr) =	583,28
Volumen de agua inicial en probeta B (cm ³) =	600,00
Volumen de agua + sólidos en probeta C (cm ³) =	820,00
Volumen de solidos de la muestra V_s (cm ³) =	220,00
Peso volumétrico de los sólidos γ_s (gr/cm) =	2,65
Relación de vacíos e (adimensional) =	0,693

Fuente: Elaboración propia.

3.12.1.4. Permeámetro sin geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.16 Colmatación permeámetro sin geotextil suelo arenoso, tiempo de 2 días.

Contenido de humedad w (%) =	0,50
Peso total de la muestra W_t (gr) =	617,90
Diámetro de la muestra D (cm)=	7,70
Área de muestra A (cm ²) =	46,57
Longitud de la muestra de suelo L (cm)	8,00
Volumen total de la muestra de suelo V_t (cm ³) =	372,53
Peso por unidad de volumen γ (gr/cm ³) =	1,66
Peso de los sólidos de la muestra W_s (gr) =	614,83
Volumen de agua inicial en probeta B (cm ³) =	600,00
Volumen de agua + sólidos en probeta C (cm ³) =	860,00
Volumen de sólidos de la muestra V_s (cm ³) =	260,00
Peso volumétrico de los sólidos γ_s (gr/cm) =	2,36
Relación de vacíos e (adimensional) =	0,433

Fuente: Elaboración propia.

3.12.2. Comparación de colmatación obtenida.

De acuerdo al análisis de resultados obtenidos en la variable colmatación para los diferentes tipos de material de cobertura usados para el experimento realizado, se puede observar que la relación de vacíos para los suelos con geotextil son mayores que para los suelos sin geotextil resultandos que comprueban que en los subdrenes con geotextil los poros del material granular drenante no se colmatan como los subdrenes sin geotextil.

Tabla 3.17 Comparación de colmatación obtenida.

Colmatación				
Tiempo t = Días	Relación de vacíos			
	Suelo arcilloso		Suelo arenoso	
	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil
2	0,620	0,552	0,693	0,433
3	0,620	0,521	0,693	0,461
4	0,620	0,490	0,693	0,521
5	0,620	0,433	0,693	0,406
8	0,620	0,406	0,693	0,490
9	0,620	0,380	0,693	0,552
10	0,620	0,355	0,693	0,585
11	0,620	0,330	0,693	0,585
12	0,620	0,307	0,693	0,620
15	0,620	0,242	0,693	0,521

Fuente: Elaboración propia.

3.13. PORCENTAJE DE PARTÍCULAS QUE PASAN.

3.13.1. Cálculo de porcentaje de partículas que pasan.

Porcentaje de partículas que pasan (%) = P (%)

Peso material de cobertura + geotextil saturado inicial (gr) = A

Peso material de cobertura + geotextil saturado a días de carga (gr) = B

$$P (\%) = \frac{A - B}{A} * 100$$

$$P (\%) = \frac{648,1 - 647,8}{648,1} * 100$$

$$P (\%) = 0,046 \%$$

3.13.1.1. Permeámetro con geotextil suelo arcilloso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.18 Porcentaje de partículas que pasan permeámetro con geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Peso material granular drenante inicial (gr) =	465,20
Peso material de cobertura inicial (gr) =	613,00
Peso material de cobertura + geotextil saturado inicial (gr) =	648,10
Peso material de cobertura + geotextil seco (gr) =	622,50
Peso del geotextil (gr) =	9,50
Peso material de cobertura + geotextil saturado a 2 días (gr) =	647,80
Porcentaje de partículas que pasan (%) =	0,046

Fuente: Elaboración propia.

3.13.1.2. Permeámetro sin geotextil suelo arcilloso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.19 Porcentaje de partículas que pasan permeámetro sin geotextil suelo arcilloso, tiempo de 2 días.

Peso material drenante (gr) =	543,20
Peso material de cobertura (gr) =	590,10
Peso material drenante + pasante de cobertura (gr) =	586,20
peso material de cobertura sobrante (gr) =	547,10
Peso material pasante (gr) =	43,00
Porcentaje de partículas que pasan (%)=	7,29

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.20 Granulometría de porcentaje de partículas que pasan permeámetro sin geotextil suelo arcilloso, tiempo 2 días

Tamiz N°	Peso Ret. (gr)	Ret. Acumulado	% Retenido	% pasa del total
3/4"	256,70	256,70	43,79	56,21
3/8"	286,50	543,20	92,66	7,34
N°4	7,50	550,70	93,94	6,06
N°10	9,50	560,20	95,56	4,44
N°40	12,40	572,60	97,68	2,32
N°200	11,50	584,10	99,64	0,36
Pasa N°200	2,10	586,20	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.13.1.3. Permeámetro con geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.21 Porcentaje de partículas que pasan permeámetro con geotextil suelo arenoso, tiempo 2 días.

Peso material granular drenante inicial (gr) =	573,90
Peso material de cobertura inicial (gr) =	541,60
Peso material de cobertura + geotextil saturado inicial (gr) =	562,80
Peso material de cobertura + geotextil seco (gr) =	551,40
Peso del geotextil (gr) =	9,80
Peso material de cobertura + geotextil saturado a 2 días (gr) =	562,50
Porcentaje de partículas que pasan (%) =	0,053

Fuente: Elaboración propia.

3.13.1.4. Permeámetro sin geotextil suelo arenoso.

Tiempo = 2 días.

Tabla 3.22 Porcentaje de partículas que pasan permeámetro sin geotextil suelo arenoso, tiempo 2 días.

Peso material drenante (gr) =	520,40
Peso material de cobertura (gr) =	794,70
Peso material drenante + pasante de cobertura (gr) =	617,90
peso material de cobertura sobrante (gr) =	697,20
peso material pasante (gr) =	97,50
Porcentaje de partículas que pasan (%)=	12,27

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.23 Granulometría de porcentaje de partículas que pasan permeámetro sin geotextil suelo arenoso, tiempo 2 días.

Tamiz N°	Peso Ret. (gr)	Ret. Acumulado	% Retenido	% pasa del total
3/4"	152,50	152,50	24,68	75,32
3/8"	367,90	520,40	84,22	15,78
N°4	11,10	531,50	86,02	13,98
N°10	15,70	547,20	88,56	11,44
N°40	29,70	576,90	93,36	6,64
N°200	34,80	611,70	99,00	1,00
Pasa N°200	6,20	617,90	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

3.13.2. Comparación de porcentaje de partículas que pasan.

De acuerdo al análisis de resultados obtenidos en la variable porcentaje de partículas que pasan para los diferentes tipos de material de cobertura usados para el experimento realizado, se puede observar que el porcentaje de partículas que pasan en los subdrenes con geotextil es mínimo comparado con los subdrenes sin geotextil, comprobando que con la utilización de geotextil éste evita el paso de las partículas del material de cobertura hacia el material drenante evitando la colmatación de los poros del material granular drenante.

Tabla 3.24 Comparación de porcentaje de partículas que pasan.

Tiempo t = Días	Porcentaje de partículas que pasan P = (%)			
	Suelo arcilloso		Suelo arenoso	
	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil
2	0,046	7,29	0,053	12,27
3	0,077	9,11	0,053	12,00
4	0,093	10,15	0,053	8,91
5	0,093	11,35	0,053	12,47
8	0,093	12,43	0,053	7,82
9	0,093	12,51	0,053	9,23
10	0,093	13,42	0,053	9,23
11	0,093	13,87	0,053	10,05
12	0,093	14,36	0,053	9,86
15	0,093	15,90	0,053	9,32

Fuente: Elaboración propia.

3.14. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO POR VARIABLES.

3.14.1. Estadística descriptiva.

3.14.1.1. Permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.

Tabla 3.25 Resumen estadístico permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,034
Mediana	0,034
Moda	0,036
Media geométrica	0,035
Varianza	0,000004524
Desviación estándar	0,0021

Coefficiente de variación	6,161%
Error estándar	0,00067
Mínimo	0,031
Máximo	0,037
Rango	0,006
Rango intercuartílico	0,004
Sesgo estandarizado	-0,126
Curtosis	-1,614
Curtosis estandarizada	-1,042

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para permeabilidad suelo arcilloso con geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.26 Frecuencias para permeabilidad de suelo arcilloso con geotextil.

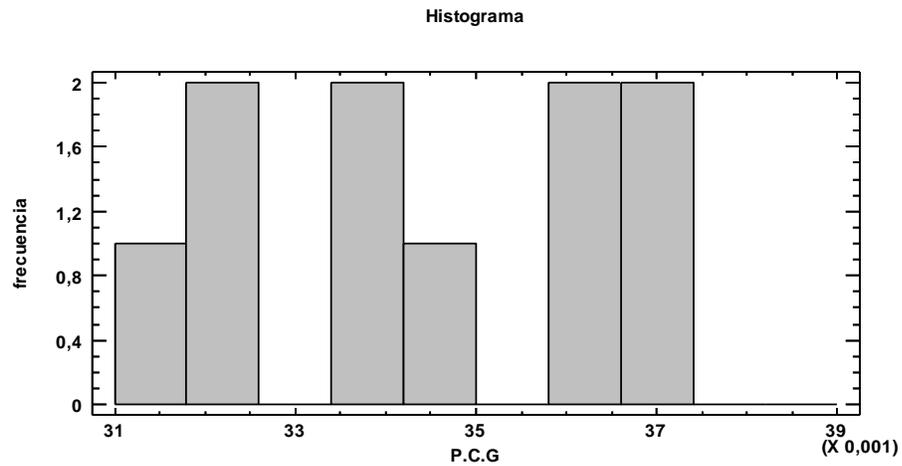
	Límite	Límite			Frec.	Frec.	Frec.
Clase	Inf.	Sup.	Punto medio	Frec.	Rel.	Acum.	Rel. Acum.
	Menor o igual	0,031		0	0,000	0	0,0000
1	0,031	0,032	0,031	1	0,100	1	0,100
2	0,032	0,033	0,032	2	0,200	3	0,300
3	0,033	0,033	0,033	0	0,000	3	0,300
4	0,033	0,034	0,034	2	0,200	5	0,500
5	0,034	0,035	0,035	1	0,100	6	0,600
6	0,035	0,036	0,035	0	0,000	6	0,600
7	0,036	0,037	0,036	2	0,200	8	0,800
8	0,037	0,037	0,037	2	0,200	10	1,000
9	0,037	0,038	0,038	0	0,000	10	1,000
10	0,038	0,039	0,039	0	0,000	10	1,000

	Mayor de	0,039		0	0,000	10	1,000
--	----------	-------	--	---	-------	----	-------

Fuente: Elaboración propia.

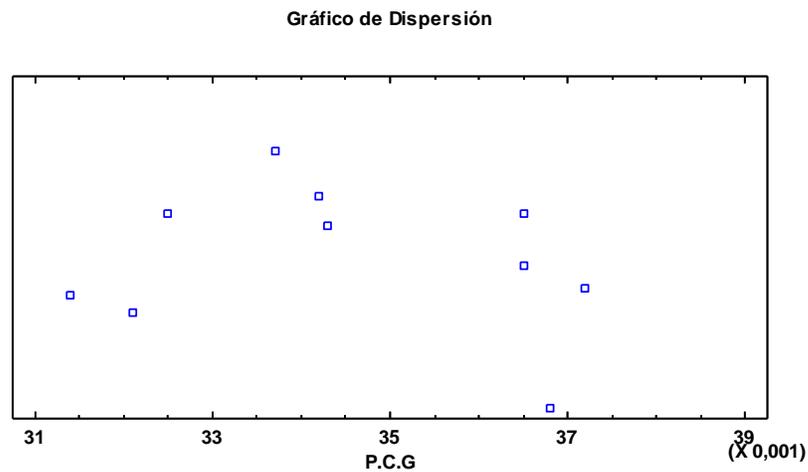
Media = 0,0345 Desviación estándar = 0,0021

Gráfico 1 Histograma de frecuencias permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.



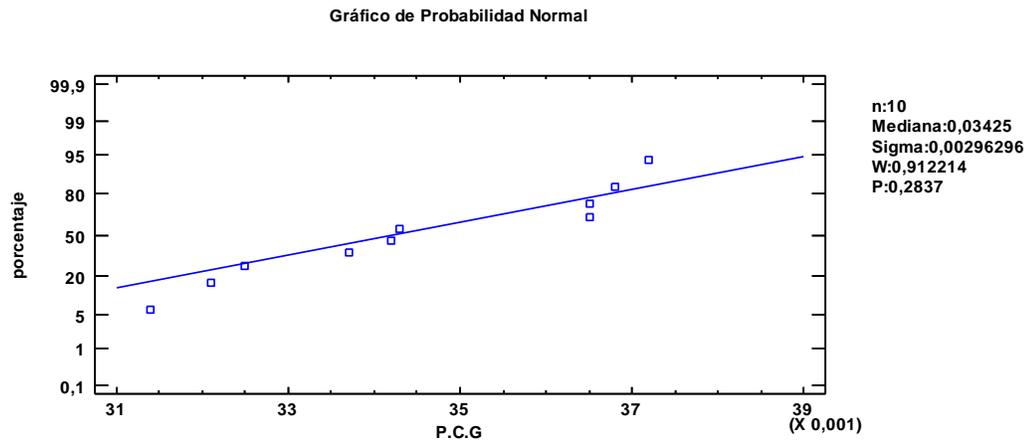
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 2 Dispersión permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.



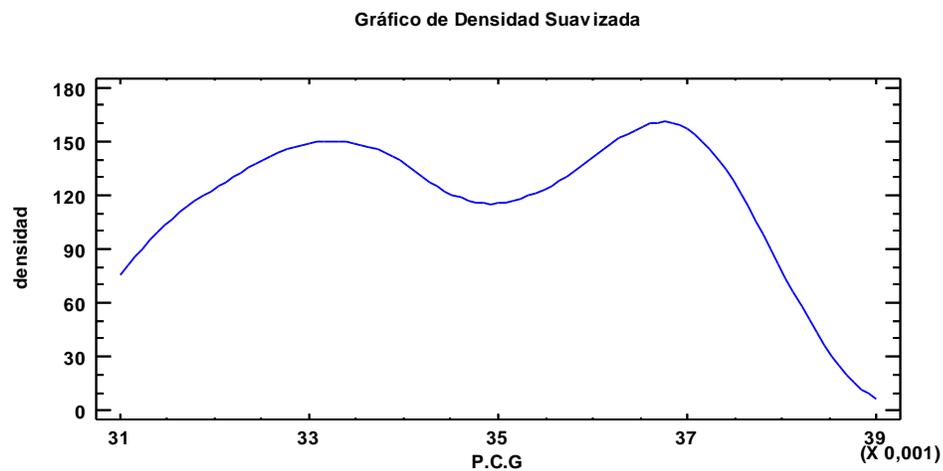
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3 Probabilidad normal permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4 Densidad suavizada permeabilidad suelo arcilloso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.2. Permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.

Tabla 3.27 Resumen estadístico permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,0000047
Mediana	0,0000045
Moda	
Media geométrica	0,0000045
Varianza	2,21732E-12

Desviación estándar	0,0000015
Coefficiente de variación	31,893%
Error estándar	4,709E-7
Mínimo	0,0000034
Máximo	0,0000087
Rango	0,0000053
Rango intercuartílico	9,300E-7
Sesgo estandarizado	3,254
Curtosis	7,243
Curtosis estandarizada	4,675

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.28 Frecuencias para permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.

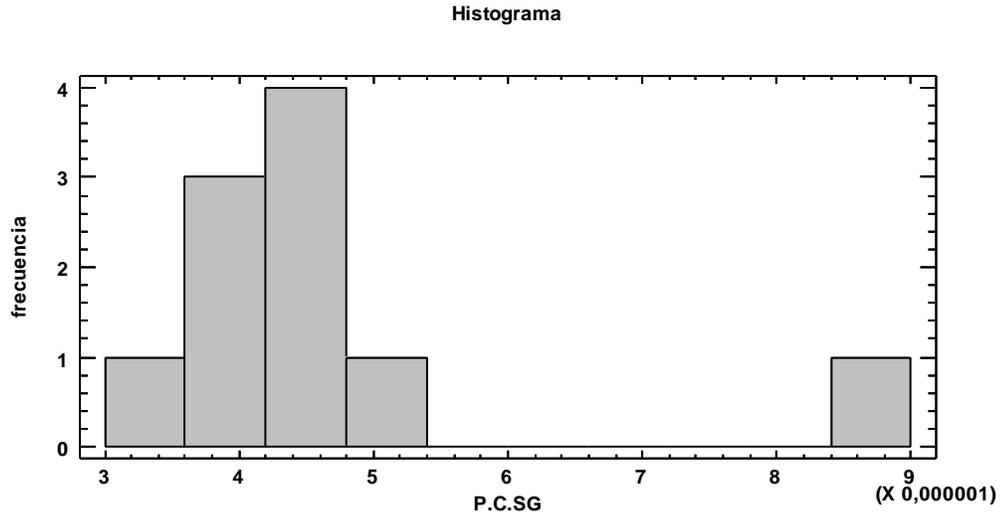
Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,000003		0	0,000	0	0,000
1	0,0000030	0,0000036	0,0000033	1	0,100	1	0,100
2	0,0000036	0,0000042	0,0000039	3	0,300	4	0,400
3	0,0000042	0,0000048	0,0000045	4	0,400	8	0,800
4	0,0000048	0,0000054	0,0000051	1	0,100	9	0,900
5	0,0000054	0,0000060	0,0000057	0	0,000	9	0,900
6	0,000006	0,0000066	0,0000063	0	0,000	9	0,900
7	0,0000066	0,0000072	0,0000069	0	0,000	9	0,900
8	0,0000072	0,0000078	0,0000075	0	0,000	9	0,900
9	0,0000078	0,0000084	0,0000081	0	0,000	9	0,900

10	0,0000084	0,000009	0,0000087	1	0,100	10	1,000
	Mayor de	0,000009		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

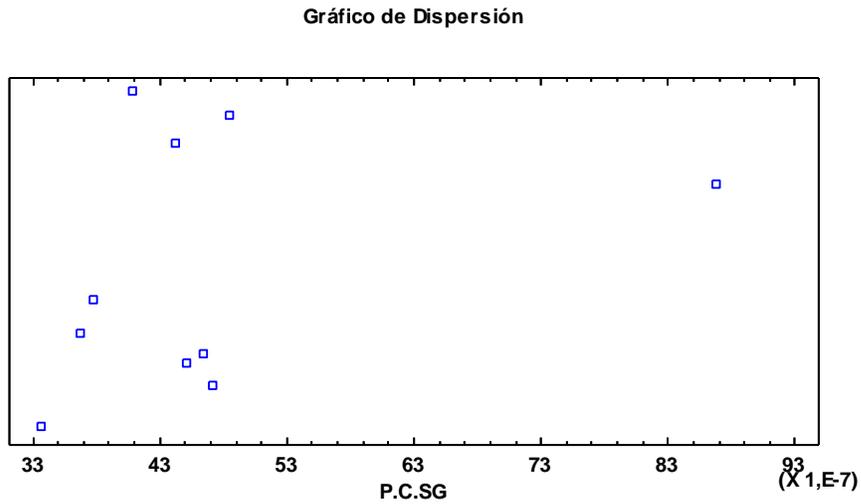
Media = 0,000004669 Desviación estándar = 0,00000148907

Gráfico 5 Histograma de frecuencias permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.



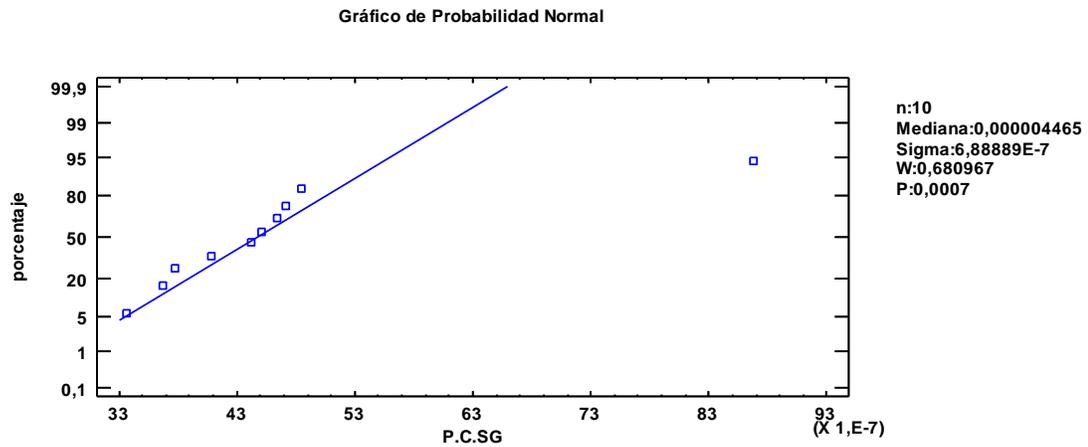
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6 Dispersión permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.



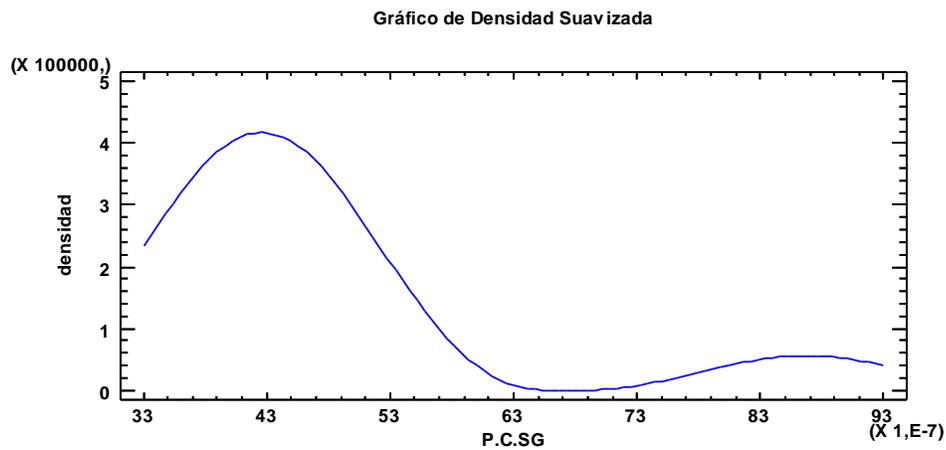
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7 Probabilidad normal permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8 Densidad suavizada permeabilidad suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.3. Permeabilidad suelo arenoso con geotextil.

Tabla 3.29 Resumen estadístico permeabilidad suelo arenoso con geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,034
Mediana	0,034
Moda	
Media geométrica	0,033

Varianza	0,0000113
Desviación estándar	0,003
Coefficiente de variación	10,038%
Error estándar	0,001
Mínimo	0,028
Máximo	0,039
Rango	0,012
Rango intercuartílico	0,005
Sesgo estandarizado	-0,153
Curtosis	-0,110
Curtosis estandarizada	-0,071

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para permeabilidad suelo arenoso con geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.30 Frecuencias para permeabilidad suelo arenoso con geotextil.

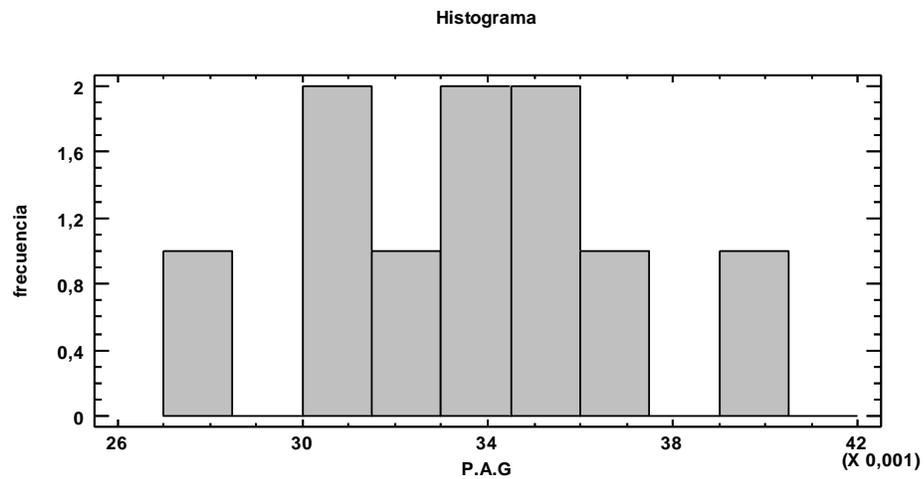
Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec .	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,027		0	0,000	0	0,000
1	0,027	0,029	0,028	1	0,100	1	0,100
2	0,028	0,030	0,029	0	0,000	1	0,100
3	0,030	0,032	0,031	2	0,200	3	0,300
4	0,032	0,033	0,032	1	0,100	4	0,400
5	0,033	0,035	0,034	2	0,200	6	0,600
6	0,035	0,036	0,035	2	0,200	8	0,800
7	0,036	0,038	0,038	1	0,100	9	0,900
8	0,038	0,039	0,038	0	0,000	9	0,900

9	0,039	0,041	0,040	1	0,100	10	1,000
10	0,041	0,042	0,041	0	0,000	10	1,000
	Mayor de	0,042		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

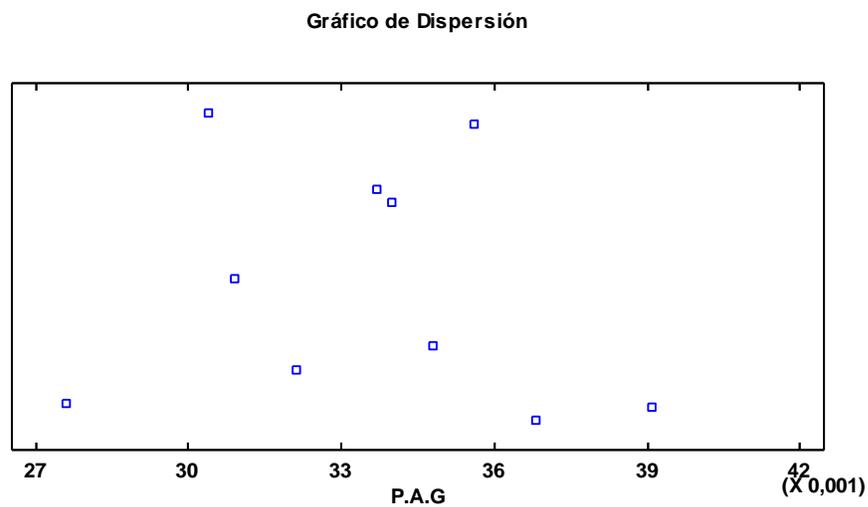
Media = 0,034 Desviación estándar = 0,0034

Gráfico 9 Histograma de frecuencias permeabilidad suelo arenoso con geotextil.



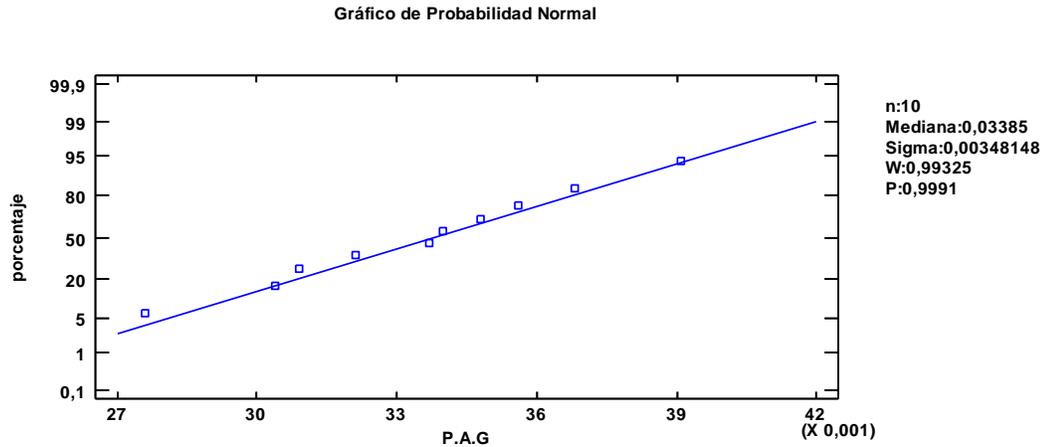
Fuente: elaboración propia.

Gráfico 10 Dispersión permeabilidad suelo arenoso con geotextil.



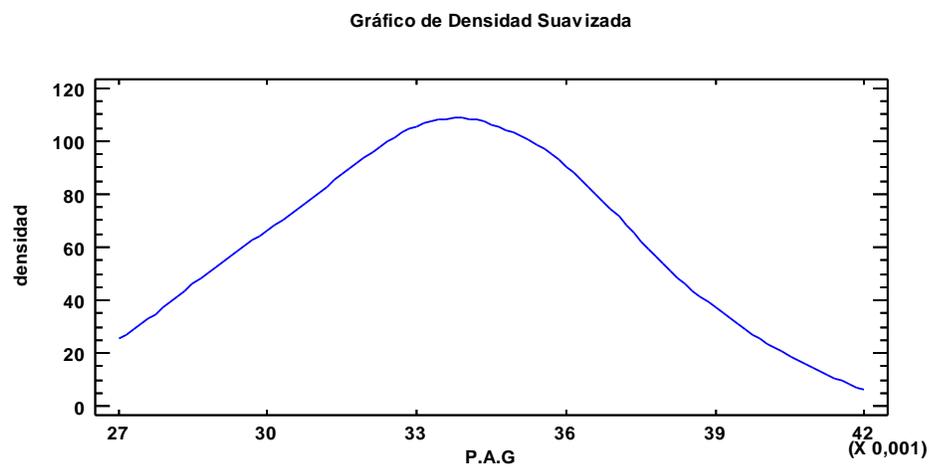
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11 Probabilidad normal permeabilidad suelo arenoso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12 Densidad suavizada permeabilidad suelo arenoso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.4. Permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.

Tabla 3.31 Resumen estadístico para permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,013
Mediana	0,013
Moda	0,012
Media geométrica	0,013
Varianza	0,000013
Desviación estándar	0,0035
Coficiente de variación	26,983%

Error estándar	0,00112
Mínimo	0,009
Máximo	0,018
Rango	0,010
Rango intercuartílico	0,008
Sesgo estandarizado	0,427
Curtosis	-1,350
Curtosis estandarizada	-0,871

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para permeabilidad suelo arenoso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

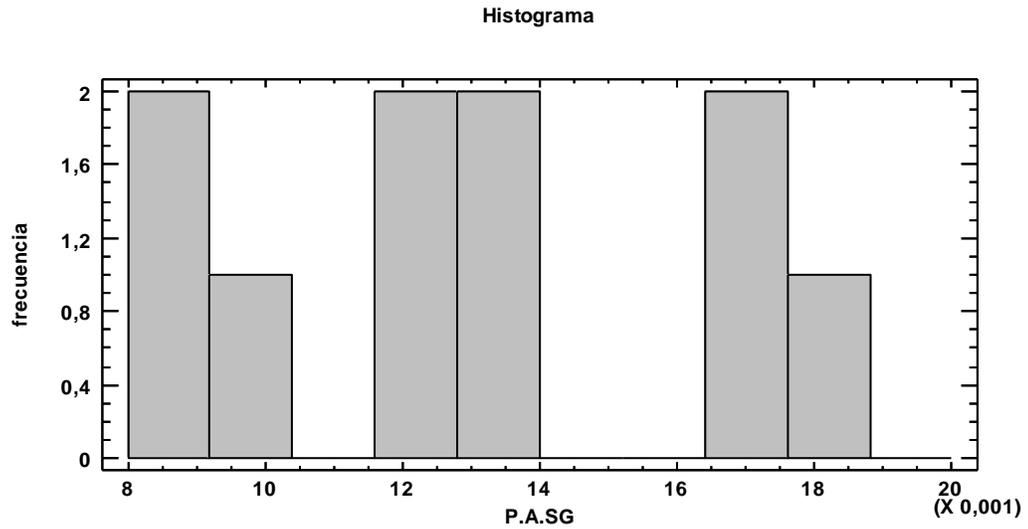
Tabla 3.32 Frecuencias para permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.

Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,008		0	0,000	0	0,000
1	0,008	0,009	0,009	2	0,200	2	0,200
2	0,009	0,010	0,010	1	0,100	3	0,300
3	0,010	0,012	0,011	0	0,000	3	0,300
4	0,012	0,013	0,012	2	0,200	5	0,500
5	0,013	0,014	0,013	2	0,200	7	0,700
6	0,014	0,015	0,015	0	0,000	7	0,700
7	0,015	0,016	0,016	0	0,000	7	0,700
8	0,016	0,018	0,017	2	0,200	9	0,900
9	0,018	0,019	0,018	1	0,100	10	1,000
10	0,019	0,020	0,019	0	0,000	10	1,000
	Mayor de	0,020		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

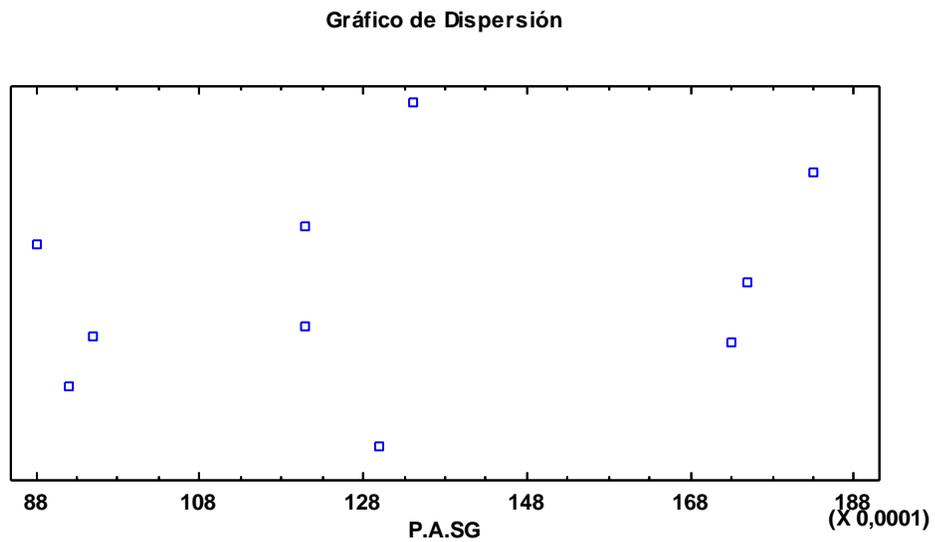
Media = 0,0131 Desviación estándar = 0,0035

Gráfico 13 Histograma permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.



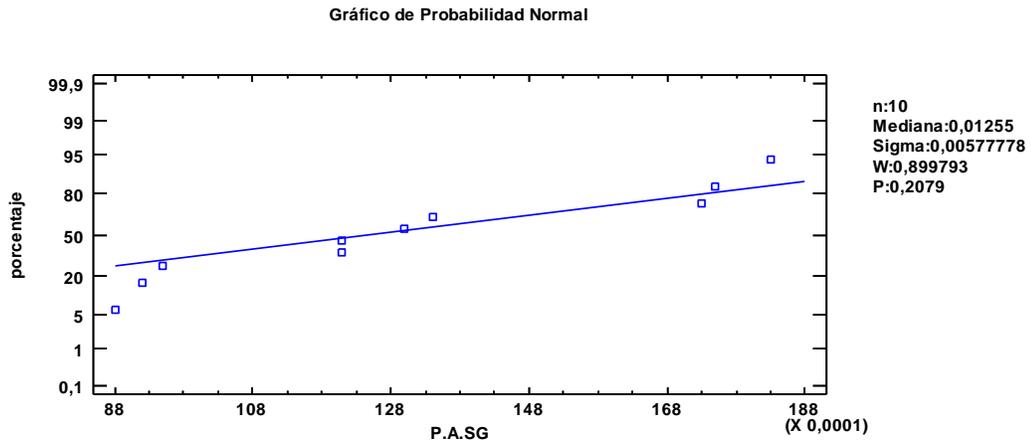
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 14 Dispersión permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.



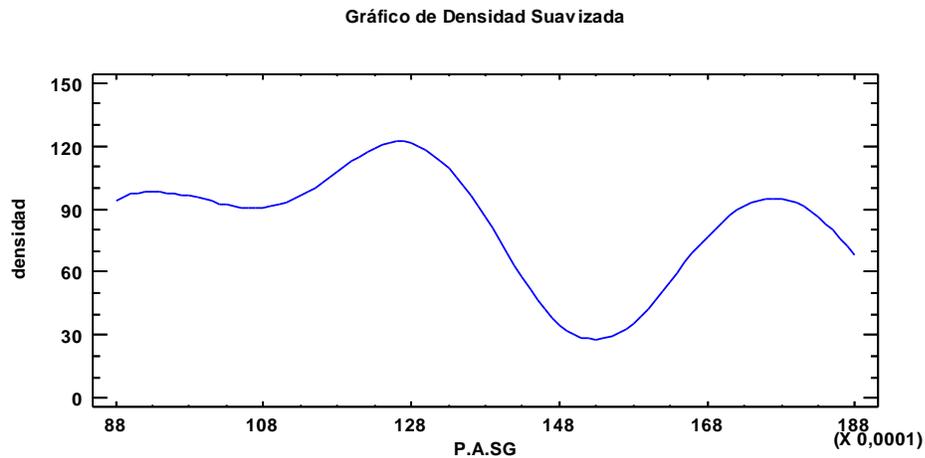
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15 Probabilidad normal permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 16 Densidad suavizada permeabilidad suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.5. Colmatación suelo arcilloso con geotextil.

No se puede hacer el análisis ya que los valores de colmatación son iguales.

3.14.1.6. Colmatación suelo arcilloso sin geotextil.

Tabla 3.33 Resumen estadístico para colmatación suelo arcilloso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,401
Mediana	0,393
Moda	
Media geométrica	0,390
Varianza	0,010
Desviación estándar	0,010
Coefficiente de variación	24,605%
Error estándar	0,0312
Mínimo	0,242
Máximo	0,552
Rango	0,310
Rango intercuartílico	0,160
Sesgo estandarizado	0,081
Curtosis	-0,824
Curtosis estandarizada	-0,530

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para colmatación suelo arcilloso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.34 Frecuencias para colmatación suelo arcilloso sin geotextil.

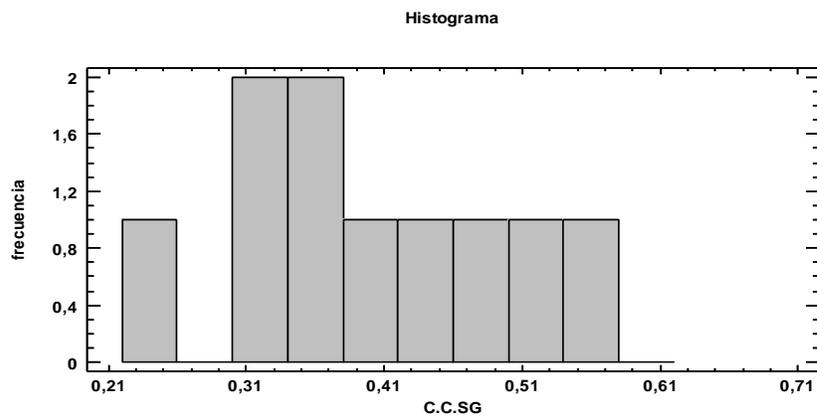
Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,220		0	0,000	0	0,000
1	0,220	0,260	0,240	1	0,100	1	0,100
2	0,260	0,300	0,280	0	0,000	1	0,100

3	0,300	0,340	0,320	2	0,200	3	0,300
4	0,340	0,380	0,360	2	0,200	5	0,500
5	0,380	0,420	0,400	1	0,100	6	0,600
6	0,420	0,460	0,440	1	0,100	7	0,700
7	0,460	0,500	0,480	1	0,100	8	0,800
8	0,500	0,540	0,520	1	0,100	9	0,900
9	0,540	0,580	0,560	1	0,100	10	1,000
10	0,580	0,620	0,600	0	0,000	10	1,000
	Mayor de	0,620		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

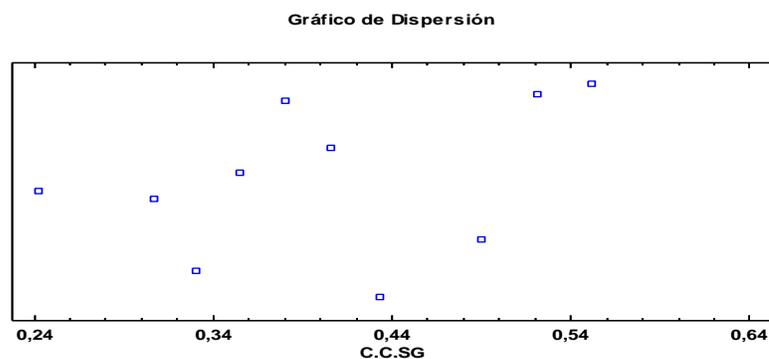
Media = 0,402 Desviación estándar = 0,099

Gráfico 17 Histograma de frecuencias colmatación suelo arcilloso sin geotextil.



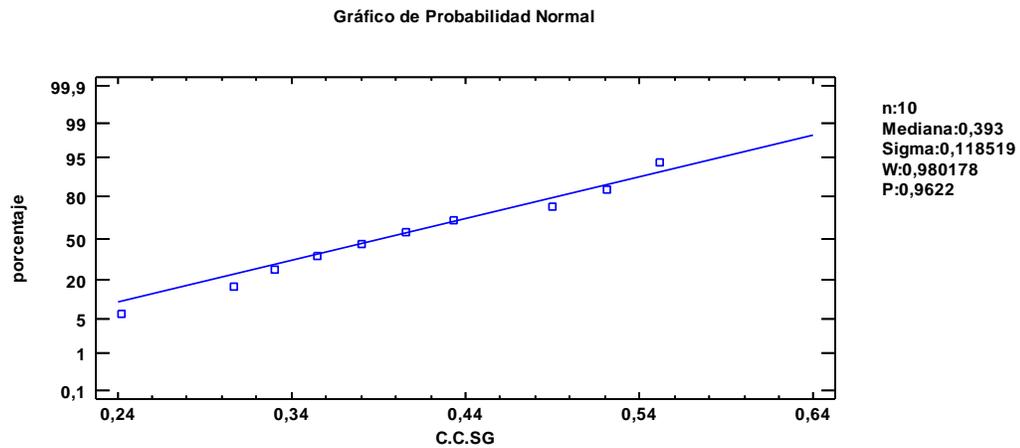
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 18 Dispersión colmatación suelo arcilloso sin geotextil.



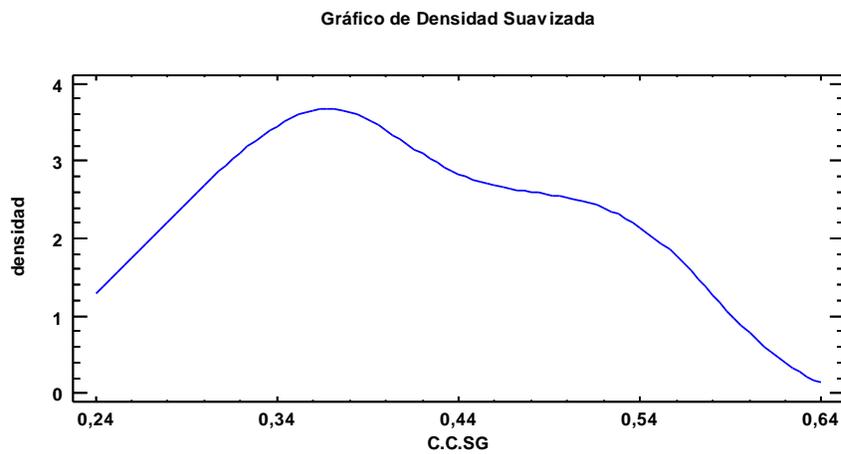
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19 Probabilidad normal colmatación suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 20 Densidad suavizada colmatación suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.7. Colmatación suelo arenoso con geotextil.

No se puede hacer el análisis ya que los valores de colmatación son iguales.

3.14.1.8. Colmatación suelo arenoso sin geotextil.

Tabla 3.35 Resumen estadístico para colmatación suelo arenoso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,559
Mediana	0,585
Moda	0,585
Media geométrica	0,551
Varianza	0,010
Desviación estándar	0,099
Coefficiente de variación	17,752%
Error estándar	0,031
Mínimo	0,406
Máximo	0,693
Rango	0,287
Rango intercuartílico	0,176
Sesgo estandarizado	-0,495
Curtosis	-1,283
Curtosis estandarizada	-0,828

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para colmatación suelo arenoso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.36 Frecuencias para colmatación suelo arenoso sin geotextil.

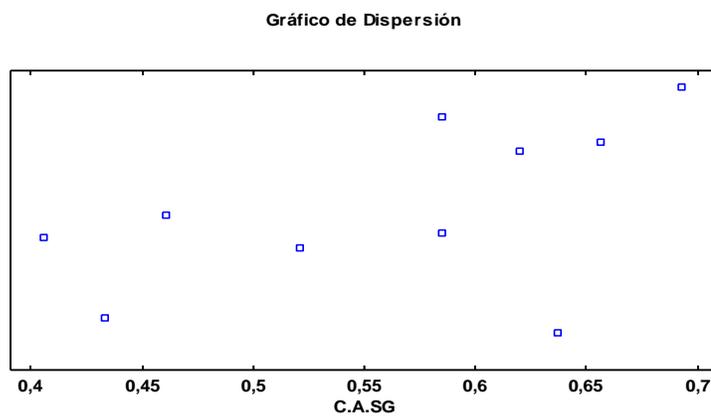
Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,390		0	0,000	0	0,000
1	0,390	0,430	0,410	1	0,100	1	0,100
2	0,430	0,470	0,450	2	0,200	3	0,300
3	0,470	0,510	0,490	0	0,000	3	0,300

4	0,510	0,550	0,530	1	0,100	4	0,400
5	0,550	0,590	0,570	2	0,200	6	0,600
6	0,590	0,630	0,610	1	0,100	7	0,700
7	0,630	0,670	0,650	2	0,200	9	0,900
8	0,670	0,710	0,690	1	0,100	10	1,000
9	0,710	0,750	0,730	0	0,000	10	1,000
10	0,750	0,790	0,770	0	0,000	10	1,000
	Mayor de	0,790		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

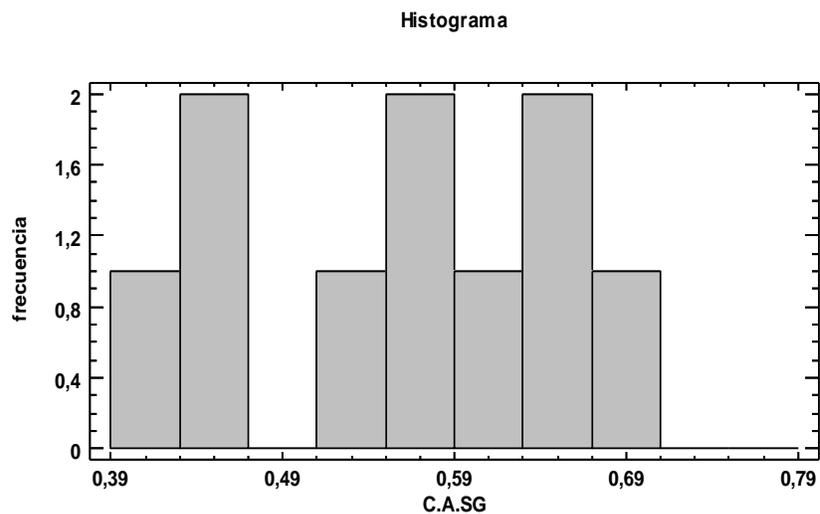
Media = 0,559 Desviación estándar = 0,099

Gráfico 21 Dispersión colmatación suelo arenoso sin geotextil.



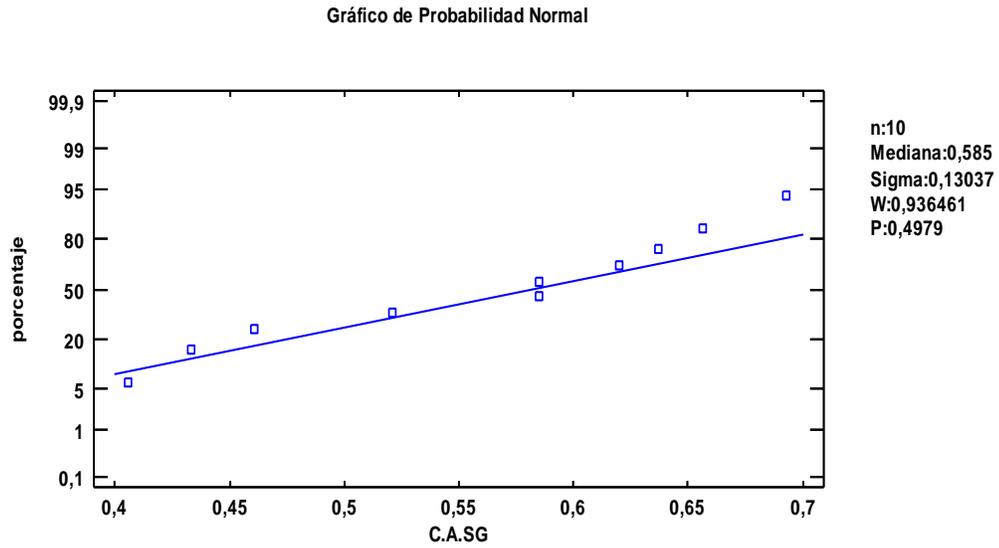
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 22 Histograma de frecuencias colmatación suelo arenoso sin geotextil.



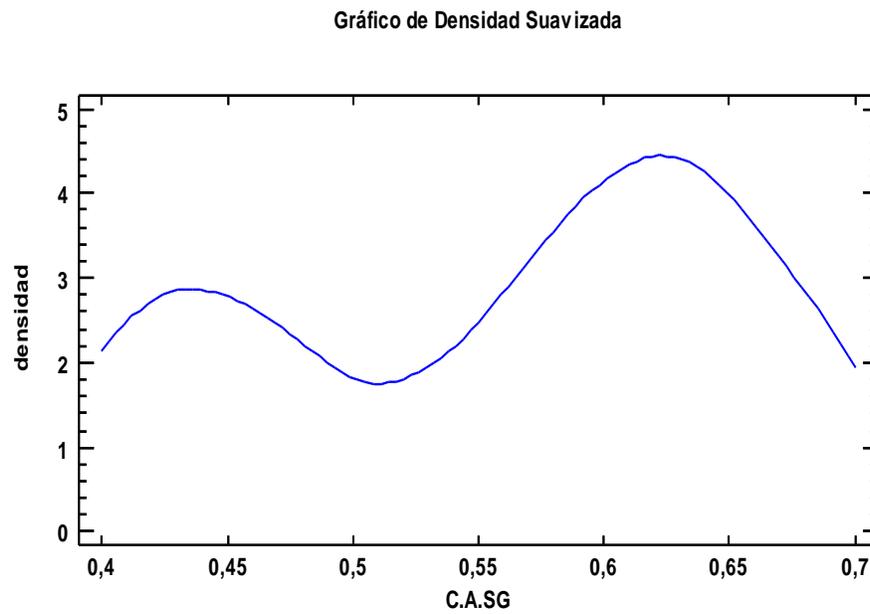
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23 Probabilidad normal colmatación suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 24 Densidad suavizada colmatación suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.9. Porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.

Tabla 3.37 Resumen estadístico para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.

Recuento	10
Promedio	0,087
Mediana	0,093
Moda	0,093
Media geométrica	0,085
Varianza	0,0002
Desviación estándar	0,015
Coefficiente de variación	17,484%
Error estándar	0,005
La desviación estándar geométrica	1,251
Mínimo	0,046
Máximo	0,093
Rango	0,047
Rango intercuartílico	0,000
Sesgo estandarizado	-3,414
Curtosis	7,091
Curtosis estandarizada	4,577

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.38 Frecuencias para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.

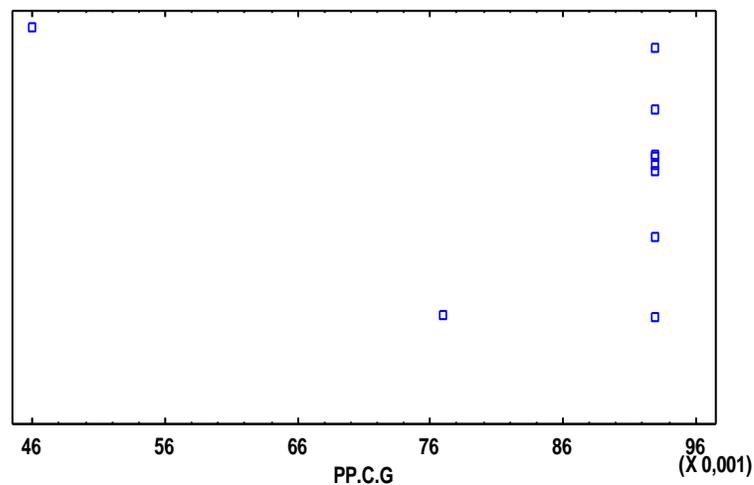
Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	0,043		0	0,000	0	0,000
1	0,043	0,049	0,046	1	0,100	1	0,100
2	0,049	0,055	0,052	0	0,000	1	0,100
3	0,055	0,061	0,058	0	0,000	1	0,100
4	0,061	0,067	0,064	0	0,000	1	0,100
5	0,067	0,073	0,070	0	0,000	1	0,100
6	0,073	0,079	0,076	1	0,100	2	0,200
7	0,079	0,085	0,082	0	0,000	2	0,200
8	0,085	0,091	0,088	0	0,000	2	0,200
9	0,091	0,097	0,094	8	0,800	10	1,000
10	0,097	0,103	0,100	0	0,000	10	1,000
	Mayor de	0,103		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

Media = 0,087 Desviación estándar = 0,015

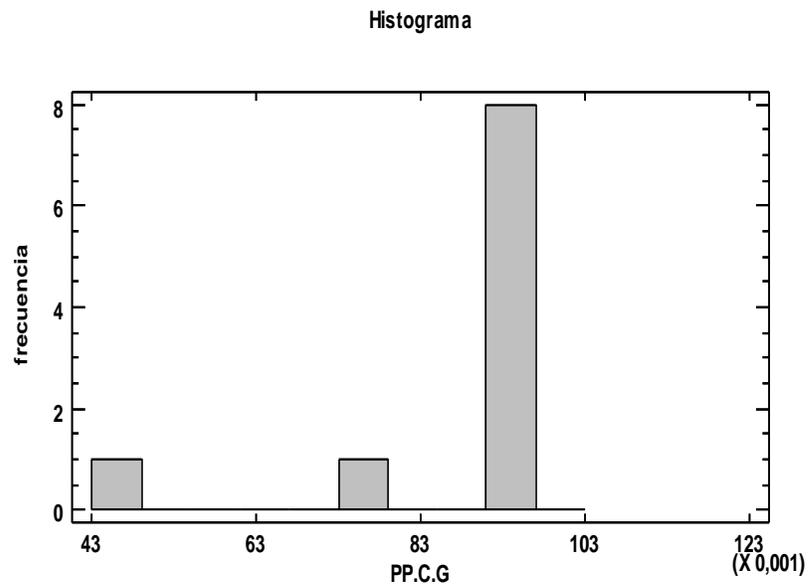
Gráfico 25 Dispersión porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.

Gráfico de Dispersión



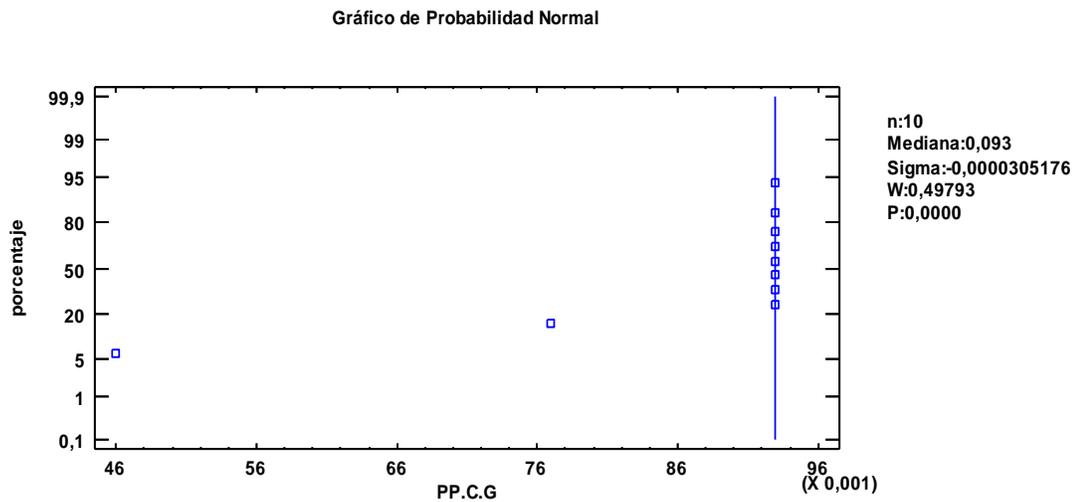
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 26 Histograma de frecuencias porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.



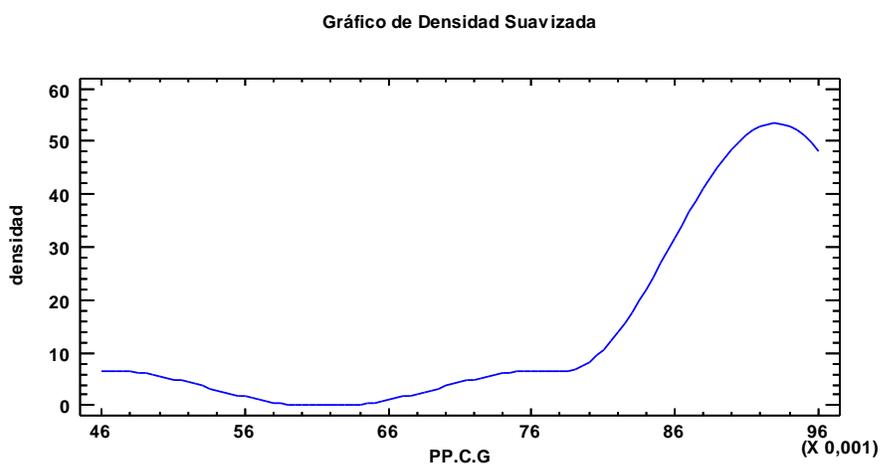
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 27 Probabilidad normal porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 28 Densidad suavizada porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso con geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.10. Porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.

Tabla 3.39 Resumen estadístico para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	12,039
Mediana	12,470
Moda	
Media geométrica	11,759
Varianza	6,789
Desviación estándar	2,606
Coefficiente de variación	21,643%
Error estándar	0,824
Mínimo	7,290
Máximo	15,900
Rango	8,610
Rango intercuartílico	3,720
Sesgo estandarizado	-0,611
Curtosis	-0,261
Curtosis estandarizada	-0,168

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

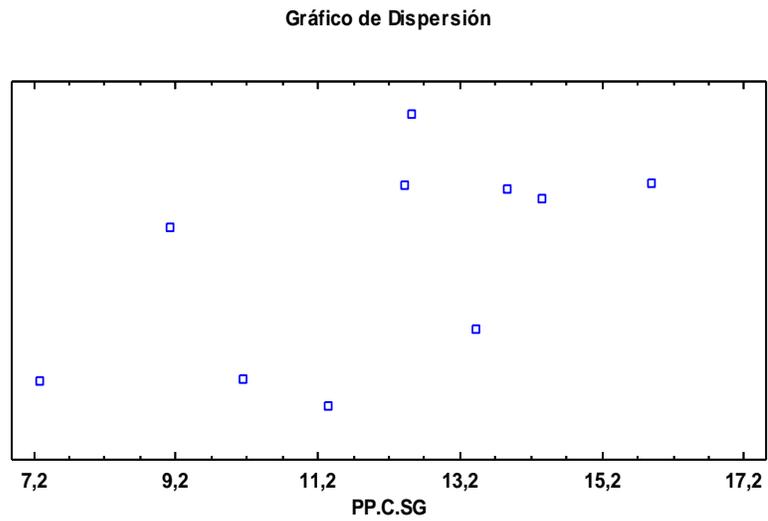
Tabla 3.40 Frecuencias para porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.

Clase	Límite Inf.	Límite Sup.	Punto medio	Frec.	Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	6,80		0	0,000	0	0,0000
1	6,80	7,80	7,30	1	0,100	1	0,100
2	7,80	8,80	8,30	0	0,000	1	0,100
3	8,80	9,80	9,30	1	0,100	2	0,200
4	9,80	10,80	10,30	1	0,100	3	0,300
5	10,80	11,80	11,30	1	0,100	4	0,400
6	11,80	12,80	12,30	2	0,200	6	0,600
7	12,80	13,80	13,30	1	0,100	7	0,700
8	13,80	14,80	14,30	2	0,200	9	0,900
9	14,80	15,80	15,30	0	0,000	9	0,900
10	15,80	16,80	16,30	1	0,100	10	1,000
	Mayor de	16,80		0	0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

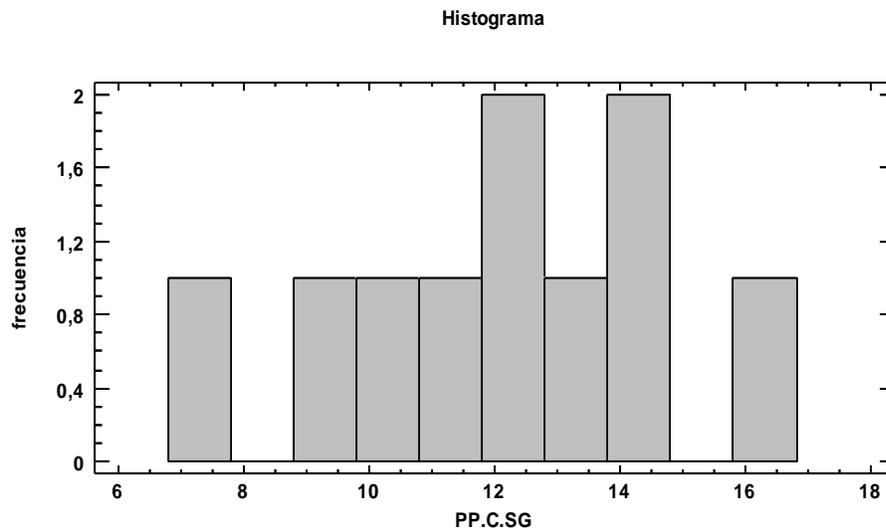
Media = 12,039 Desviación estándar = 2,606

Gráfico 29 Dispersión porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.



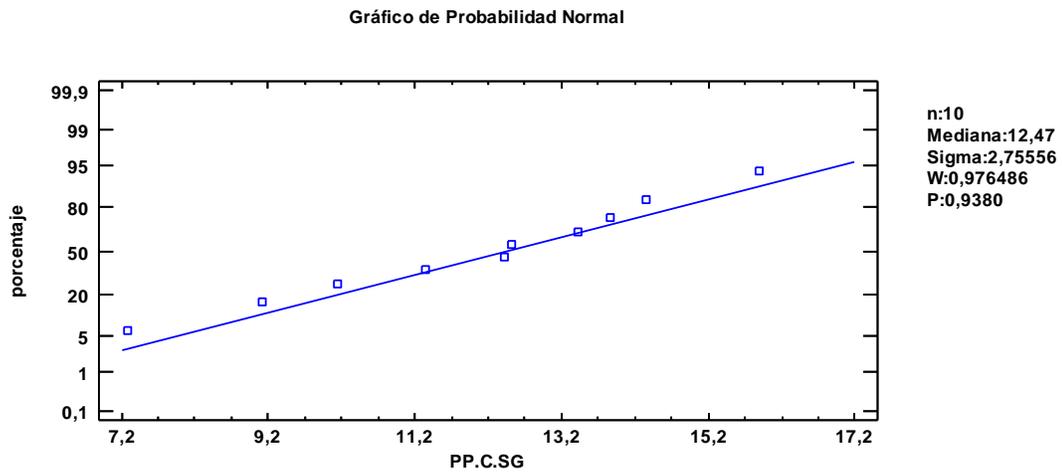
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 30 Histograma de frecuencias porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.



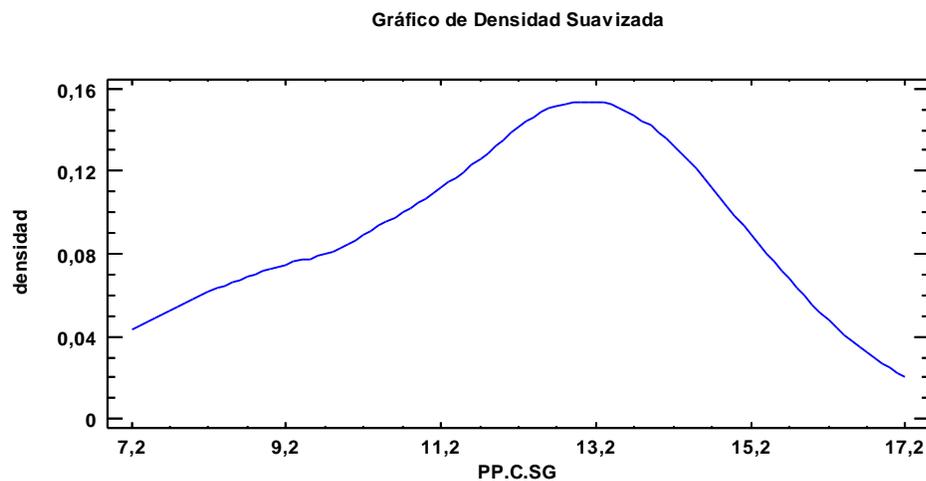
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 31 Probabilidad normal porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 32 Densidad suavizada porcentaje de partículas que pasan suelo arcilloso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.14.1.11. Porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso con geotextil.

No se puede hacer el análisis ya que los valores de porcentaje de partículas que pasan son iguales.

3.14.1.12. Porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.

Tabla 3.41 Resumen estadístico para porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.

Recuento	10
Promedio	10,116
Mediana	9,590
Moda	9,230
Media geométrica	10,007
Varianza	2,526
Desviación estándar	1,589
Coefficiente de variación	15,710%
Error estándar	0,503
La desviación estándar geométrica	1,167
Mínimo	7,820
Máximo	12,470
Rango	4,650
Rango intercuartílico	2,770
Sesgo estandarizado	0,623
Curtosis	-1,042
Curtosis estandarizada	-0,672

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla muestra los estadísticos de resumen para porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Tabla 3.42 Frecuencias para porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.

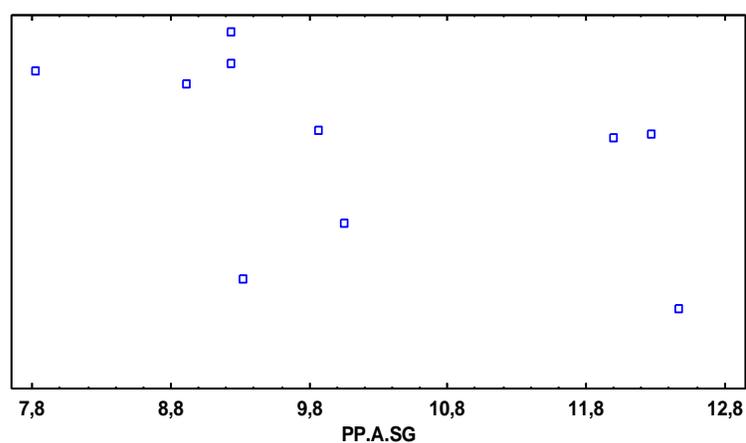
	Límite Inferior	Límite Superior		Frec. Rel.	Frec. Acum.	Frec. Rel. Acum.
	Menor o igual	7,50		0,000	0	0,000
1	7,50	8,10	7,80	0,100	1	0,100
2	8,10	8,70	8,40	0,000	1	0,100
3	8,70	9,30	9,00	0,300	4	0,400
4	9,30	9,90	9,60	0,200	6	0,600
5	9,90	10,50	10,20	0,100	7	0,700
6	10,50	11,10	10,80	0,000	7	0,700
7	11,10	11,70	11,40	0,000	7	0,700
8	11,70	12,30	12,00	0,200	9	0,900
9	12,30	12,90	12,60	0,100	10	1,000
10	12,90	13,50	13,20	0,000	10	1,000
	Mayor de	13,50		0,000	10	1,000

Fuente: Elaboración propia.

Media = 10,116 Desviación estándar = 1,589

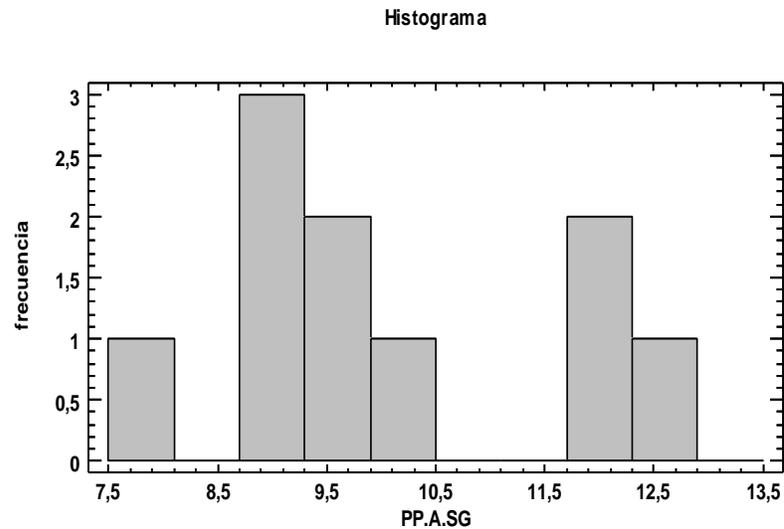
Gráfico 33 Dispersión porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.

Gráfico de Dispersión



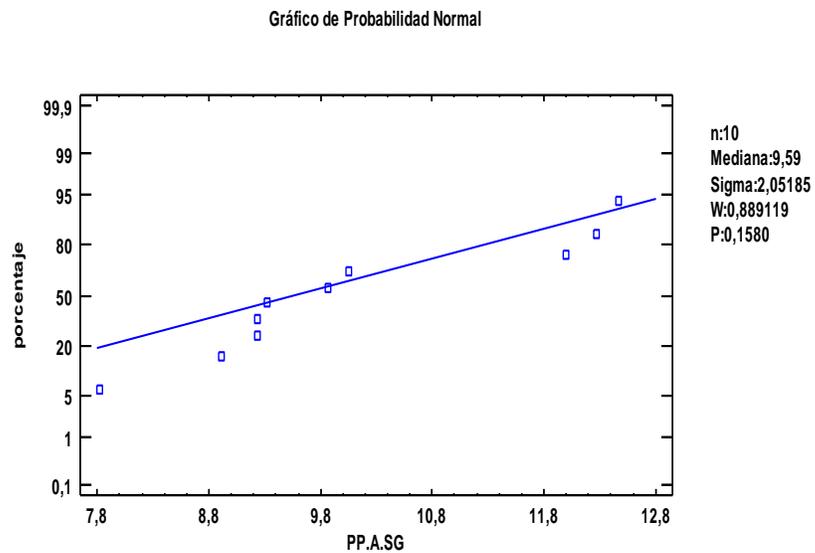
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 34 Histograma de frecuencias porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.



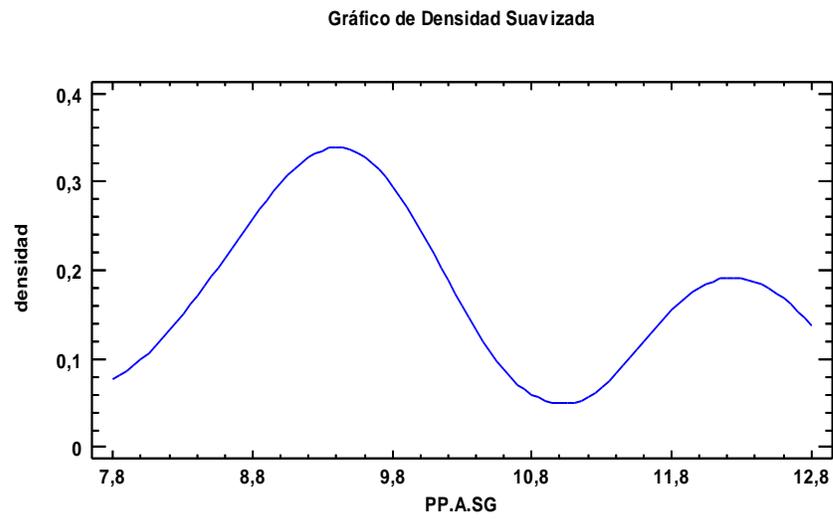
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 35 Probabilidad normal porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 36 Densidad suavizada porcentaje de partículas que pasan suelo arenoso sin geotextil.



Fuente: Elaboración propia.

3.15. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Tabla 3.43 Análisis y comparación de resultados.

Tiempo t = Días	Permeabilidad						Colmatación						Porcentaje de partículas que pasan											
	Coeficiente de permeabilidad K= (cm/seg)						Relación de vacíos e= adimensional						Porcentaje de partículas que pasan P= (%)											
	Suelo arcilloso			Suelo arenoso			Suelo arcilloso			Suelo arenoso			Suelo arcilloso			Suelo arenoso								
	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil	Con geotextil	Sin geotextil						
T	P.C.G	P.C.SG	P.A.G	P.A.SG	C.C.G	C.C.SG	C.A.G	C.A.SG	PP.C.G	PP.C.SG	PP.A.G	PP.A.SG	0,0365	8,67E-06	0,0391	0,0121	0,62	0,552	0,693	0,433	0,046	7,29	0,053	12,27
2	0,0368	4,84E-06	0,0368	0,0088	0,62	0,521	0,693	0,461	0,077	9,11	0,053	12,00												
3	0,0372	4,71E-06	0,0356	0,0095	0,62	0,490	0,693	0,521	0,093	10,15	0,053	8,91												
4	0,0343	4,64E-06	0,0348	0,0092	0,62	0,433	0,693	0,406	0,093	11,35	0,053	12,47												
5	0,0365	4,51E-06	0,0340	0,0183	0,62	0,406	0,693	0,490	0,093	12,43	0,053	7,82												
8	0,0342	4,42E-06	0,0337	0,0134	0,62	0,380	0,693	0,552	0,093	12,51	0,053	9,23												
9	0,0314	4,08E-06	0,0321	0,0173	0,62	0,355	0,693	0,585	0,093	13,42	0,053	9,23												
10	0,0325	3,78E-06	0,0309	0,0121	0,62	0,330	0,693	0,585	0,093	13,87	0,053	10,05												
11	0,0337	3,68E-06	0,0304	0,0130	0,62	0,307	0,693	0,620	0,093	14,36	0,053	9,86												
12	0,0321	3,36E-06	0,0276	0,0175	0,62	0,242	0,693	0,521	0,093	15,90	0,053	9,32												

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.44 Análisis y comparativo costo vida útil.

Subdrenes granulares		
	Con geotextil	Sin geotextil
Tiempo de vida útil (años)	35	25
Costo de construcción (bs)	125,60	95,47

Fuente: elaboración propia.

Se comprobó la funcionalidad de los subdrenes granulares con geotextil y subdrenes granulares sin geotextil con material de cobertura arenoso y arcilloso a través de los ensayos de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan comprobando que los subdrenes granulares con geotextil son más funcionales en comparación al caudal subsuperficial que pueden circular por ellos en un determinado tiempo que los subdrenes granulares sin geotextil de acuerdo a la tabla 3.43.

Realizando un análisis comparativo en función al tiempo de vida útil y costo de los subdrenes granulares con y sin geotextil se puede apreciar que de acuerdo a la tabla 3.44 los subdrenes granulares con geotextil tienen mayor tiempo de vida útil y mayor costo de construcción que los subdrenes granulares sin geotextil.

3.16. APLICABILIDAD TÉCNICA DEL TRABAJO.

De acuerdo a los ensayos realizados de permeabilidad colmatación y porcentaje de partículas que pasan en subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil se hizo una comparación de estos parámetros que determinó la funcionalidad de los subdrenes, de acuerdo a la funcionalidad se definió ventajas y desventajas del uso del geotextil en subdrenes granulares, con lo que se estableció que con la utilización del geotextil en subdrenes granulares se tiene un mayor tiempo de vida útil.

Este trabajo es aplicado en obras de subdrenaje en taludes de material arcilloso y material arenoso, con el fin de garantizar mayor tiempo de vida útil de los subdrenes para evitar deslizamientos en taludes de la carretera.

El efecto del subdren es en este caso interceptar y eliminar el flujo de agua disminuyendo la zona eventualmente saturada en el talud. La mayor parte de los subdrenes que se colocan en carreteras y vías para ferrocarriles tienen tal finalidad, por lo que resulta ser en este caso estructuras cuya principal función es la protección de pavimentos, interceptando un flujo de agua. Aquí más que interceptar el flujo, la misión del subdren es abatir el nivel freático protegiendo así al pavimento. Ésta es una necesidad muy frecuente en terrenos planos, con un nivel freático muy próximo a la superficie.

Entre otras aplicaciones comunes de geotextiles para caminos, se incluye el refuerzo de la subrasante a fin de reducir el espesor necesario de la capa de agregado colocada sobre suelos muy débiles, el refuerzo de estructuras como pueden ser muros de retención y rellenos reforzados. En la actualidad los geotextiles son de uso común para proporcionar zonas de filtro entre materiales de diferentes tamaños y granulometrías debido a que resultan económicos, son fáciles de instalar y se comportan bien dentro de una gran variedad de suelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES.

- Obteniendo un coeficiente de permeabilidad promedio a 15 días de $k= 0,0345$ (cm/seg) para un subdren granular con material de cobertura arcilloso y geotextil en comparación con un subdren granular con material de cobertura arcilloso sin geotextil con coeficiente de permeabilidad promedio de $k=4,67E-06$ (cm/seg) resultados que representa que los subdrenes granulares con geotextil son la mejor alternativa en construcción de subdres, comprobando así la hipótesis planteada.

- Obteniendo una relación de vacíos promedio a 15 días de $e= 0,62$ para un subdren granular con material de cobertura arcilloso y geotextil en comparación con un subdren granular con material de cobertura arcilloso sin geotextil de $e= 0,40$ por lo que se comprueba que la relación de vacíos en el subdren granular con geotextil es mayor debido a que el geotextil retiene el material de cobertura impidiendo que los vacíos del material granular drenante se colmaten como ocurre en el subdren sin geotextil que pasan partículas del material de cobertura haciendo que la relación de vacíos baje.

- Comparando el porcentaje partículas que pasan en el sistema subdren granular con material de cobertura arcilloso más geotextil con subdren granular con material de cobertura arcilloso sin geotextil observamos que en el sistema con geotextil éste retiene las partículas de material de cobertura obteniendo un porcentaje de partículas que pasan $= 0,093$ siendo constante en el tiempo de 15 días, para el sistema sin geotextil el porcentaje de partículas que pasan es variable en función al tiempo y las características físicas del material de cobertura obteniendo a un tiempo de 15 días un porcentaje de partículas que pasan promedio $= 12,04\%$.

- Obteniendo un coeficiente de permeabilidad promedio a 15 días de $k= 0,0335$ (cm/seg) para un subdren granular con material de cobertura arenoso y geotextil en comparación con un subdren granular con material de cobertura arenoso sin geotextil con coeficiente de permeabilidad promedio de $k=0,013$ (cm/seg) resultados que representa que los subdrenes granulares con geotextil son la mejor alternativa en construcción de subdres, comprobando así la hipótesis planteada.

- Obteniendo una relación de vacíos promedio a 15 días de $e = 0,693$ para un subdren granular con material de cobertura arenoso y geotextil en comparación con un subdren granular con material de cobertura arenoso sin geotextil el cual varía en función al tiempo de carga y las características físicas del material de cobertura de $e = 0,517$, por lo que se comprueba que la relación de vacíos en el subdren granular con geotextil es mayor y constante debido a que el geotextil retiene el material de cobertura impidiendo que los vacíos del material granular drenante se colmaten como ocurre en el subdren sin geotextil que pasan partículas del material de cobertura haciendo que la relación de vacíos baje.

- Comparando el porcentaje partículas que pasan en el sistema subdren granular con material de cobertura arenoso más geotextil con subdren granular con material de cobertura arenoso sin geotextil observamos que en el sistema con geotextil éste retiene las partículas de material de cobertura obteniendo un porcentaje de partículas que pasan $= 0,053$ siendo constante en el tiempo de 15 días, para el sistema sin geotextil el porcentaje de partículas que pasan es variable en función al tiempo y las características físicas del material de cobertura obteniendo a un tiempo de 15 días un porcentaje de partículas que pasan promedio $= 10,12\%$.

- Se establecieron parámetros de comparación para subdrenes granulares con y sin geotextil en base a la permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan.

- Se analizaron las características físicas y mecánicas de los subdrenes granular con geotextil y subdrenes granulares sin geotextil concluyendo que los subdrenes granulares con geotextil son eficientes que los subdrenes granulares sin geotextil.

- Las ventajas del uso de geotextil en subdrenes granulares son:

Ayuda a drenar el agua desde el material de cobertura hacia el material granular drenante con facilidad influyendo en su funcionamiento.

Ayuda a retener las partículas del material de cobertura el geotextil se convierte en una barrera de migración de partículas entre dos tipos de suelo, evitando que pasen hacia el material granular drenante evitando que sus poros se colmaten aumentando su vida útil.

El uso de geotextil aumenta el funcionamiento y tiempo de vida útil de los subdrenes granulares evitando que las partículas del material de cobertura pasen hacia el material granular drenante disminuyendo así su funcionamiento y tiempo de vida útil como se comprobó en el presente trabajo.

- Las desventajas del no uso de geotextil en subdrenes granulares son:

Sin el uso de geotextil el material de cobertura con contenido de arcilla se vuelve impermeable evitando el paso del agua hacia el material granular drenante haciendo que el subdren granular no funcione correctamente.

Sin el uso de geotextil una gran cantidad de partículas del material de cobertura pasan hacia el material granular drenante colmatando sus poros disminuyendo su funcionamiento como su tiempo de vida útil.

- Se analizaron las variables de permeabilidad, colmatación y porcentaje de partículas que pasan tanto para subdrenes granulares con y sin geotextil y con material de cobertura de suelo arcilloso como arenoso concluyendo que el uso de geotextil es la mejor opción en ambos casos aumentando su funcionamiento y tiempo de vida útil de los subdrenes granulares.

- Comparando los subdrenes granulares con geotextil y los subdrenes granulares sin geotextil en función al tiempo de vida útil de ambos observamos que los subdrenes granulares con geotextil tienen mayor tiempo de vida útil debido a que el geotextil funciona como una barrera de migración de las partículas entre dos tipos de suelo evitando la colmatación del material granular drenante del subdren, el tiempo de vida útil sin mantenimiento del subdren aumenta de 25 a 35 años.

- Al realizar una comparación del costo de construcción para los subdrenes granulares y subdrenes granulares con geotextil se observa de acuerdo al análisis de precios unitarios que el subdren granular con geotextil tiene un costo de 125,60 bs/ml y el subdren granular sin geotextil un costo de 95,47 bs/ml concluyendo que el subdren granular con geotextil es 31,58% más caro que el subdren granular sin geotextil pero de acuerdo al análisis el uso de geotextil tiene más ventajas evitando el mantenimiento de los subdrenes y carretera.

4.2. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda de acuerdo a este trabajo usar geotextil en obras de subdrenes para evitar la colmatación y mal funcionamiento de estos alargando así su tiempo de vida útil.
- El uso de geotextil impide el paso de las partículas del material de cobertura hacia el material granular drenante del subdren impidiendo que sus poros se colmaten con el material de cobertura que pudiese pasar al material granular drenante del subdren aumentando de esta manera el tiempo de vida útil de los subdrenes granulares.